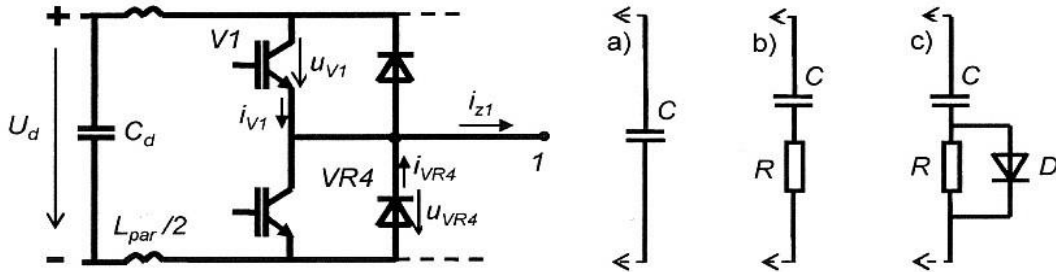
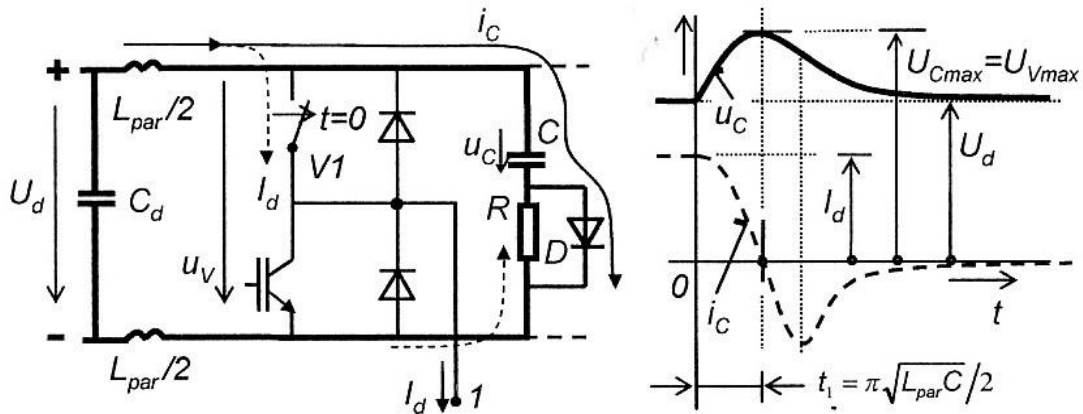


Přepět'ová ochrana tranzistoru

I když spínáme čistě odporovou zátěž, vznikají na kolektoru (u MOSFETu drainu) spínacího tranzistoru zákmity, které mohou mít vysokou amplitudu, jež může tranzistor zničit. Měli bychom tedy tranzistor nějakým způsobem chránit. Ochrany rozdělujeme na pasivní a aktivní. Příklady pasivních ochran najdete na obr. 1.



