

# NÁVRH SNUBBERU PRO VÝKONOVÉ EL. OBVODY

By Rudy Severns

## Co je to snubber?

Výkonové polovodiče jsou srdcem zařízení výkonové elektroniky. Snubbery jsou obvody, které jsou umístěny přes polovodičové součástky pro ochranu a zlepšení výkonu. Snubbery mohou dělat mnoho věcí:

- Omezit nebo eliminovat napěťové nebo proudové špičky
- Omezit  $di/dt$  nebo  $du/dt$
- Formovat zátěžové linky, aby se udržely v bezpečné pracovní oblasti (SOA, safe operating area)
- Přenést ztrátový výkon ze spínače do rezistoru nebo do užitečné zátěže
- Omezit celkové spínací ztráty
- Omezit EMI utlumením napěťových a proudových zákmitů.

Existuje mnoho různých druhů snubberů, ale nejběžnější vypínací snubbery jsou: odpor – kondenzátor (RC) a odpor – kondenzátor – dioda (RCD). Tato aplikační poznámka ukáže, jak navrhnout tyto dva snubbery.

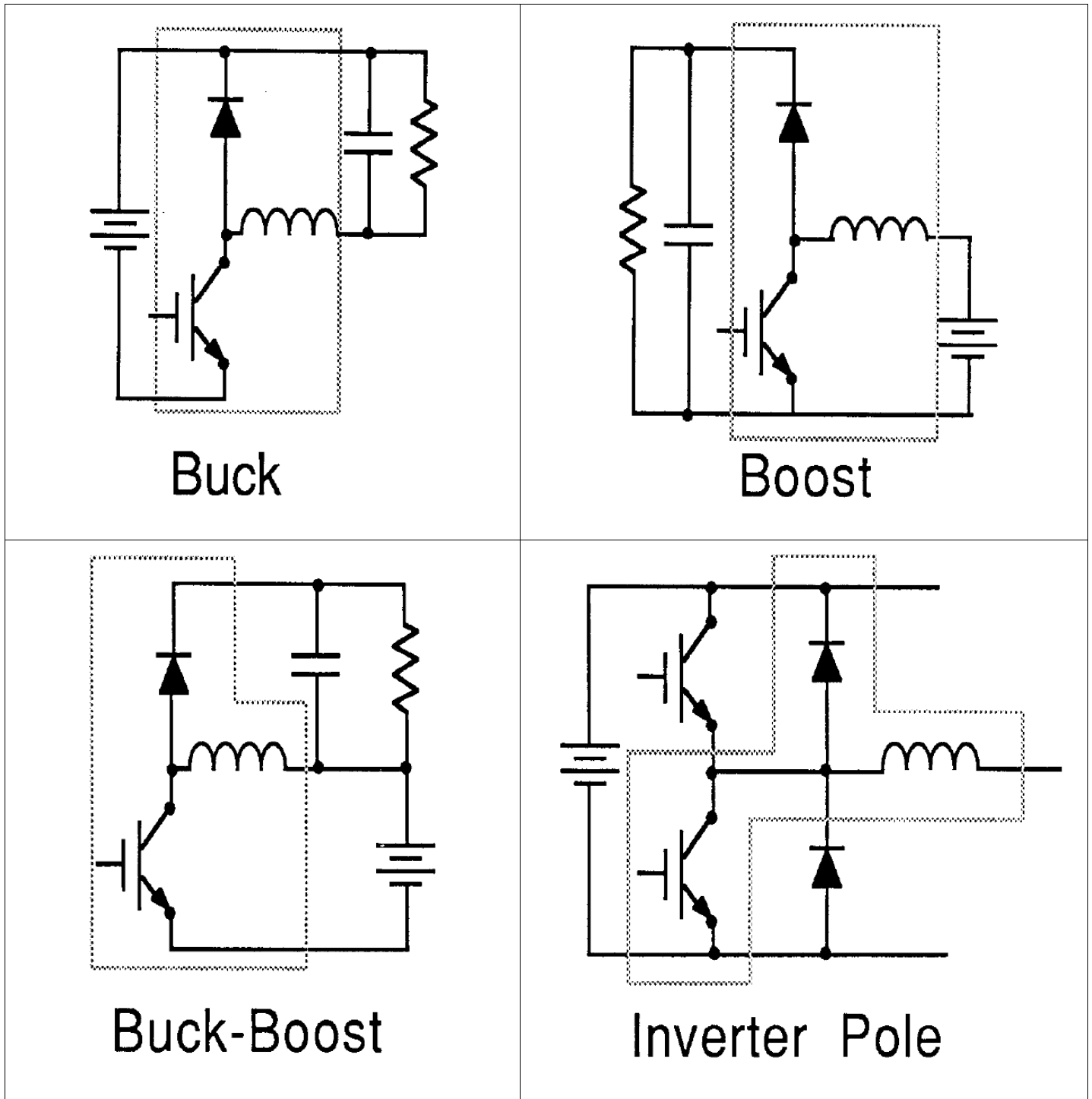
## Průběhy veličin ve spínačích

Dříve než se začneme zabývat konstrukcí snubberu, je důležité pochopit průběhy veličin, které se přirozeně objevují ve výkonových obvodech. Tyto poskytují jak motivaci pro použití snubberů, tak informaci potřebnou pro jejich konstrukci. Používá se velmi mnoho různých typů obvodů používaných ve výkonových měničích, pohonech motorů, předřadnicích zářivek a v dalších zařízeních. Naštěstí všechny tyto obvody mají společnou síť a průběhy veličin, jež jsou spojeny s těmito spínači. Obr. 1 ukazuje čtyři široce používané obvody. Všechny z těchto obvodů, a vlastně většina obvodů výkonové elektroniky, má stejnou síť spínač-dioda-induktor vyznačenou ve schématech tečkovanou čarou. Chování této sítě je stejné ve všech těchto obvodech, což znamená, že stačí vyřešit konstrukci snubberu pro jeden obvod, který budeme aplikovat pro všechny ostatní obvody. To obrovsky usnadňuje řešení problému a dovoluje vytvořit zobecněné techniky konstrukce snubberu.

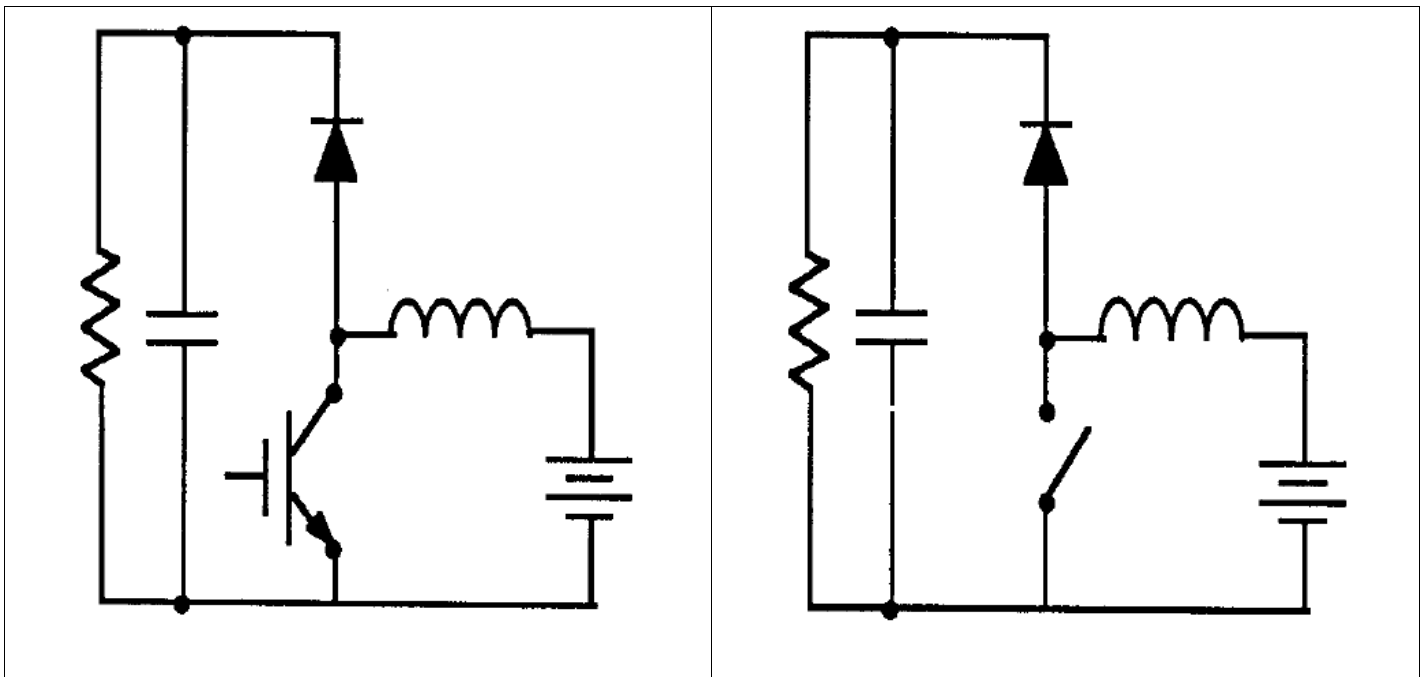
Typický zvyšující měnič je zobrazen na obr. 2a. Z hlediska návrhu snubberu nás zajímá chování obvodu během doby přechodu při spínání, která je mnohem kratší než perioda spínání. Toto nám umožňuje zjednodušit analýzu. Při normální činnosti je výstupní napětí stejnosměrné s velmi malým zvlněním. To znamená, že můžeme zátěž a filtrační kondenzátor nahradit baterií, protože se výstupní napětí během přechodové doby při spínání mění velmi málo. Proud v induktoru se také mění velmi málo během přechodu a my můžeme induktor nahradit zdrojem proudu. Zjednodušený obvod je na obr. 2b. Průběhy napětí (E) a proudu (I) jsou zobrazeny na obr. 2c.

Na začátku spínacího cyklu je spínač otevřený a celý proud ( $I_o$ ) teče přes diodu do baterie. Jak se spínač postupně spíná, proud postupně začíná téct spínačem a přestává téct diodou. Avšak dokud diodou protéká proud, spínané napětí zůstává na hodnotě  $E_o$ . Jakmile je celý proud přesunut do spínače, spínané napětí

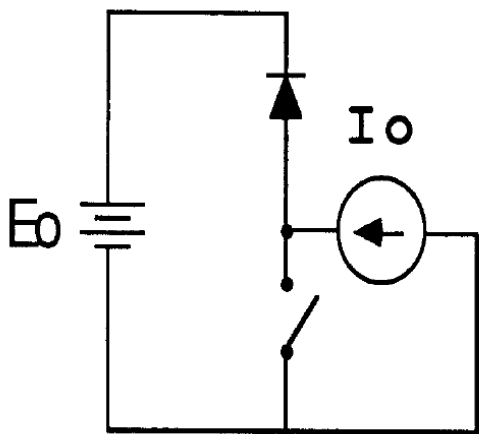
může začít klesat. Při vypínání je situace opačná. Když se spínač vypíná, napětí na něm začíná růst. Proud ve spínači však nezačne klesat, dokud napětí na spínači nedosáhne  $E_o$ , protože až do tohoto bodu je dioda zavřená. Jakmile dioda začne vést, proud ve spínači může spadnout.



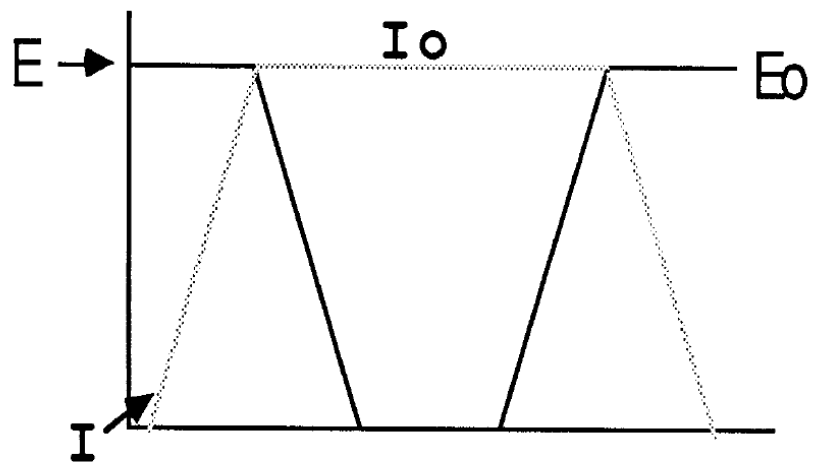
Obr. 1



a)



(b)



(c)

Obr. 2: Zvyšující měnič (Boost converter)

Tento typ spínání, běžně nazývaný “tvrdé spínání”, vystavuje spínač vysokému namáhání, protože současně musí být podporováno maximální napětí a maximální proud. To také vede k vysokým spínacím ztrátám.

V praktických obvodech je namáhání spínače ještě větší z důvodu nevyhnutelné přítomnosti parazitní indukčnosti ( $L_p$ ) a kapacity ( $C_p$ ), jak ukazuje obr. 3a.  $C_p$  zahrnuje kapacitu spínače a kapacity plošného spoje a montáže.  $L_p$  je způsobena indukčností obvodů na plošném spoji.  $L_p$  může být minimalizována dobrým návrhem plošného spoje, ale přesto se nevyhneme nějaké zbytkové indukčnosti, což může způsobit napěťové zákmity při vypínání, jak ukazuje obr. 3b.

Nejběžnějším důvodem pro použití snubberu je omezit špičkové napětí na spínači, aby se omezily spínací ztráty během vypínání.

## Návrh RC snubberu

RC snubber, umístěný přes spínač, jak ukazuje obr. 4, může být použit k omezení špičkového napětí při vypínání a pro utlumení zákmitů. Ve většině případů může být použita velmi jednoduchá technika pro určení vhodných hodnot pro komponenty ( $R_s$  a  $C_s$ ). V těch případech, kde je třeba optimální návrh, je použita o trochu složitější procedura.

### Rychlý návrh snubberu:

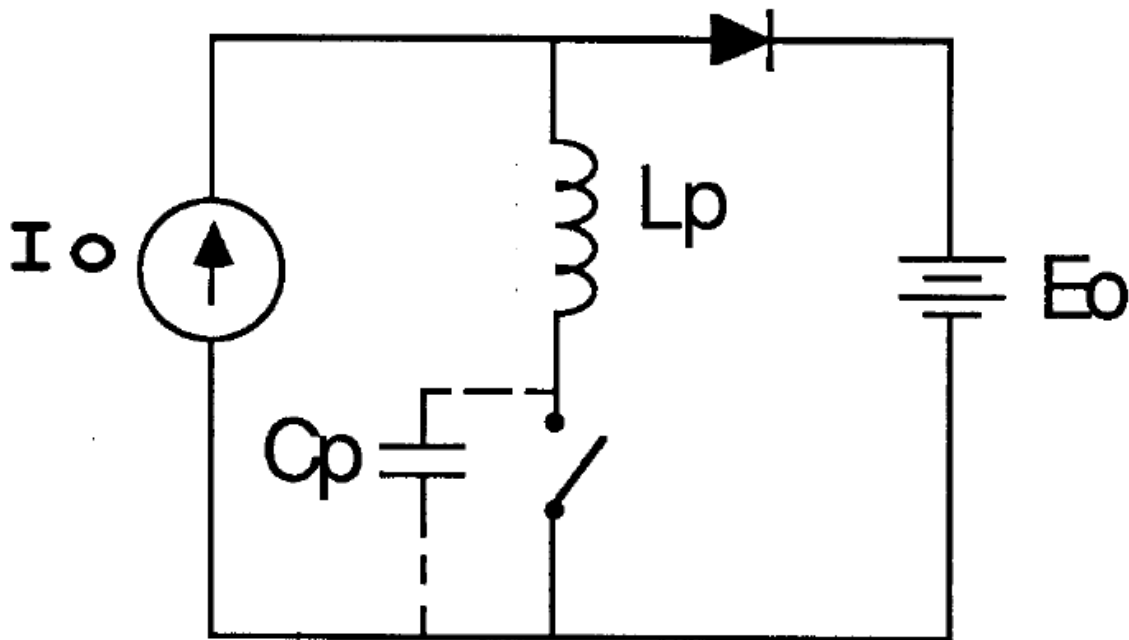
Pro dosažení významného utlumení  $C_s > C_p$ . Dobrou první volbou je zvolit  $C_s$  jako dvojnásobek výstupní kapacity spínače a odhadnuté montážní kapacity.  $R_s$  je zvolen tak, aby  $R_s = E_o/I_o$ . To znamená, že počáteční nárůst napětí způsobený proudem protékajícím v  $R_s$  není větší než svorkové výstupní napětí. Výkon ztracený v  $R_s$  může být odhadnut ze špičkové energie uložené v  $C_s$ :

$$U_p = \frac{C_s E_o^2}{2}$$

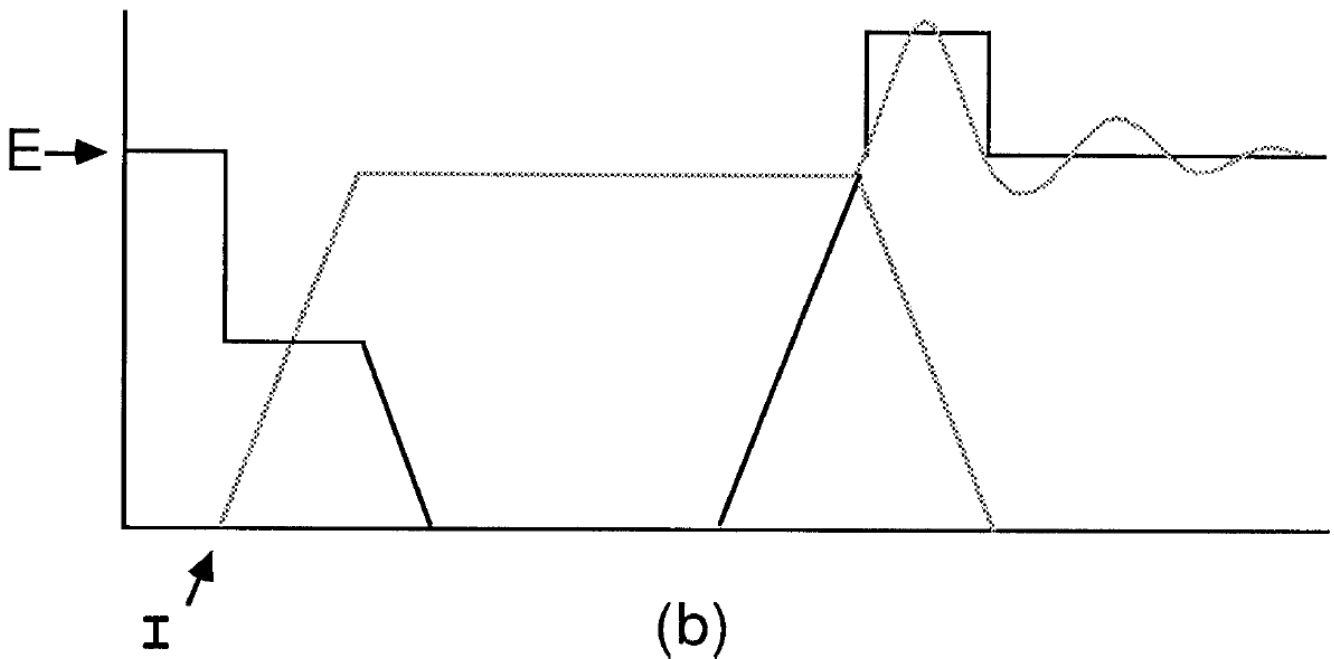
To je množství energie zmařené v  $R_s$ , když  $C_s$  je nabíjen a vybíjen, takže průměrný výkon ztracený v odporu při dané spínací frekvenci  $f_s$  je:

$$P_{diss} \approx C_s E_o^2 f_s$$

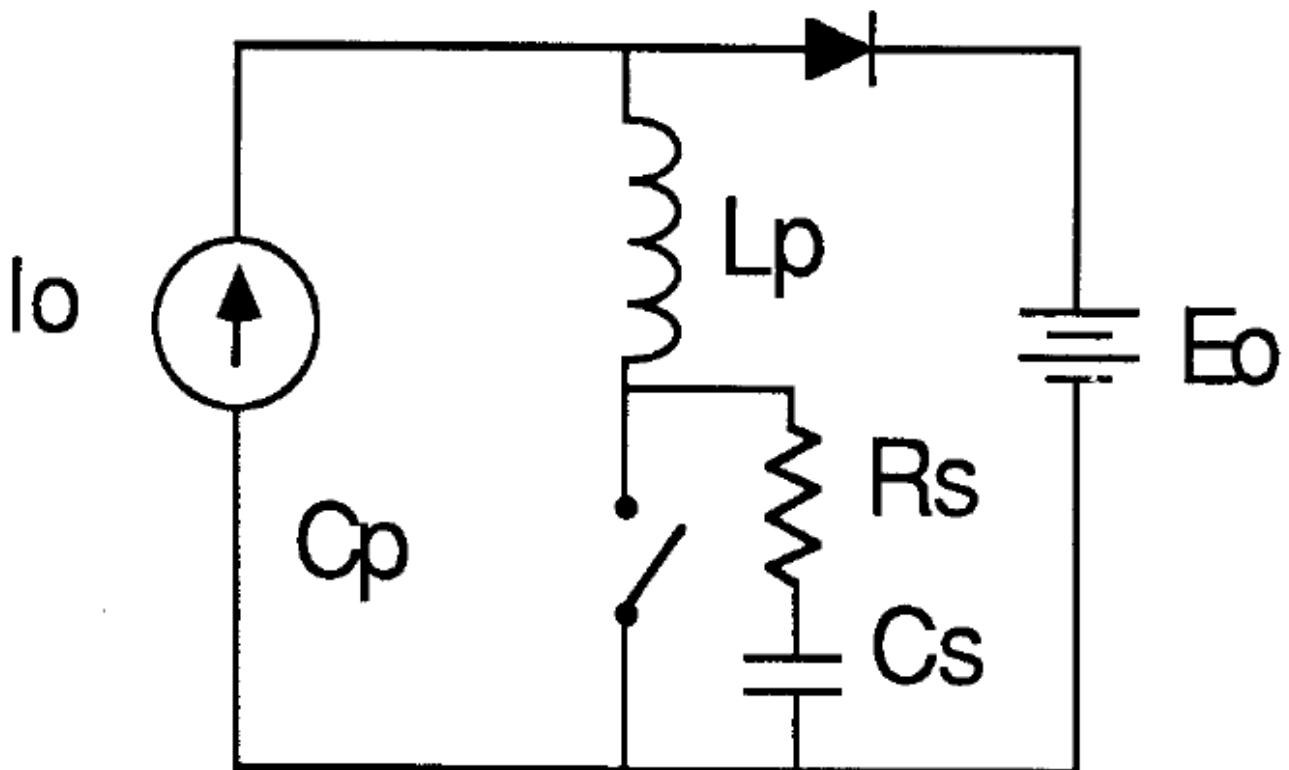
V závislosti na množství zákmitů bude skutečný ztrátový výkon mírně větší než vypočítaný.



a)



Obr. 3



Obr. 4

Následující příklad ukazuje použití této procedury. Předpokládejme, že spínačem je IRF740s  $I_o = 5\text{A}$  a  $E_o = 160\text{V}$ . Pro tuto součástku  $C_{oss} = 170\text{pF}$  a montážní kapacita bude  $40\text{pF}$ . Vynásobením této kapacity dvěma dostaneme  $C_s = 420\text{pF}$ . Pro tento snubber bude ideální slídový kondenzátor na  $500\text{V}$  a dostupné kapacity jsou  $390$  s  $470\text{pF}$ . Použijeme nejbližší jmenovitou hodnotu  $C_s = 390\text{pF}$ .  $R_s = E_o/I_o = 160/5 = 32\Omega$ . Pro  $f_s = 100\text{kHz}$  je  $P_{diss} \approx C_s E_o^2 f_s = 390 \cdot 10^{-12} \cdot 160^2 \cdot 10^5 = 0,9984\text{W} \approx 1\text{W}$ . Dvouvattový uhlíkový kompozitový odpor

bude ideální jako  $R_s$ , protože má velmi nízkou vlastní indukčnost. Carbon film rezistor může být také použit, pokud se vyhneme odporům, které jsou upraveny spirálovou drážkou.