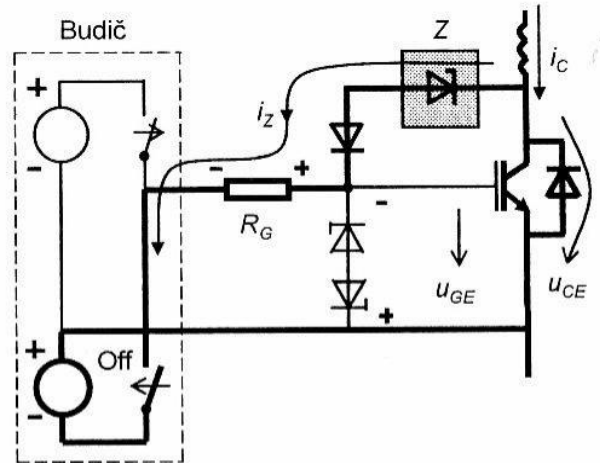
Obr. 1: Příklady pasivních ochran



Obr. 2: Aplikace pasivní ochrany typu RCD

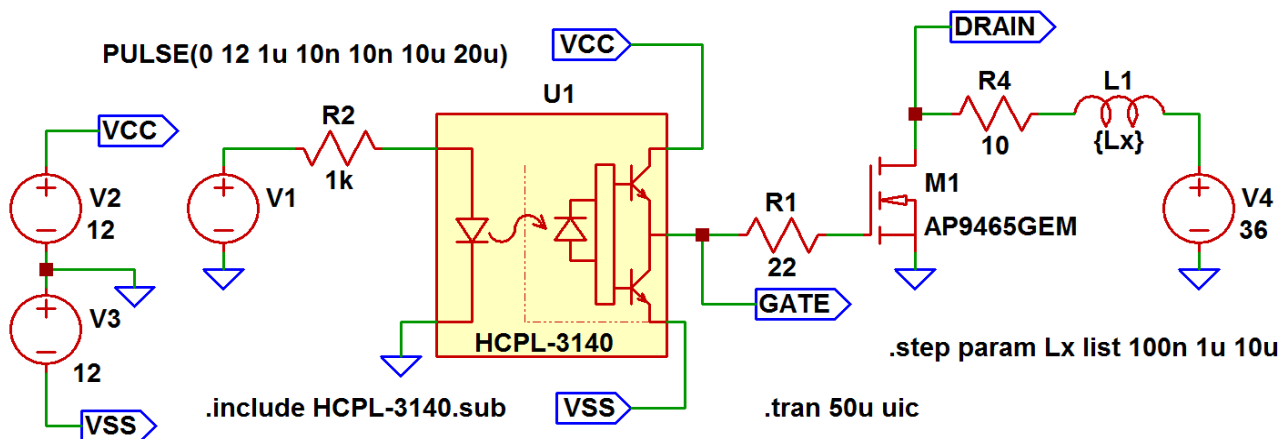
Z pasivních ochran má největší tlumící účinek ochrana typu RC, ale také je nejvíce ztrátová – ztráty jsou dány velikostí kapacity C a frekvencí spínání. Tlumící efekt je dán velikostí odporu R . Pro snížení ztrát se používá ochrana typu RCD, kterou můžete vidět na obr. 2.

Zdaleka nejefektivnější ochranou je aktivní ochrana (viz obr. 3). Tato ochrana funguje následovně. Když se na kolektoru/drainu tranzistoru objeví napětí vyšší než je součet Zenerova napětí a otevíracího napětí U_{GE} (resp. U_{GS}) tranzistoru, ten se pootevře a napět'ovou špičku pohltí. Zenerovu diodu plus usměrňovací diodu můžeme nahradit varistorem nebo bipolárním transilem.

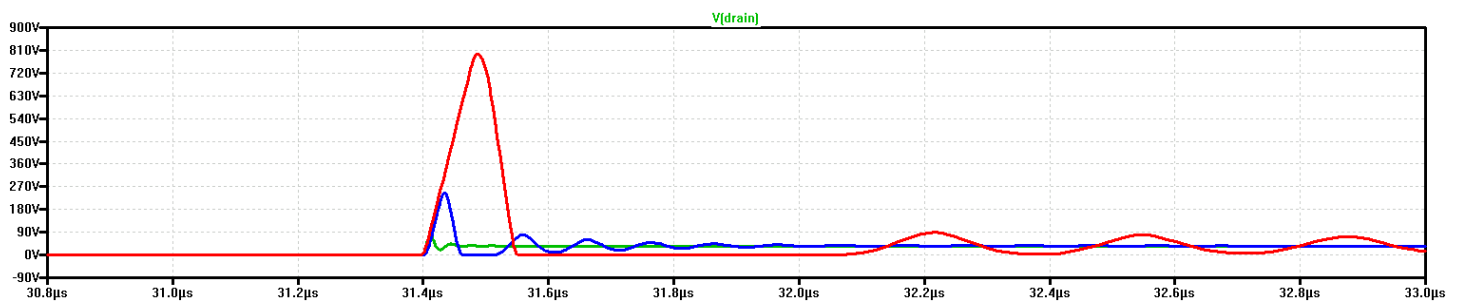


Obr. 3: Aktivní ochrana

Nyní si účinnost aktivní přepěťové ochrany ukážeme pomocí simulace. Na obr. 4 máme zapojení spínače, který spíná odporovou zátěž a částečně i zátěž induktivní. Cívka L1 představuje indukčnost vedení. Budeme sledovat závislost napětí na drainu na této indukčnosti. Postupně za hodnotu L_x cívky L1 budeme dosazovat hodnoty 100nH, 1 μ H a 10 μ H a budeme sledovat průběh napětí na drainu tranzistoru M1. Na výsledky se můžete podívat na obr. 5. Zjistili jsme, že čím větší je indukčnost, tím větší je překmit napětí na tranzistoru.