Pokud tato velmi jednoduchá a praktická procedura dostatečně neomezí špičkové napětí, potom by  $C_s$  měl být zvětšen nebo může být použita optimalizovaná procedura.

Optimalizovaný RC snubber: V těch případech, kde musí být špičkové napětí minimalizováno a je kritický ztrátový výkon, měl by být použit optimální přístup. V klasické práci [1] dr. McMurray popsal optimalizaci RC snubberu. Následující pojednání představí hlavní body této procedury.

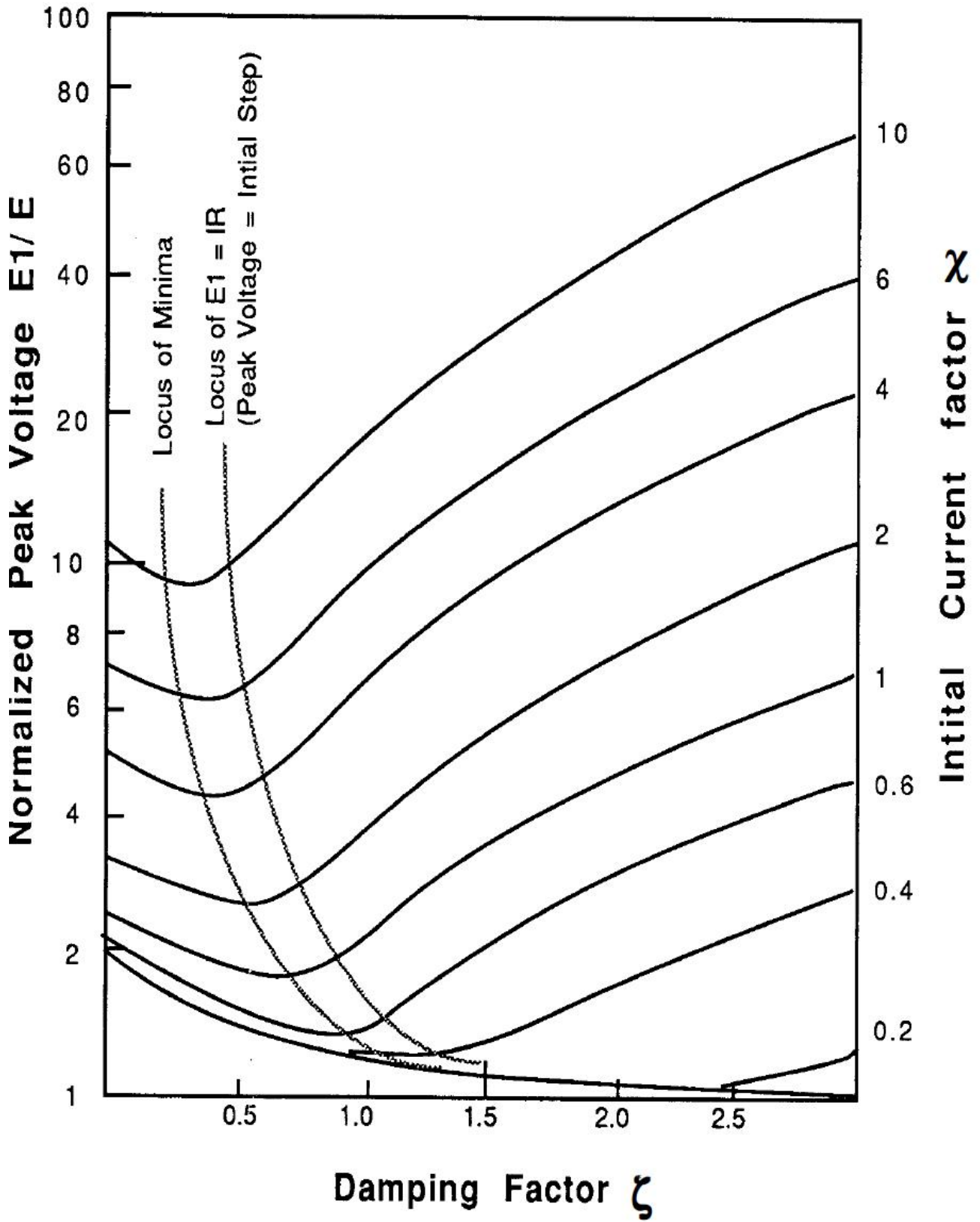
Budou použity následující definice:

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| $Z_o = (L_p/C_s)^{1/2}$          |  |
| $\chi = (I_o/E_o)Z_o$            | initial current factor                         |
| $\chi^2 = L_p I_o^2 / C_s E_o^2$ | initial energy in $L_p$ /final energy in $C_s$ |
| $\zeta = P_s/2Z_o$               | damping factor                                 |
| $E_1 =$                          | peak switch voltage                            |
| $E_1/E_o =$                      | normalized peak switch voltage                 |

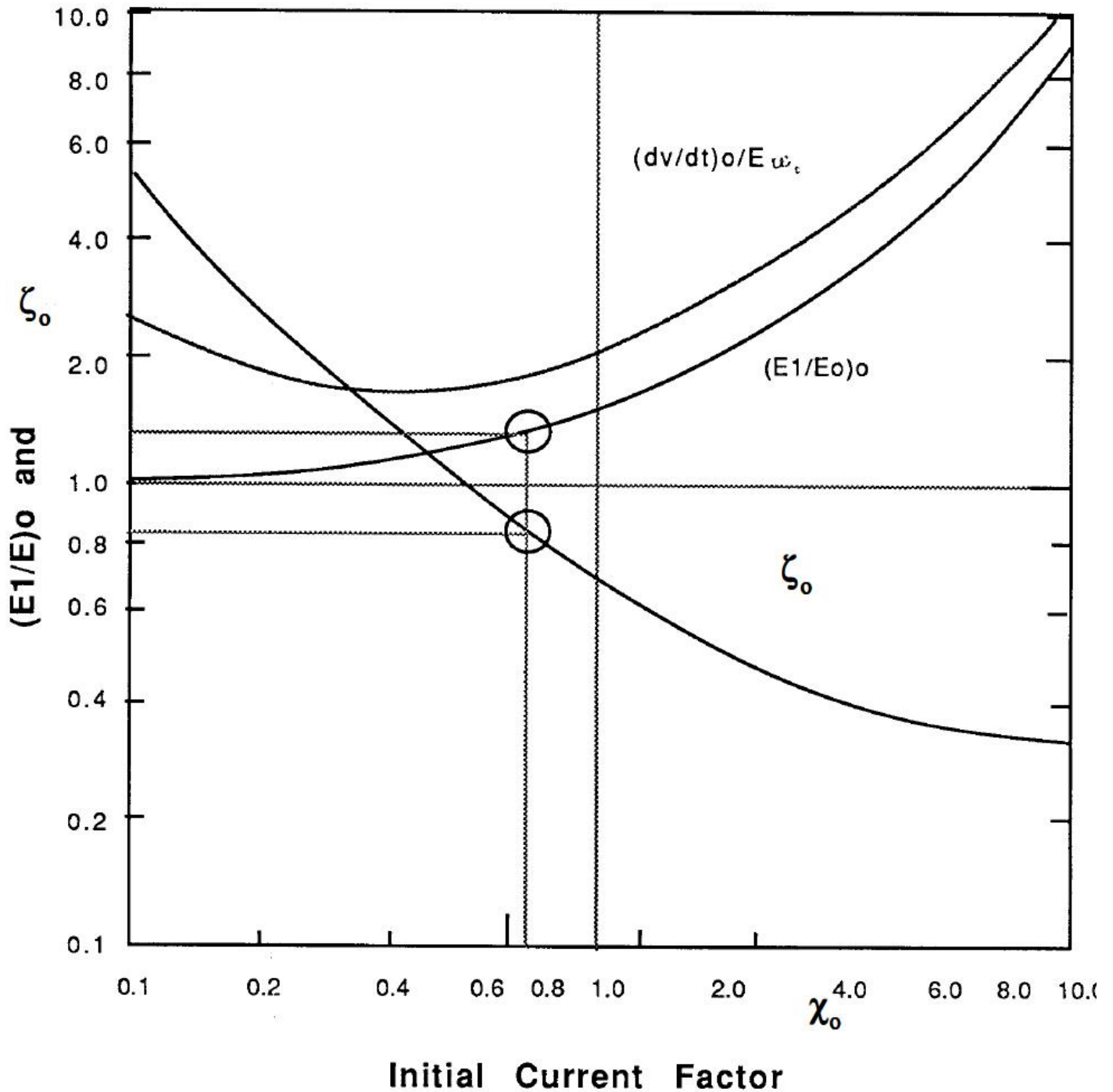
V procesu návrhu jsou dány  $I_o$ ,  $E_o$ , a  $L_p$  a je třeba určit hodnoty  $R_s$  a  $C_s$ , jež dávají přijatelné špičkové napětí ( $E_1$ ). Obr. 5 ukazuje vztah mezi  $E_1/E_o$  a  $\zeta$  pro různé hodnoty  $\chi$ . Klíčový bod, který tento graf tvoří, je, že pro daný  $\chi$  ( $\chi$  a  $1/C_s$ ) existuje optimální hodnota  $\zeta$  ( $\zeta$  a  $R_s$ ), která dává nejnižší špičkové napětí. Druhý důležitý bod je, že nejnižší dosažitelná hodnota špičkového napětí je určena velikostí  $C_s$ . Pokud je požadováno nižší špičkové napětí, musí být použit větší  $C_s$ . To znamená, že se musí zvětšit ztrátový výkon.

Návrh optimalizovaného snubberu je velmi snadný s použitím grafu na obr. 6. Proces návrhu obsahuje následující kroky:

1. Určení  $I_o$ ,  $E_o$ , a  $L_p$
2. Volba maximálního špičkového napětí  $E_1$
3. Výpočet  $E_1/E_o$
4. Určení hodnot  $\chi$  a  $\zeta$  z grafu
5. Výpočet  $R_s$  a  $C_s$  z hodnot  $\chi$  a  $\zeta$



Obr. 5



Obr. 6

Zde je reálný příklad. Jestliže  $I_0 = 5\text{A}$ ,  $E_0 = 300\text{V}$ ,  $L_p = 1\mu\text{H}$  a  $E_1 = 400\text{V}$ , potom  $E_1/E_0 = 1,33$ . Čárkovaná čára a šipky na obr. 6 ukazují  $\chi_0 = 0,65$  a  $\zeta_0 = 0,8$ . Z těchto údajů můžeme určit  $C_s$  a  $R_s$ :

$$C_s = (I_0/E_0)^2 (L_p/\chi_0^2) = 657\text{pF}$$



$$R_s = 2\zeta_0 \sqrt{L_p/C_s} = 614\Omega$$

Použijeme standardní slídový kondenzátor  $C_s = 680\text{pF}$  a standardní rezistor  $R_s = 620\Omega$ .