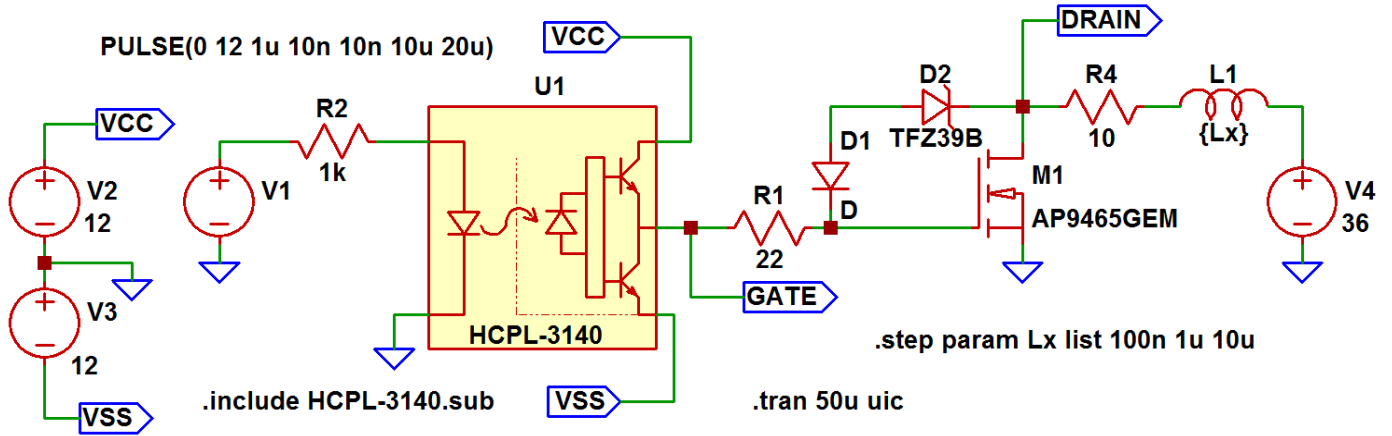


Obr. 4: Schéma zapojení spínače bez ochrany



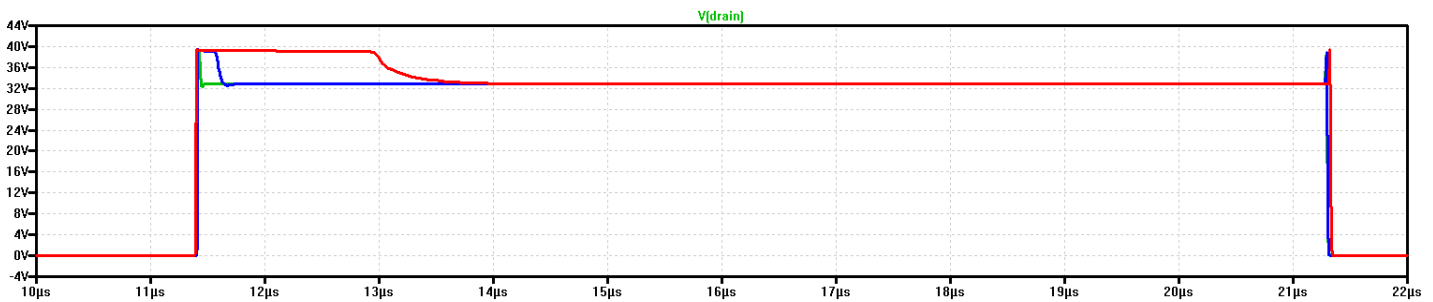
Obr. 5: Závislost napětí na drainu na indukčnosti zátěže – bez ochrany

Nyní do schématu na obr. 4 přidáme aktivní ochranu podobnou té na obr. 3 a podíváme se, jaký bude mít účinek na napětí drainu.



Obr. 6: Schéma zapojení spínače s aktivní ochranou

Na obr. 7 můžete vidět, že aktivní ochrana je opravdu účinná. Použili jsme Zenerovu diodu o jmenovitém napětí 39V a skutečně můžeme vidět, napětí na drainu nepřekročilo hodnotu 40V. Velikost indukčnosti zátěže se projeví pouze délkou impulzu zvýšeného napětí, které nepřekročí Zenerovo napětí diody.



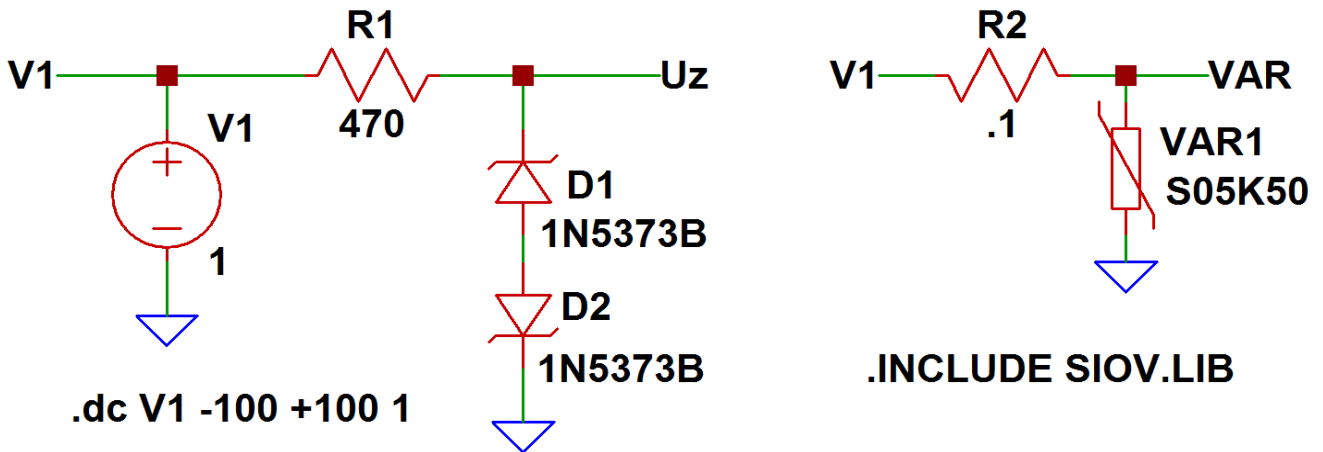
Obr. 7: Závislost napětí na drainu na indukčnosti zátěže – s aktivní ochranou

Je zřejmé, že tranzistor je pomocí aktivní ochrany proti přepětí dokonale chráněn. Indukčnost zátěže se projeví pouze ve zvýšené výkonové ztrátě tranzistoru, proto bychom se měli snažit, aby parazitní indukčnosti v silovém obvodu byly co nejmenší.

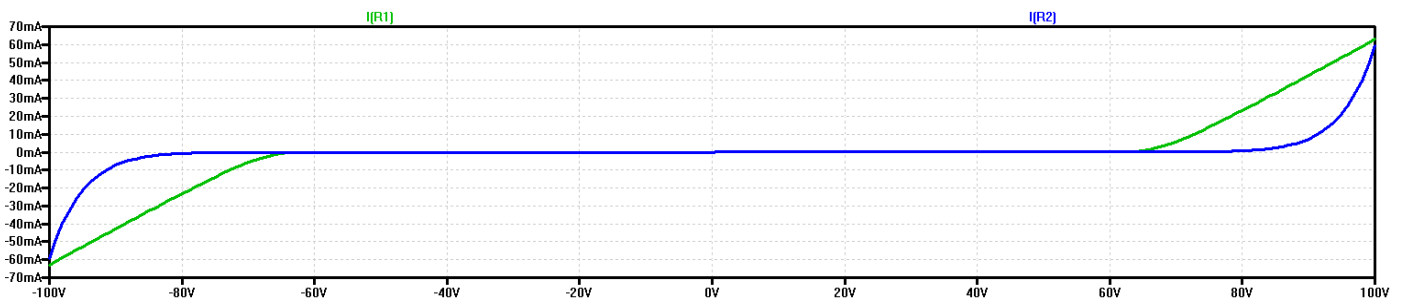
Zenerovy diody jsou primárně určeny pro stabilizátory napětí a referenční zdroje, proto pro přepětíové ochrany nejsou příliš vhodné, protože jsou konstruovány na malé výkony a rozsah Zenerova napětí je omezený a pro vyšší napětí se nám nemusí podařit sehnat vhodnou diodu. Proto nyní svoji pozornost obrátíme k varistorům a transilům.

Aktivní ochrana tranzistoru s varistorem

Nejdříve provedeme srovnání charakteristik Zenerovy diody a varistoru. Zatímco varistor je symetrická, Zenerova dioda má voltampérovou charakteristiku nesymetrickou. Proto zapojíme dvě diody antisériově a zvolíme takové Zenerovo napětí, aby bylo možné srovnávat charakteristiku Z. diody charakteristikou zvoleného varistoru. Zároveň ze stejného důvodu zvolíme vhodný rozsah vstupního napětí a velikost předřadného odporu Zenerových diod. Předřadný odpor varistor nepotřebuje, ale z důvodu možnosti měřit zvolíme malý předřadný odpor, pomocí něhož budeme měřit proud varistorem. Na obr. 8 máme schémata zapojení Zenerových diod a varistoru. Jak Zenerovy diody, tak varistor jsou napájeny ze stejného regulovatelného zdroje napětí.