Grafy na obr. 5 a 6 neberou v úvahu efekt spínací kapacity nebo konečné doby přechodu. Obecně, optimální hodnota  $R_s$  bude poněkud nižší než vypočítaná. Přesnější určení optimální hodnoty lze dosáhnout simulací pomocí SPICE. Začneme s vypočítanou hodnotou  $R_s$  a měníme jeho hodnotu, abychom našli optimum. Obecně, optimální hodnota bude poměrně široká umožňující použít standardní odpory s přesností 5%.

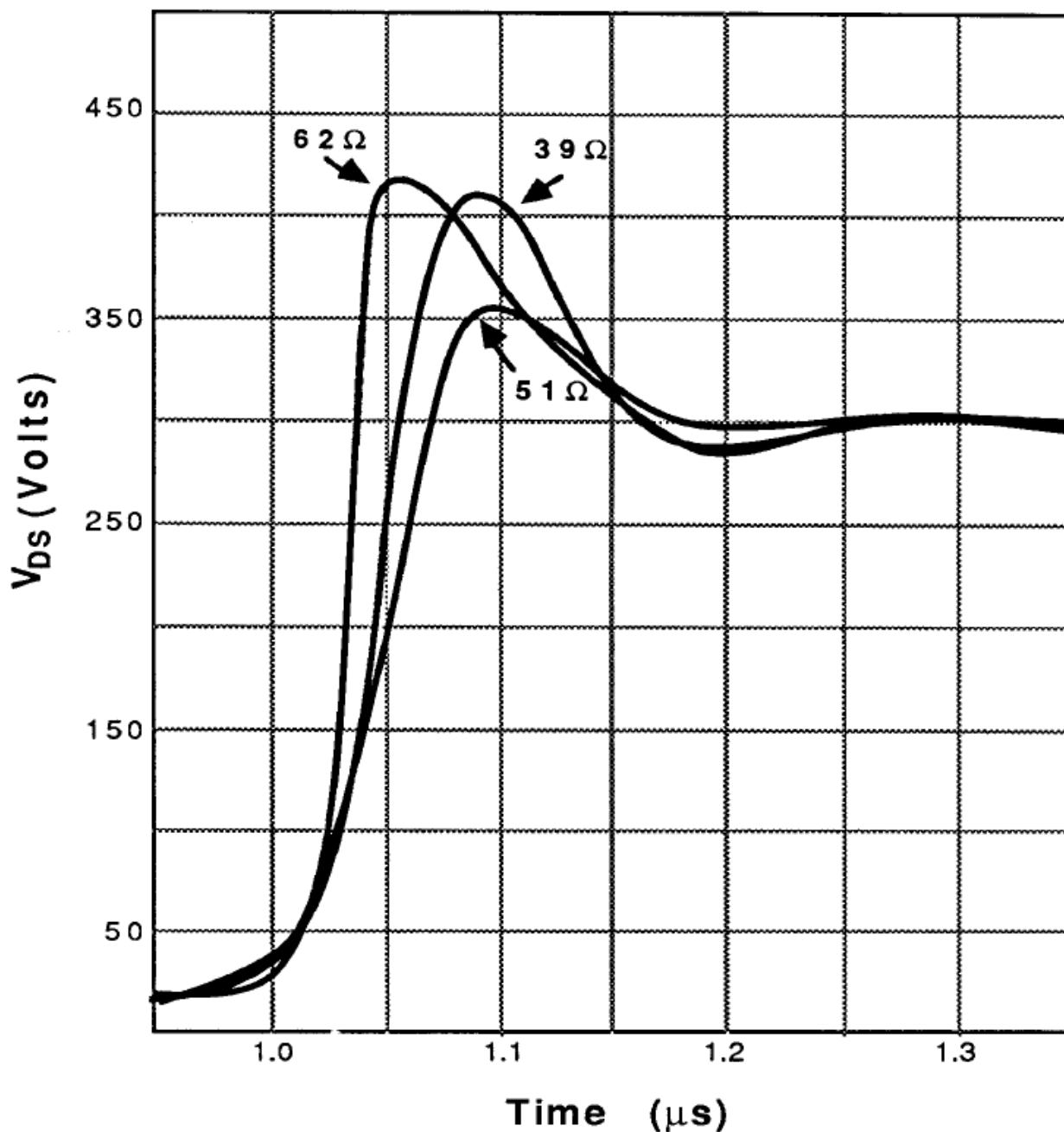
Příklad optimalizace  $R_s$ , použijeme-li jako spínač IRF840, ukazuje obr. 7. Optimální hodnota  $R_s = 51\Omega$  a  $E1 = 363\text{V}$ . Pro  $R_s = 39$  a  $62\Omega$  je  $E1$  vyšší. Výsledné špičkové napětí je menší než  $400\text{V}$ , z důvodu paralelní kapacity spínače. Pokud je dovoleno, aby  $E1$  vzrostlo na  $400\text{V}$ , potom může být použita menší hodnota  $C_s$ , čímž se ušetří část ztracené energie.

Tento příklad ukazuje důležitost simulace a optimalizace obvodu snubberu s použitím reálných součástek. Graf vám umožní najít přibližné hodnoty a simulací provedete optimalizaci.

#### Určení parazitní indukčnosti $L_p$ :

$E_o$  a  $I_o$  vycházejí přímo z obvodu. Hodnota  $E1$  je rozhodující požadavek a bude záviset na napěťové odolnosti spínače a činiteli odlehčení napětí. Konstruktor musí zvolit přijatelné špičkové napětí. Všechny tyto veličiny jsou zcela zřejmé. Avšak  $L_p$  je charakteristika specifického obvodu plošného spoje a obvykle není snadné ji vypočítat.  $L_p$  může být určena z obvodu měřením periody ( $T_1$ ) parazitních kmitů, potom přidáním známého kondenzátoru ( $C_{\text{test}}$ ) paralelně ke spínači a nakonec dalším změřením periody ( $T_2$ ) kmitů.  $L_p$  potom můžeme vypočítat pomocí vzorce:

$$L_p = (T_2^2 - T_1^2)/(4\pi^2 C_{\text{test}})$$



Obr. 7

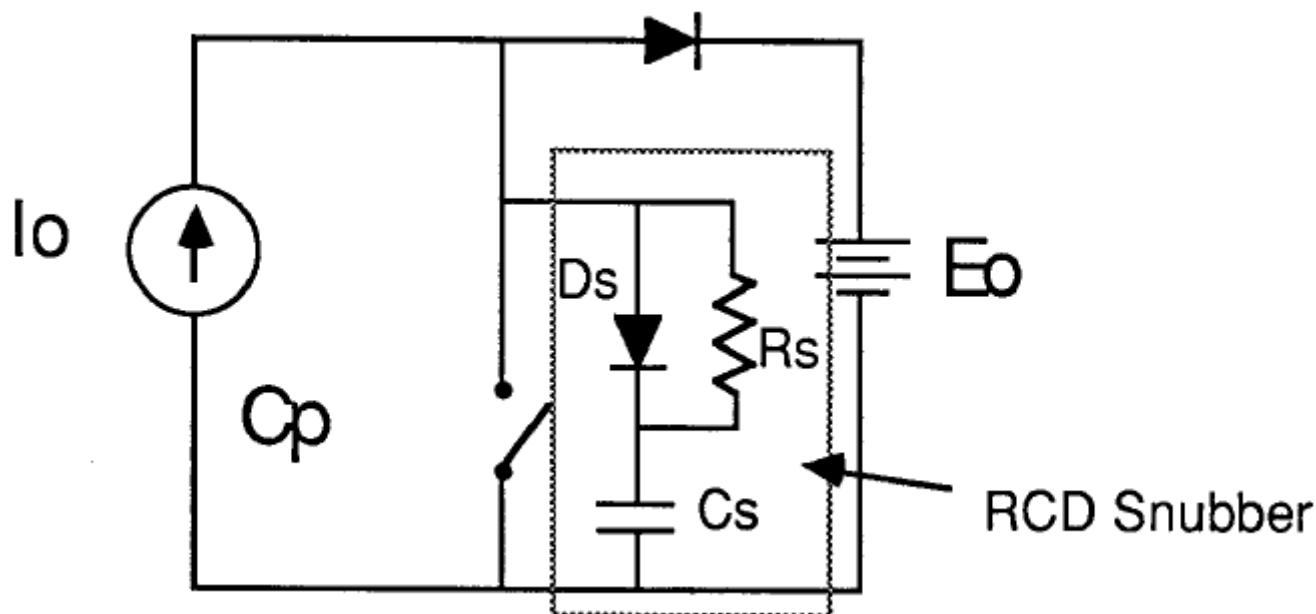
Hodnotu  $C_{\text{test}}$  obvykle volíme jako dvojnásobek kapacity spínače

Alternativní metodou určení  $L_p$  v obvodu o větším výkonu je využití vzrůstu napětí ( $V_{\text{step}}$ ), které se objeví mezi kolektorem a emitorem nebo drainem a sourcem tranzistorového spínače díky změně  $di/dt$  proudu, který teče indukčností  $L_p$  při vypnutí:

$$L = V_{\text{step}} / (di/dt)$$

Při sepnutí je  $C_s$  nabit. To znamená, že ve spínači bude proudová špička vlivem nabíjení  $C_s$  přes  $R_s$ , která bude přičtena k normálnímu proudu. Je to krátký přechodový impulz, který rychle odezní, ale může dodat podstatný zapínací proud a měl by být brán v úvahu. Měli bychom poznamenat, že RCD snubber, popsany dále v textu, bude také mít tento proud při zapnutí, ale může být snáze řízen, protože hodnota  $R_s$  nemusí být optimalizována pro maximální tlumení.

RC snubbery jsou velmi užitečné pro aplikace s malými a středními výkony, ale když úroveň výkonu překročí několik set Wattů, ztráty ve snubberu mohou být vysoké a je třeba uvažovat o jiném typu snubberu. RC snubber má místo v aplikacích o vysokém výkonu jako sekundární tlumicí síť pro potlačení vf kmitů, které nemají mnoho energie.



Obr. 8

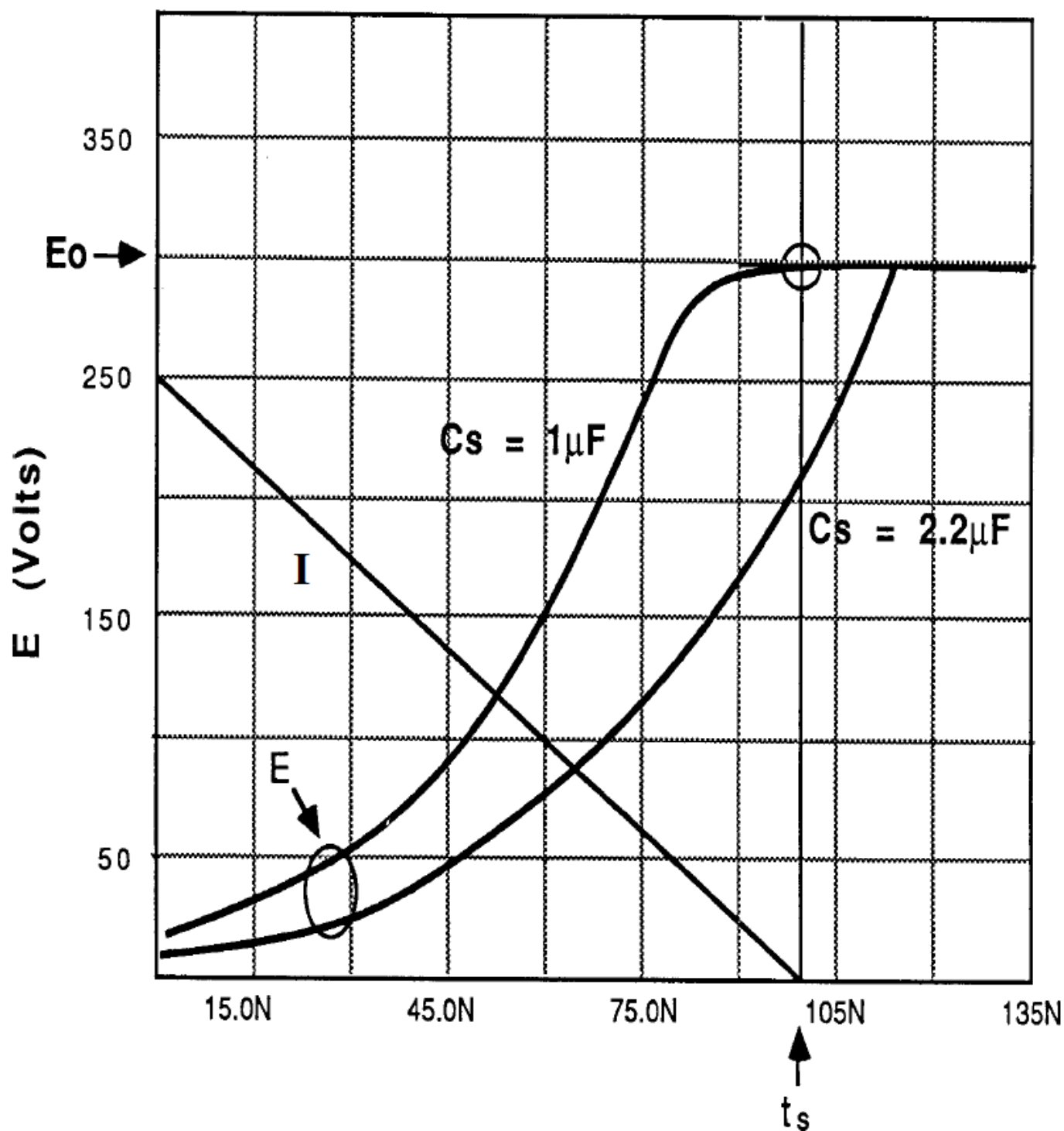
### Návrh RCD snubberu

RCD snubber zobrazený na obr. 8 má proti RC snubberu několik výhod:

- Vedle omezení špičkového napětí může omezit celkové ztráty v obvodu, jak spínací, tak ztráty ve snubberu.
- Může být dosaženo mnohem lepší zátěžové křivky.
- Pro danou hodnotu  $C_s$  budou celkové ztráty menší.
- Parazitní kapacita spínače ( $C_p$ ) je užitečná součást snubberu.

Je zde však jedna nevýhoda. Protože je paralelně k  $R_s$  zapojena dioda, efektivní hodnota  $R_s$  je během nabíjení  $C_s$  v podstatě nula. Toto není optimální hodnota a pro daný  $C_s$  bude  $E_1$  vyšší, než by byla v optimalizovaném RC snubberu.

Typické vypínací křivky pro tento snubber jsou zobrazeny na obr. 9. Tyto křivky předpokládají, že  $L_p = 0$ . Účinek  $L_p$  bude brán v úvahu za chvíli. Klíčovou vlastností těchto křivek je, že spínané napětí pomalu stoupá, jak spínaný proud klesá. To znamená, že vysoký špičkový výkon spojený se současným maximálním napětím a proudem je eliminován. Čistý výsledek je mnohem menší špičkové napětí a spínací ztráty. Na obrázku jsou zobrazeny křivky pro dvě různé hodnoty  $C_s$ . V tomto příkladu  $I_o = 10A$  a  $E_o = 300V$ . Když je kapacita  $C_s$  zvolena větší, špičkový výkon a spínací ztráty jsou nižší. Avšak větší  $C_s$  znamená větší ztráty v  $R_s$ , když je spínač vypínán a  $C_s$  je vybíjen přes  $R_s$  a spínač. Opět vidíme nutnost nalézt kompromis mezi účinností snubberu a ztrátami.



Obr. 9

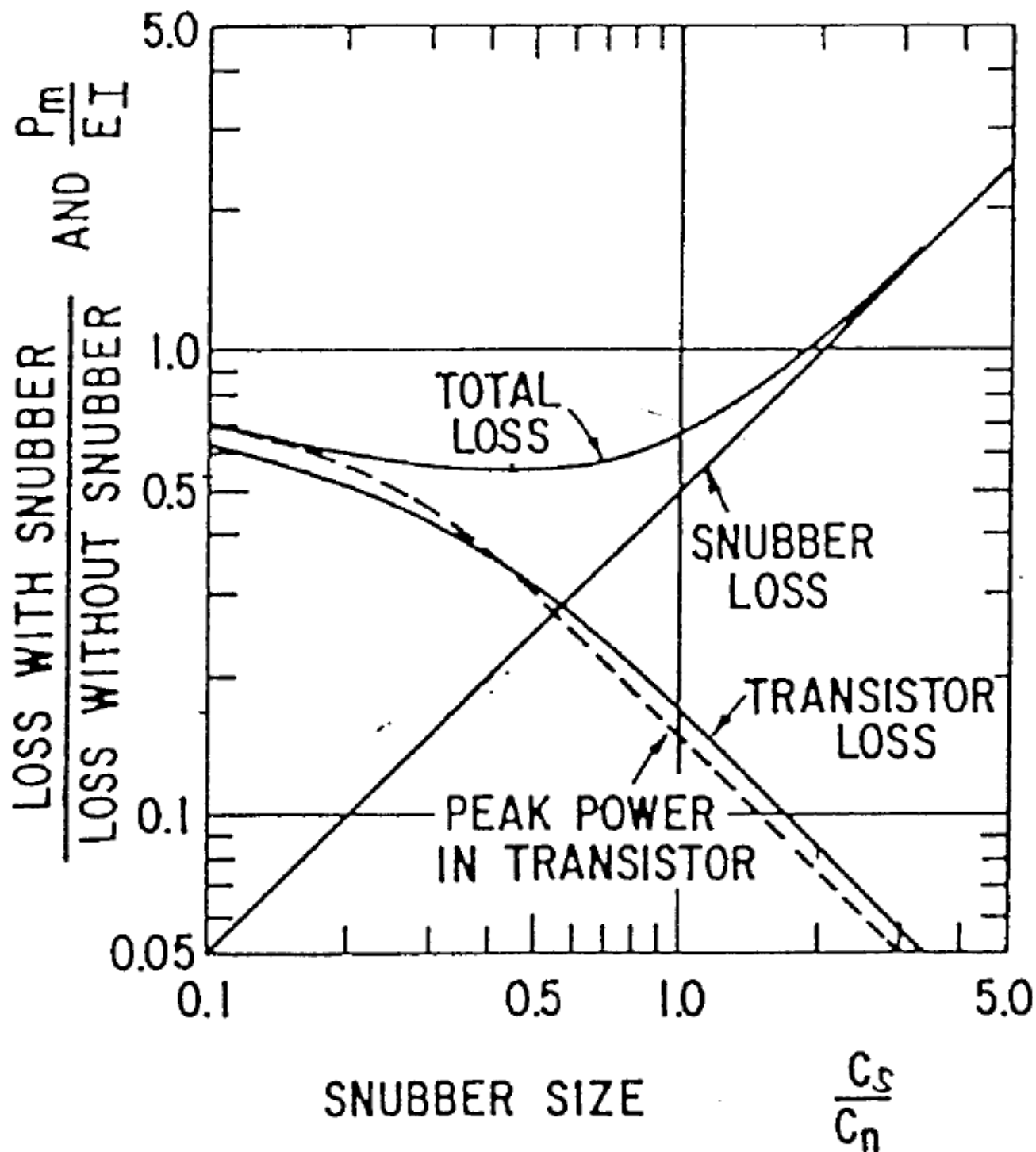
V závislosti na velikosti  $C_s$  spínané napětí může dosáhnout hodnoty  $E_o$  před, současně s nebo poté, spínaný proud dosáhne nuly. Příklad, kde  $E = E_o$  v okamžiku, kdy  $I = 0$ , je definován jako “normální” snubber a  $C_s = C_n$ , kde

$$C_n = I_o T_s / (2E_o)$$

kde  $T_s$  je vypínací doba proudu spínače (viz obr. 9, kde je  $C_n = 1,667 \text{ nF}$ ).

Vztah mezi  $C_n$ , spínacími ztrátami, špičkovou zátěží spínače, ztrátami ve snubberu a celkovými ztrátami je zobrazen na obr. 10. Když je použit malý snubber ( $C_s < C_n$ ), spínací ztráty rychle stoupají. Například pro  $C_s$

$= C_n$ , spínací ztráty klesnou na 16%. Volba větší kapacity  $C_s$  zmenší spínací ztráty jen málo, ale podstatně stoupnou ztráty ve snubberu. Minimální celkové ztráty jsou kolem hodnoty  $C_s = 0,45C_n$ , kde celkové ztráty klesnou na 53% ztrát bez snubberu. Důležité je mít na paměti, že  $C_p$  je součástí  $C_s$  a že skutečná hodnota  $C_s = 0,45C_n - C_p$ . Pro  $C_s / C_n = 2$  jsou celkové ztráty stejně velké jako bez použití snubberu, avšak spínač bude mnohem méně namáhán.