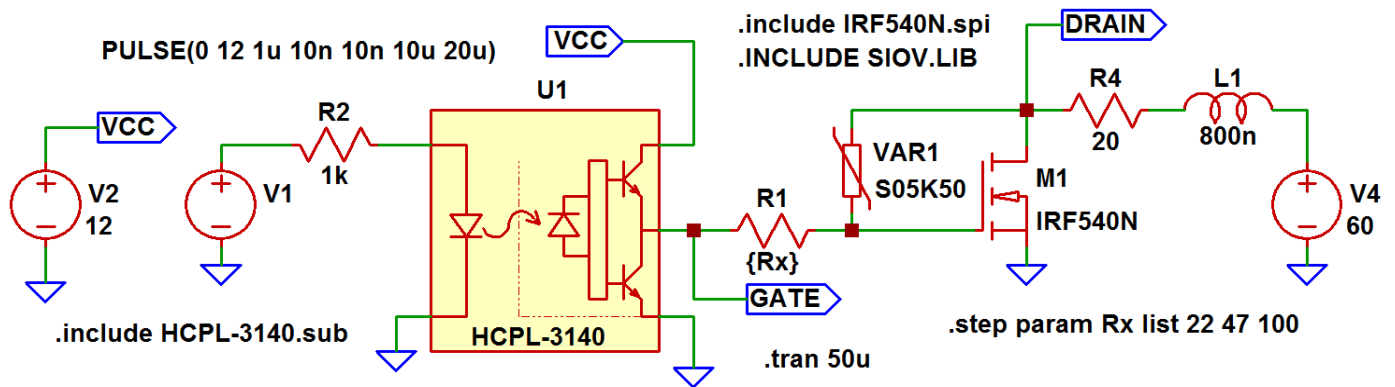


Obr. 8: Porovnání voltampérové charakteristiky Zenerovy diody a varistoru



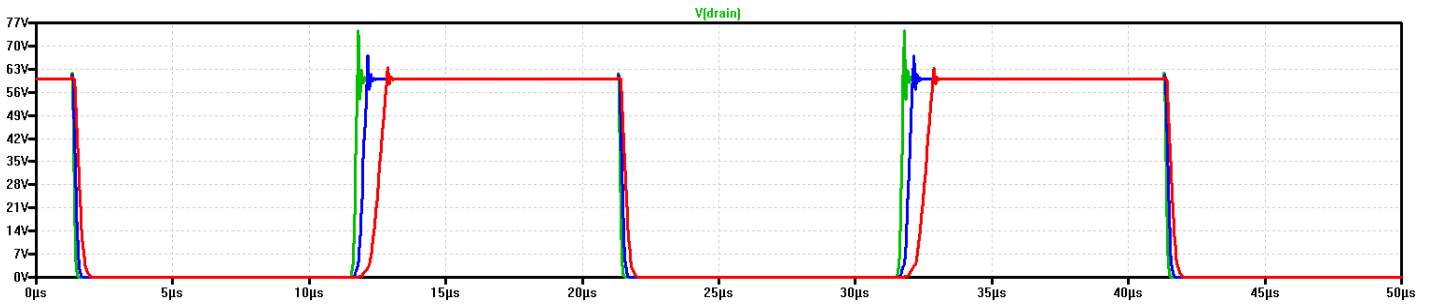
Obr. 9: zelená – proud diodami, modrá – proud varistorem

Na obr. 9 si můžete všimnout, že koleno charakteristiky Zenerovy diody je mnohem ostřejší než u varistoru. Z toho je zřejmé, že ochrana s varistorem se bude chovat trochu jinak než ochrana se Zenerovou diodou. Nyní se o tom přesvědčíme.