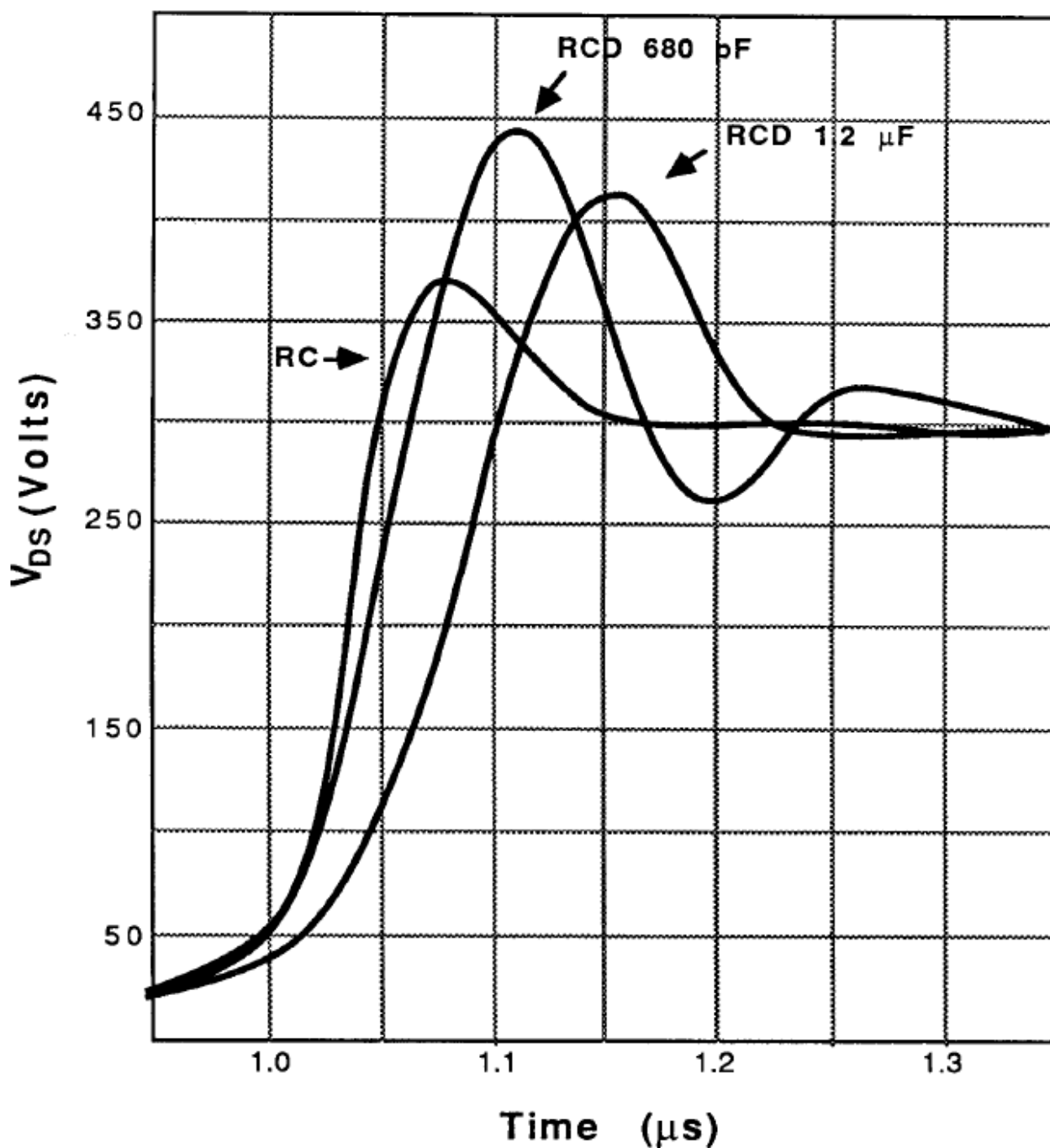
Obr. 10

V těch případech, kde je primárním zájmem redukovat celkové spínací ztráty, hodnota  $C_s$  se obvykle nastaví na  $0,5C_n$ . V tomto případě se zvolí taková hodnota  $R_s$ , aby napětí na  $C_s$  kleslo na minimum za minimální

spínací dobu ( $t_{on,min}$ ). Pokles napětí na kondenzátoru je jednoduše exponenciální a za dvě časové konstanty ( $\tau = R_s C_s$ ) klesne na hodnotu  $0,14E_0$ . Toto je obvykle dostatečné. Hodnota  $R_s$  potom je:

$$R_s = 2 / (t_{on,min} \cdot C_s)$$

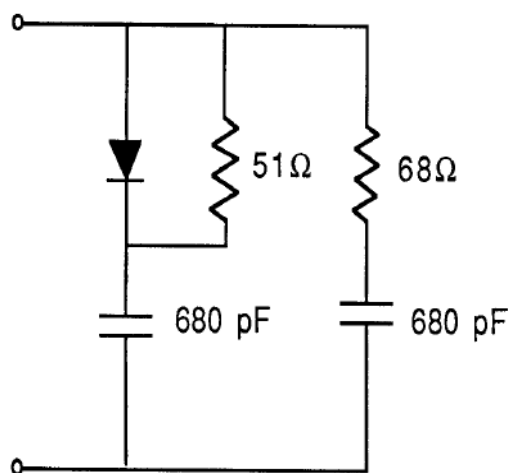
Když je velikost  $L_p$  významná, po vypnutí vyletí napětí. Když musí být řízeno  $E_1$ , potom mohou být nutné různé hodnoty  $C_s$  a je třeba udělat kompromis. Obr. 11 uvádí porovnání mezi výše popsáním RC snubberem a RCD snubberem se stejnými hodnotami ( $R_s = 51\Omega$  a  $C_s = 680\text{pF}$ ). Všimněte si, že ztráty budou nižší, ale špičkové napětí je u RCD snubberu vyšší. To je typické. Pro podobnou celkovou ztrátu může být  $C_s$  ve snubberu RCD větší, což omezí  $E_1$ . Zvýšení  $C_s$  na  $1,2\text{nF}$  sníží  $E_1$  na  $424\text{V}$ .  $C_s$  může být dále zvětšen, ale pro stejné celkové ztráty,  $E_1$  bude přesto v RCD snubberu vyšší.



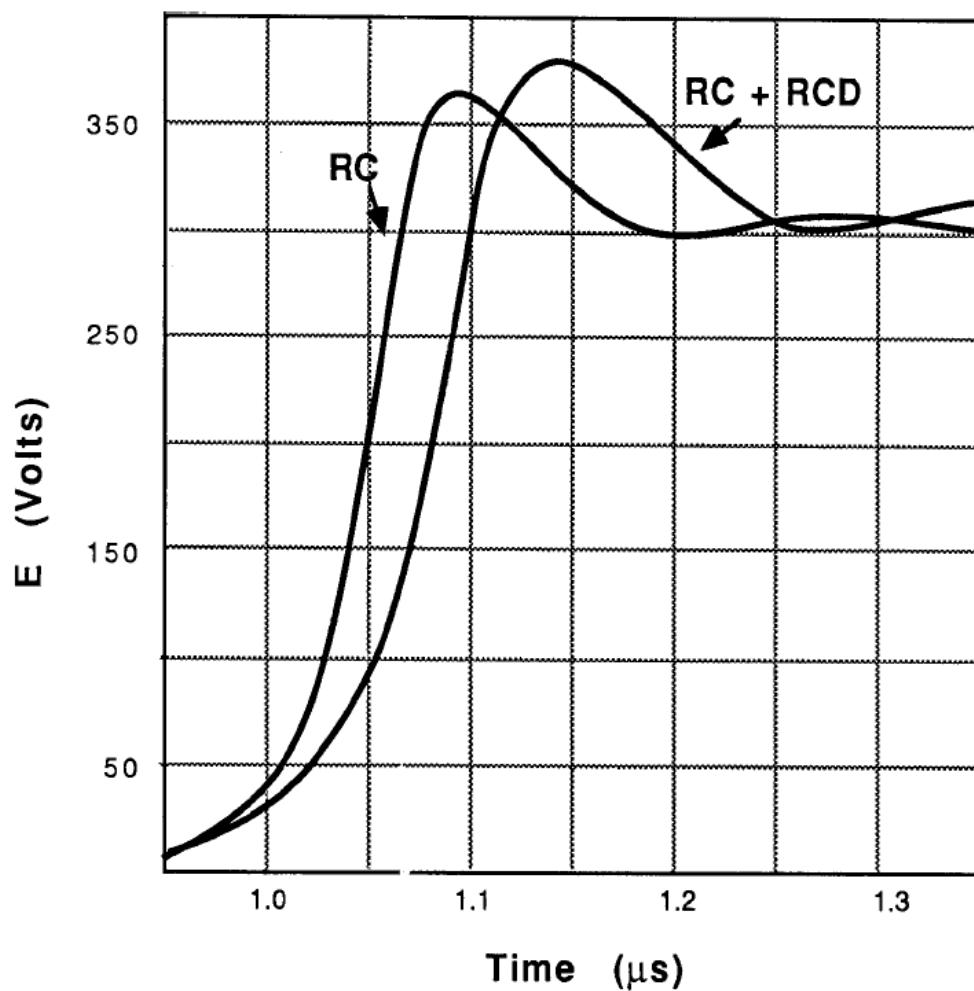
Obr. 11

Kombinovaný snubber:

Když je důležité minimalizovat ztráty ve spínači a zároveň omezit  $E_1$ , kombinovaný snubber, který obsahuje obvod RC a RCD, může přinést velmi dobré výsledky s nízkými ztrátami. Příklad takového kombinovaného snubberu najdete na obr. 12 a výsledná křivka je porovnána s předchozím RC snubberem za stejných podmínek v obvodu na obr. 13.



Obr. 12



Obr. 13

## Výběr součástek a návrh plošného spoje

Součástky ve snubberech mohou být velmi namáhány, a proto musí být pečlivě vybrány.

### Indukčnost plošného spoje

Jedním z prvořadých důvodů pro požívání snubberů je přítomnost parazitních indukčností ( $L_p$ ) v obvodu, což generuje napěťové špičky a zákmity, když je obvod vybuzen činností spínače. Větší parazitní indukčnost znamená větší součástky ve snubberu a větší ztráty. Dříve než začnete navrhovat snubber, je důležité minimalizovat parazitní indukčnosti a kvalitní návrh plošného spoje je základ. S rostoucími úrovněmi výkonu se to stává důležitější, protože roste  $di/dt$ .

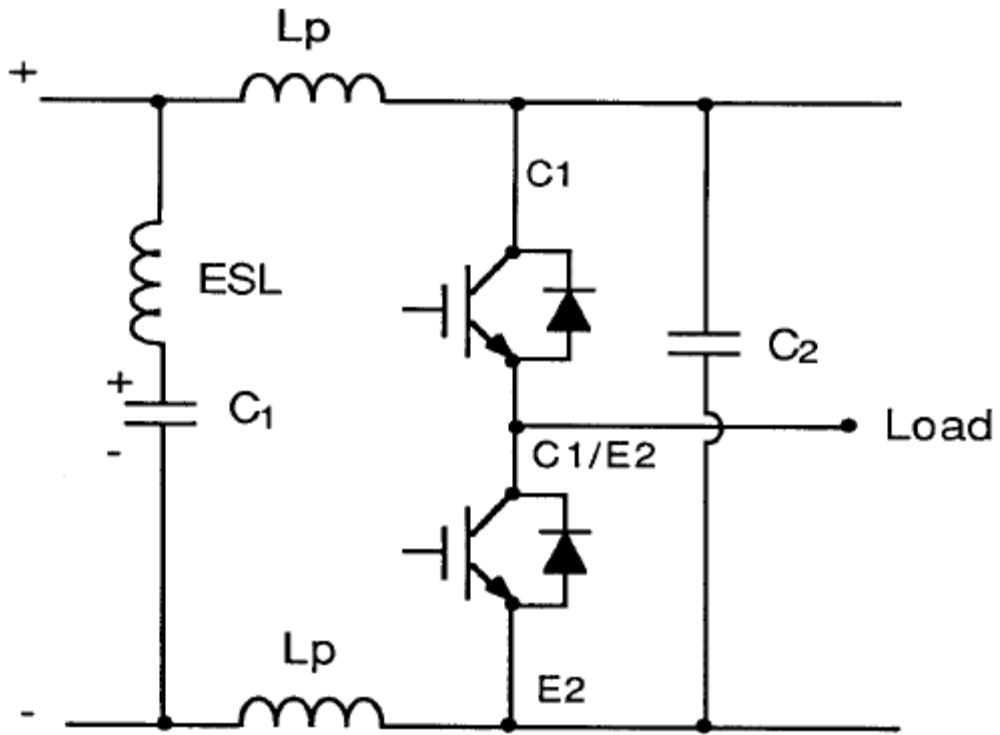
Obr. 14a ukazuje typickou část invertoru – spínací pólůstek. Sběrnice, která propojuje zdroj ( $V_{dc}$ ) s kladným a záporným pólem pólůstku, bude mít nějakou vlastní indukčnost jak ve struktuře sběrnice, tak v kondenzátorech ( $C_1$ , ESL). Účinky parazitní indukčnosti  $L_p$  mohou být velmi omezeny rozmístěním menších kondenzátorů s nízkou ESL (ekvivalentní sériová indukčnost) co nejbližší ke spínačům. Jednou z možností je použít tlumicí kondenzátorové moduly CDE, které jsou přímo připojeny k IGBT modulu, jak ukazuje obr. 15. Tyto moduly jsou dostupné buď jako jednoduché kondenzátory nebo mohou obsahovat jednu nebo několik diod pro realizaci RCD snubberu.