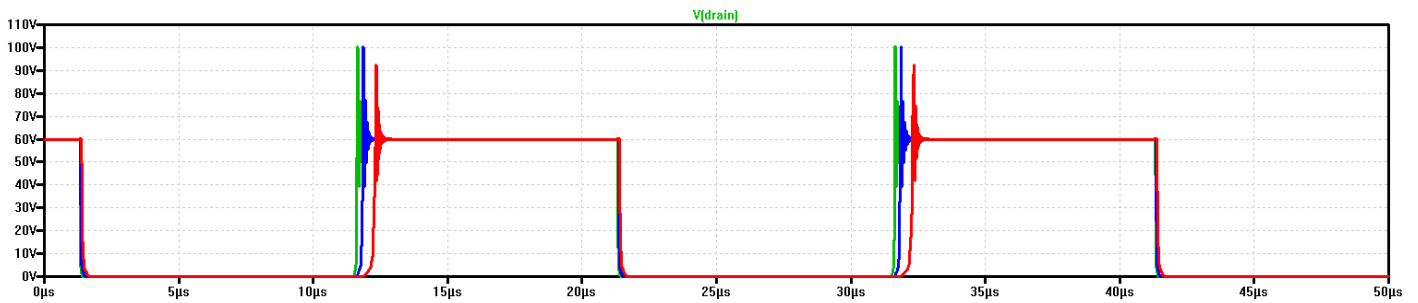


Obr. 10: Ochrana tranzistoru s varistorem S05K50

Zapojení na obr. 10 vychází z obr. 6, kde jsme diody D1 a D2 nahradili varistorem S05K50. Zvolili jsme zatěžovací odpor R4 tak, aby silovým obvodem tekla proud 3A. Parazitní indukčnost L1 byla zvolena s ohledem na možnosti simulačního programu: při vyšší hodnotě indukčnosti program přestal pracovat. Významný vliv na ochranu s varistorem má odpor R1, který určuje rychlost nabíjení a vybíjení vstupní kapacity tranzistoru M1. Tento odpor má na napěťové špičky vliv i bez aktivní ochrany, protože určuje, jak rychle se otevírá a zavírá tranzistor. Čím jsou hrany napětí na drainu tranzistoru strmější, zejména to platí o vstupu, tím jsou přepěťové špičky vyšší. Když je odpor R1 větší a zároveň je zapojen ochranný varistor, ochrana reaguje rychleji. Je to proto, že se na R1 vytvoří napětí potřebné pro otevření tranzistoru M1 při menším proudu. U varistoru, jehož charakteristika není tak příznivá jako je charakteristika Zenerovy diody, to má nezanedbatelný význam. Na obr. 11 máme zobrazeny průběhy napětí na drainu pro různé hodnoty odporu R1 a na obr. 12 najdete stejná napětí s odpojeným varistorem.



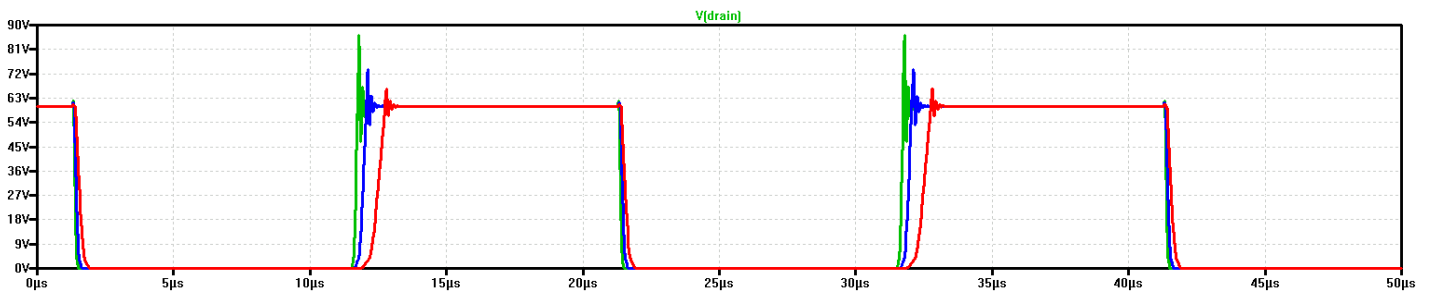
Obr. 11: zelená – $R1 = 22\Omega$, modrá - $R1 = 47\Omega$, červená - $R1 = 100\Omega$



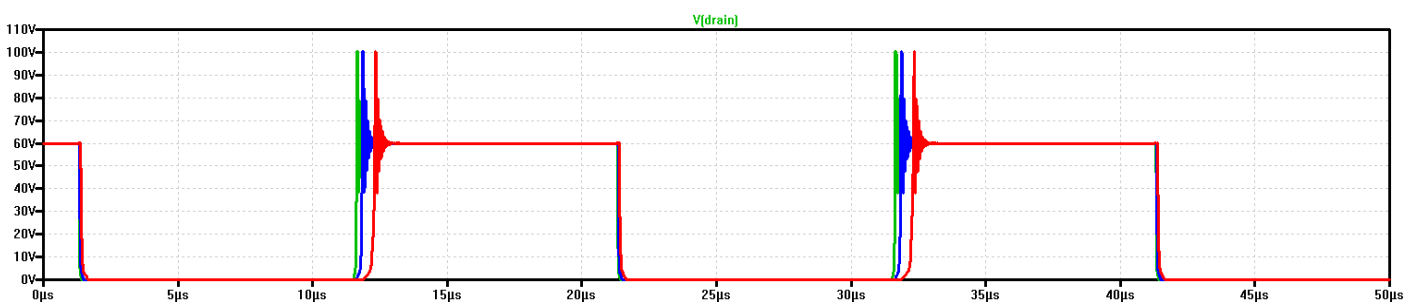
Obr. 12: Napětí drainu s odpojenou varistorovou ochranou.

Na obr. 12 si všimněte, že velikost $R1$ má na špičky napětí menší vliv a dosahují hodnoty 100V, což je na hranici únosnosti tranzistoru IRF540N.

Nyní stejnou simulaci provedeme s varistorem S05K60. Zde jsme si mohli dovolit použít indukčnost o hodnotě $1,2\ \mu\text{H}$, aniž zkolaboval program. Všechny ostatní parametry zůstaly nezměněny, takže není nutné znovu sem vkládat zapojení z obr. 10. Uvedeme pouze grafické výstupy simulace.



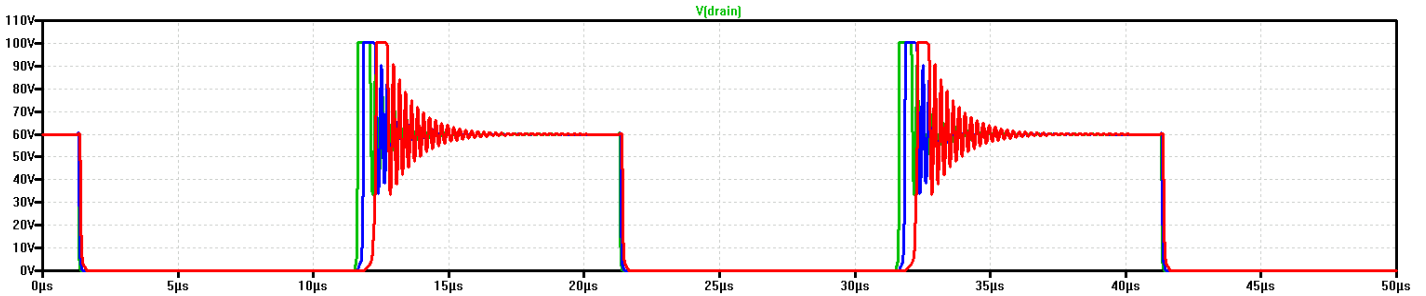
Obr. 13: Napětí na drainu tranzistoru M1 s varistorem S05K60 a parazitní indukčností $1,2\ \mu\text{H}$.



Obr. 14: Napětí na drainu tranzistoru M1 bez varistoru

Na obr. 14 si všimněte, že amplitudy napětí na drainu jsou pro všechny 3 hodnoty odporu $R1$ přesně 100V. To není náhoda, ale jedná se o vliv tranzistoru M1, který snese právě 100V. Že tomu je skutečně tak, se můžeme snadno přesvědčit, když hodnotu $L1$ zvýšíme například na $10\ \mu\text{H}$ (viz obr. 15). Na dalším obrázku je zřetelně vidět, že špičky napětí na drainu jsou ořezány na hodnotě 100V. To svědčí o dobré kvalitě modelu tranzistoru, který pochází ze stránek výrobce International Rectifier. V současné době je u výrobců elektronických součástek trend vedle datových listů poskytovat simulační modely jimi vyráběných součástek. Tuto iniciativu lze jen přivítat, neboť na jedné straně zvyšuje odbyt vyráběných komponent a na druhé straně pomáhá

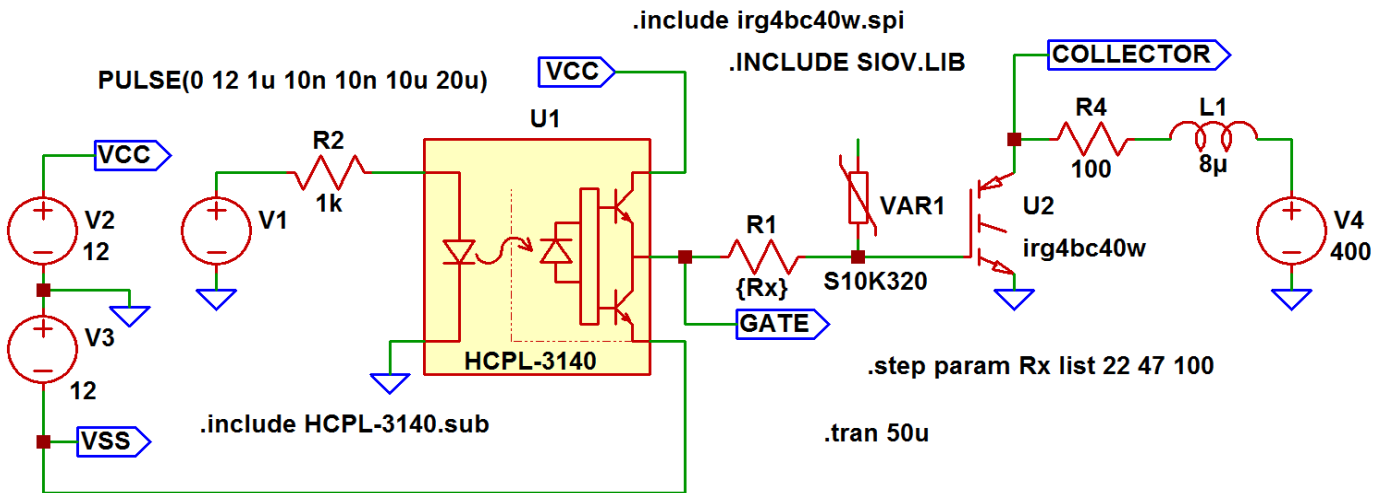
vývojářům v jejich práci.