V některých případech přidání samotného kondenzátoru  $C_2$  nemusí být úplnou odpovědí, protože napětí sběrnice může kmitat vlivem rezonance  $L_p$ ,  $C_1$  a  $C_2$ . Alternativou je použít RCD snubber pro utlumení těchto kmitů, jak ukazuje obr. 14b. Střední hodnota napětí na  $C_2$  se bude rovnat napětí sběrnice. Při vypnutí spínače napětí na  $C_2$  díky parazitní indukčnosti vzroste, ale později se utlumí díky snubberu na hodnotu napětí sběrnice. Další výhodou tohoto přístupu je, že  $L_p$  funguje jako zapínací tlumič, který omezuje spínací ztráty při zapnutí.

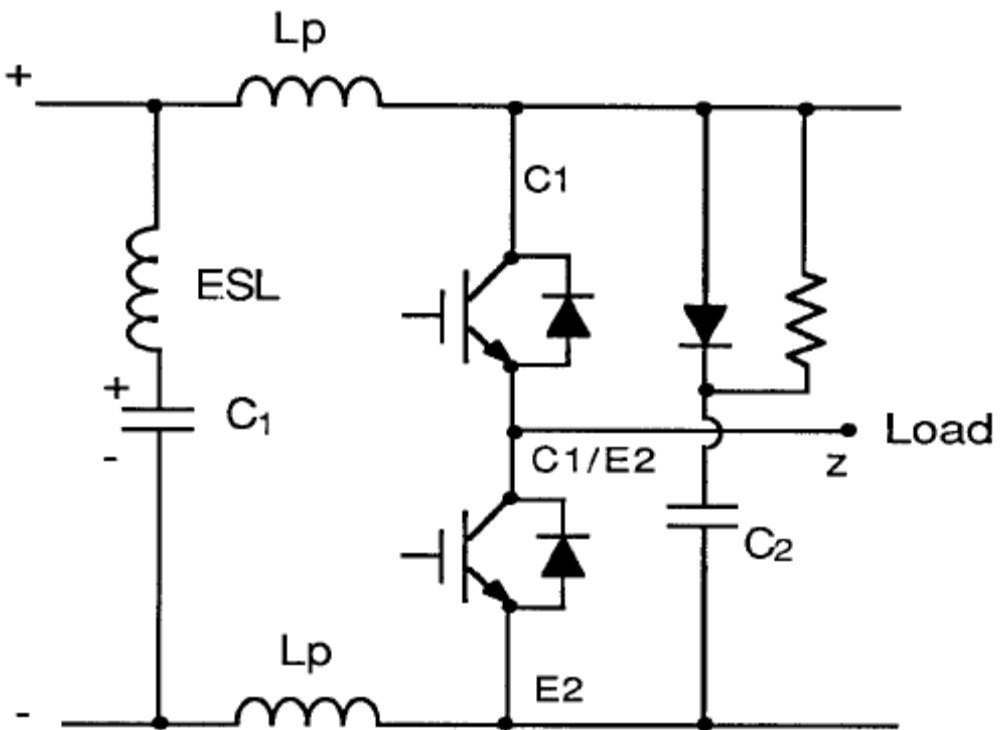
Z důvodu velké derivace proudu  $di/dt$ , která se vyskytuje ve snubberu, malá parazitní indukčnost uvnitř snubberu může rušit činnost snubberu, vedoucí k větším špičkám napětí, než se očekávalo. Parazitní indukčnost přichází ze dvou zdrojů: z vnitřní indukčnosti součástek díky jejich rozměrům a z plošného spoje. Indukčnost součástek může být minimalizována volbou pouzdra (například radiální versus axiální) a může být dále omezena použitím několika menších součástek zapojených paralelně. Paralelní zapojení je obzvláště užitečné u snubberů s velkým výkonem, protože vedle snížení indukčnosti může zlepšit poměr plocha-objem, což umožňuje lepší chlazení a vyšší efektivní hodnoty proudu.

Prvořadým zdrojem indukčnosti plošného spoje je připojení součástek snubberu ke spínači. Součástky snubberu by měly být umístěny co nejbližší k vývodům spínače. Součástky by měly být uspořádány tak, aby proudová smyčka, vytvořená snubberem, měla co nejmenší plochu (zmenší se indukčnost). Velmi dobrým příkladem jsou moduly snubberu CDE zobrazené na obr. 15. Tyto modulární snubbery jsou připojeny přímo na vývody spínače, takže indukčnost přívodů je malá.





(a)



(b)



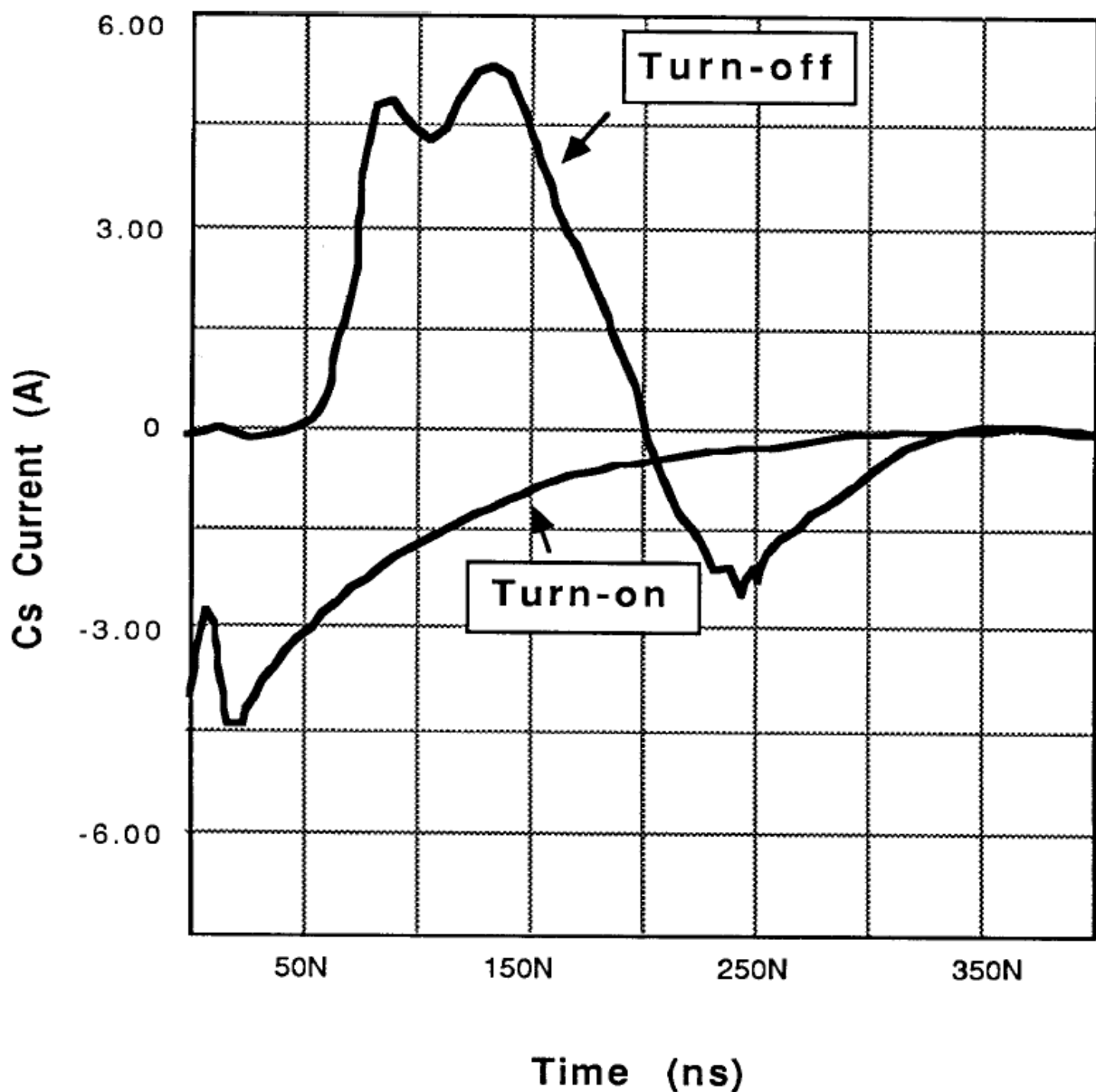
Obr. 15

#### Volba kondenzátoru:

Kondenzátor snubberu je namáhaný vysokými amplitudami a efektivními hodnotami proudů a rychlými změnami napětí  $du/dt$ . Příklad proudových špiček při zapnutí a při vypnutí v kondenzátoru typického RCD snubberu najdete na obr. 16. Pulzy mají vysoké špičky a velké efektivní hodnoty. V CDE bývá použito několik druhů kondenzátorů, které se obzvláště hodí pro snubbery. Tabulka 1 ukazuje různé typy a charakteristiky kondenzátorů vhodných pro použití ve snubberech.

| STYLE                                   | PACKAGE                              | DIELECTRIC    | ELECTRODE                         | VOLTS RANGE  | CAP RANGE     | dV/dt            | I <sub>rms</sub> |
|---|--------------------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------|---------------|------------------|------------------|
| CD16<br>CDV16<br>CDV19<br>CD30<br>CDV30 | Dipped<br>with radial<br>leads       | Mica          | Foil                              | 500-1500 VDC | 100-10,000 pF | >10,000 V/μs     | Up to 9 A        |
| WPP                                     | Wrap & Fill<br>axial leads           | Polypropylene | Foil                              | 250-1000 VDC | 0.001-2.0 μF  | 300-10,000 V/μs  | Up to 10 A       |
| DPF<br>DPP                              | Wrap & Fill<br>axial leads           | Polypropylene | Foil                              | 250-2000 VDC | 0.01-0.47 μF  | 3000-10,000 V/μs | Up to 10 A       |
| SCD                                     | Box type,<br>direct mount<br>to IGBT | Polypropylene | Double<br>Metallized              | 600-2000 VDC | 0.1-10 μF     | 100-2000 V/μs    | Up to 50 A       |
| 940<br>941                              | Wrap & Fill<br>axial leads           | Polypropylene | Double<br>Metallized              | 600-3000 VDC | 0.1-4.7 μF    | 100-2000 V/μs    | Up to 25 A       |
| 942<br>943                              | Wrap & Fill<br>axial leads           | Polypropylene | Hybrid-<br>metallized PP/<br>Foil | 600-2000 VDC | 0.1-4.7 μF    | 500-5000 V/μs    | Up to 25 A       |

Tabulka 1



Obr. 16

Volba rezistoru:

Jak bylo zmíněno dříve, je důležité, aby  $R_s$  v RC snubberu měl malou vlastní indukčnost. Indukčnost rezistoru  $R_s$  zvyšuje špičkové napětí ( $E_1$ ) a má tendenci mařit účel snubberu. Nízká indukčnost u  $R_s$  je žádoucí také u RCD snubberu, ale ne tak kriticky, protože účinkem malé indukčnosti je mírné zvýšení vybíjecí doby  $C_s$  a poněkud omezuje špičkový proud při sepnutí spínače. Běžná volba  $R_s$  je obvykle uhlíková sloučenina nebo kovový film. Pro vyšší úroveň výkonu mohou být s jistou opatrností použity drátové odpory s nízkou indukčností.

Volba diody:

Dioda v RCD snubberu by měla být dimenzovaná minimálně pro napětí, které se objevuje na  $C_s$ . Obecně lze říci, že průměrný proud v diodě je poměrně malý, ale jsou velké proudové špičky. Špičkový proud by měl být základem pro výběr diody. Reverzní doba zotavení ( $t_{rr}$ ) může ovlivnit činnost snubberu, běžně se používají

ultrarychlé diody s  $t_{tr} < 100\text{ns}$ . Funkce diody v obvodu by se měla ověřit, abychom se ujistili, že snubber pracuje tak, jak jsme očekávali.

S rostoucím napětím na diodě a volbou diod s krátkou dobou zotavení může být brána v úvahu doba zotavení v propustném směru ( $t_{tr}$ ). Je to z toho důvodu, že počáteční úbytek napětí na diodě v propustném směru může být mnohem vyšší než jeho hodnota při ustáleném stavu po uplynutí několika set nsec. Tento problém je zhoršen velmi rychlou změnou proudu  $di/dt$ , což je pro průběh proudu ve snubberu typické. Do té doby, než se dioda úplně otevře, proudový impuls snubberu může již zaniknout. Může být nutné vyzkoušet několik typů diod, než dostaneme uspokojivý výsledek.

## Snubbery pro IGBT inventory

IGBT (bipolární tranzistory s izolovaným hradlem) se stále více používají jako spínací prvky v invertorech, používaných ve výkonové elektronice. IGBT nahrazují MOSFETy v aplikacích, kde se spínají vysoká napětí, protože mají menší odpor v sepnutém stavu a menší oblast smrti při stejném výkonu. Menší oblast smrti se promítá do nižší ceny a menší vstupní kapacity. Většina IGBT modulů se používá v tvrdých spínacích aplikacích do 20kHz. Při vyšších frekvencích jsou ztráty v IGBT velmi významné.

Spínání tak vysokých proudů v krátkém čase způsobuje vzrůst špičkových napětí tak, že mohou překročit jmenovité hodnoty IGBT zvláště tehdy, když se napájecí napětí blíží jmenovitému napětí IGBT. Velikost přechodového napětí  $U_{tr}$  je dána vztahem

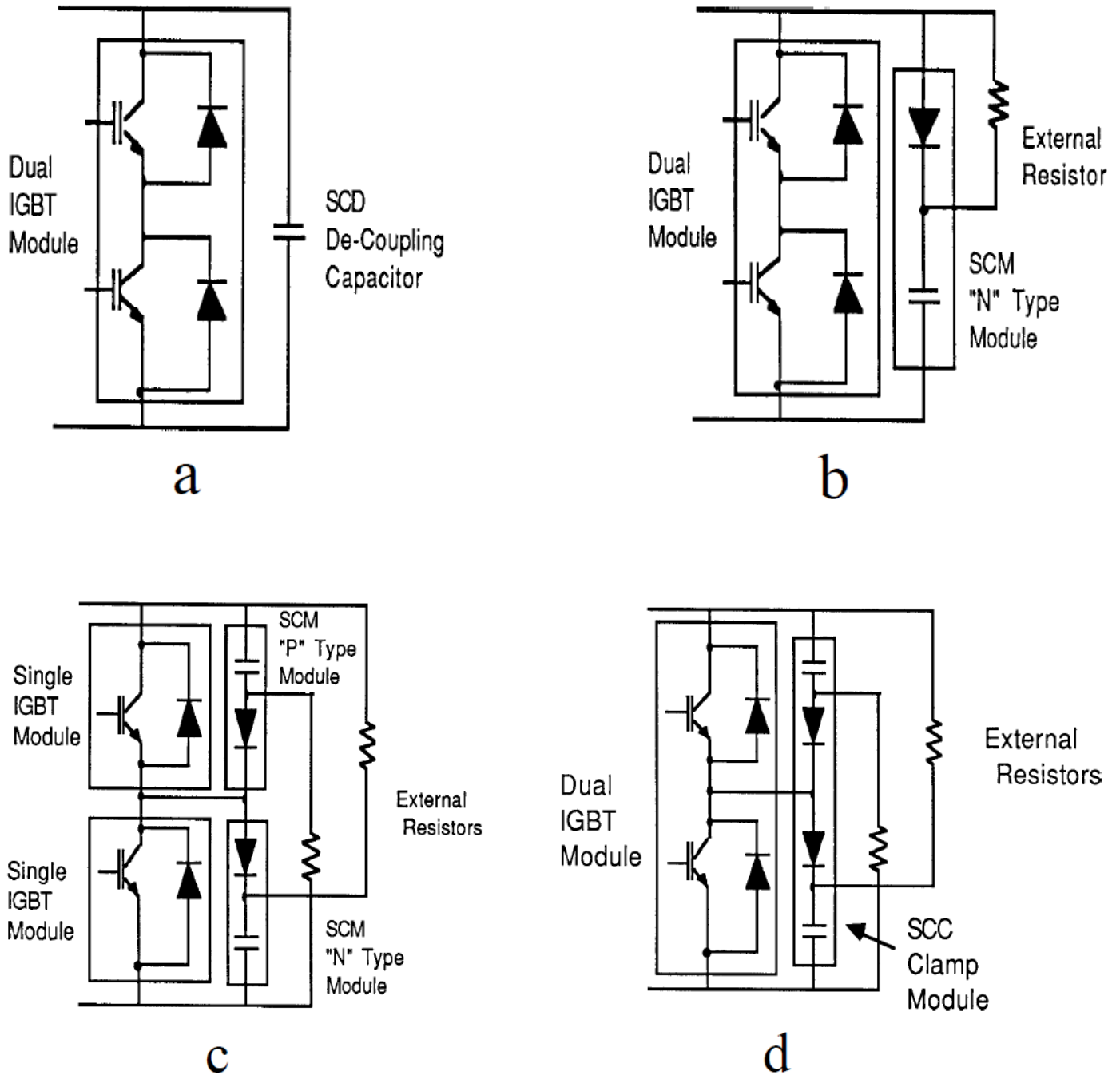
$$U_{tr} = Ls \cdot di/dt$$

kde  $Ls$  je indukčnost „DC smyčky“,  $di/dt$  je rychlost změny proudu s časem.

Konstrukteři jsou vyzýváni, aby minimalizovali indukčnost „DC smyčky“. Použití vrstvených sběrnic a optimální vedení plošných spojů jsou způsoby, jak významně snížit indukčnost sběrnice; přesto je parazitní indukčnost stále přítomna. Snubbery jsou proto nutné k ochraně spínačů před přechodovými napětími, která vznikají díky rychlým změnám proudu a parazitní indukčnosti. Kromě ochranné funkce mohou snubbery být použity pro:

- Omezení  $di/dt$  nebo  $du/dt$ .
- Modelovat vedení k zátěži, aby bylo udrženo v bezpečné pracovní oblasti (SOA, safe operating area).
- Přenášet ztrát ze spínače na rezistor.
- Omezit celkové spínací ztráty.
- Omezit napěťové a proudové zákmity.

Existují tři základní typy obvodů snubberu používané v aplikacích s IGBT. Použití konkrétního typu závisí převážně na úrovni výkonu, spínací frekvenci a plošném spoji. Obr. 17 ukazuje tyto obvody snubberů a jak jsou aplikovány ve spínacích uspořádaných do půlmůstku.



Obr. 17

Oddělení (decoupling) je nejjednodušší ze tří způsobů. Jedná se v podstatě o kondenzátor s nízkou indukčností připojený paralelně ke sběrnici, od vývodu C k E na dvojitém IGBT modulu, nebo od P k N na bloku se šesti spínači. Oddělení je účinné při omezování přechodných jevů poskytnutím cesty s nízkou indukčností během spínání. Oddělovací kondenzátory se používají v aplikacích s malým nebo středně velkým proudem. Při vyšších proudech mohou oscilace mezi zdrojem a oddělovacím kondenzátorem vytvářet proudové špičky, které mohou kondenzátor zničit.

Cornell Dubilier nabízí typy 940, 941 a SCD (přímá montáž) kondenzátorů pro oddělovací aplikace. Kondenzátory ze série 940 mají axiální vývody a mohou být montovány na PCB, zatímco SCD se montují přímo na IGBT modul. Typy s přímou montáží mají nižší indukčnost díky ploché geometrii s radiálními vývody. Instalují se snadno pomocí vlastních šroubů IGBT modulu. Přímě montované kondenzátory jsou dimenzovány pro vyšší proudy, protože těžká měděná oka jsou spojena přímo s kondenzátorem.

Hodnota kapacity potřebné pro aplikaci s oddělením závisí na parazitní indukčnosti, maximálním spínacím proudem, dovoleném špičkovém napětí a stejnosměrném napětí sběrnice. Kapacita snubberu může být určena následovně: <sup>16</sup>

$$C_s = L_s \cdot I_o^2 / (V_{pk} - V_{cc})$$

Potíž s aplikací tohoto vzorce je ta, že indukčnost sběrnice je často obtížné určit. Výše v tomto dokumentu jsou posány metody, jak tuto indukčnost určit. Dobrým přibližným pravidlem je použít 1  $\mu$ F na 100A IGBT, pokud indukčnost nemůžeme určit přímo.

RCD snubbery se typicky používají pro aplikace se středně velkými a vysokými proudy. Přímou montované snubbery, obsahující hyperrychlé, soft recovery diody poskytuje Cornell Dubilier. Snubbery typu SCM mohou být použity k ochraně dvojitých IGBT modulů, připojují se mezi vývody C a E IGBT. Viz obr. 17b. Tento snubber pracuje na stejném principu jako oddělovací kondenzátor, ale pouze během vypínání. Když je IGBT vypínán, energie uvězněná ve smyčce indukčnosti se přesune do kondenzátoru. Dioda blokuje oscilace a přebytek náboje je zmařen ve vnějším rezistoru.

V aplikacích s vyššími proudy, kde invertor je tvořen dvěma jednoduchými IGBT moduly typu P a N, mohou být aplikovány SCM snubbery pro potlačení napětí invertoru, jak ukazuje obr. 17c. Dvojité IGBT moduly mohou být také chráněny modulem typu SCC, jak ukazuje obr. 17d. Při vypnutí se dioda snubberu otevře a snubber je aktivován. Energie uvězněná v parazitní indukčnosti je absorbována kondenzátorem snubberu. Během sepnutí spínače kondenzátory snubberu, které jsou plně nabity na napětí sběrnice mají otevřeno vybíjecí cestu přes otevřenou free-wheel diodu, IGBT a rezistor snubberu. Toto omezuje reverzní přechodové napětí.

Jak se neustále zvyšuje potřeba vysoce výkonných snubberů, zvyšuje se i potřeba informací, týkajících se správné volby součástek. Tato práce se zabývala hlavními typy snubberů, jejich použitím a metodami určení hodnot součástek. Použití těchto metod by mělo vést ke správné volbě komponent a hlavně k dobrému návrhu snubberu.

Zdroj: [http://www.ee.bgu.ac.il/~pel/links/DESIGN\\_OF\\_SNUBBERS\\_FOR\\_POWER\\_CIRCUITS.pdf](http://www.ee.bgu.ac.il/~pel/links/DESIGN_OF_SNUBBERS_FOR_POWER_CIRCUITS.pdf)

Poznámka překladatele: V odkazu na původní dokument výše zájemce najde seznam literatury použité autorem.

Překlad: Ing. Ladislav Kopecký