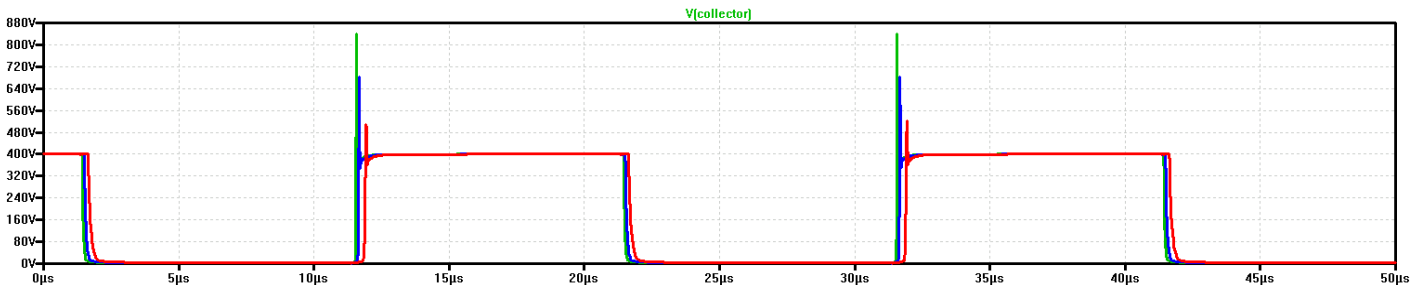
Obr. 15: Napětí na drainu tranzistoru M1 bez varistoru a s parazitní indukčností 10µH

Pro zajímavost jsem tranzistor IRF540 nahradil tranzistorem BSC160N10NS3 ze standardní knihovny dodávané s programem, který má mimochodem také snést maximálně 100V, a simulací jsem zjistil, že maximální amplituda je 708V. Lze tedy říci, že kvalita různých simulačních modelů bývá různá.

Dříve než uzavřeme kapitolu s varistorovými ochranami, se ještě podíváme na spínač s IGBT tranzistorem IRG4BC40W, který má snést 600V a 40A. Jako ochranný prvek použijeme varistor S10K320. V tomto případě budeme pro změnu postupovat opačně a začneme s rozpojeným varistorem:

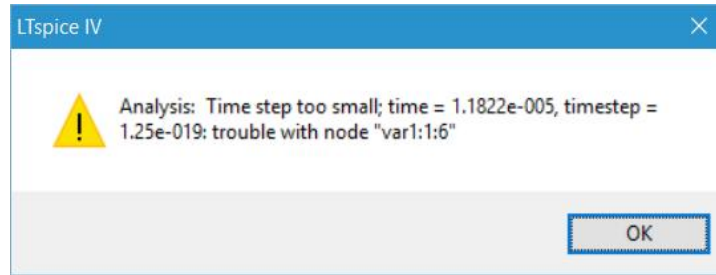


Obr. 16: Spínač s IGBT tranzistorem s rozpojenou ochranou

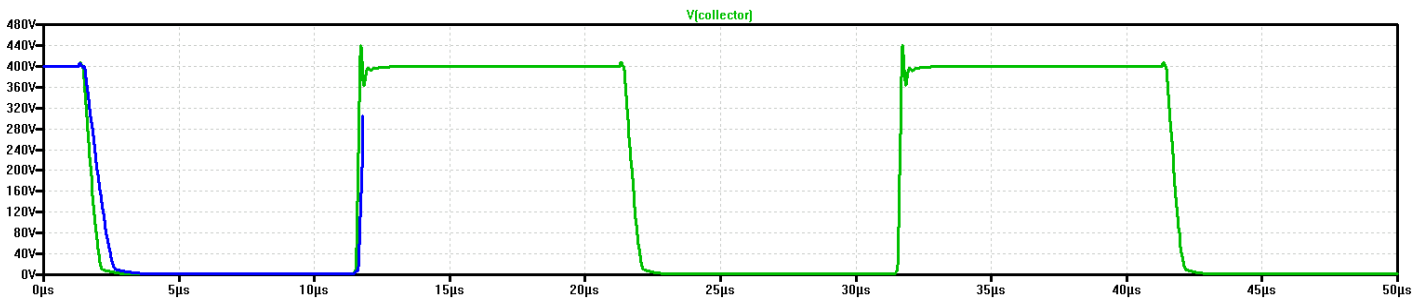


Obr. 17: Napětí na kolektoru IGBT tranzistoru bez ochrany

Po zapojení varistoru simulace nedoběhla do konce a objevilo se následující chybové hlášení:



Nicméně, nějaký výsledek se získat podařilo:

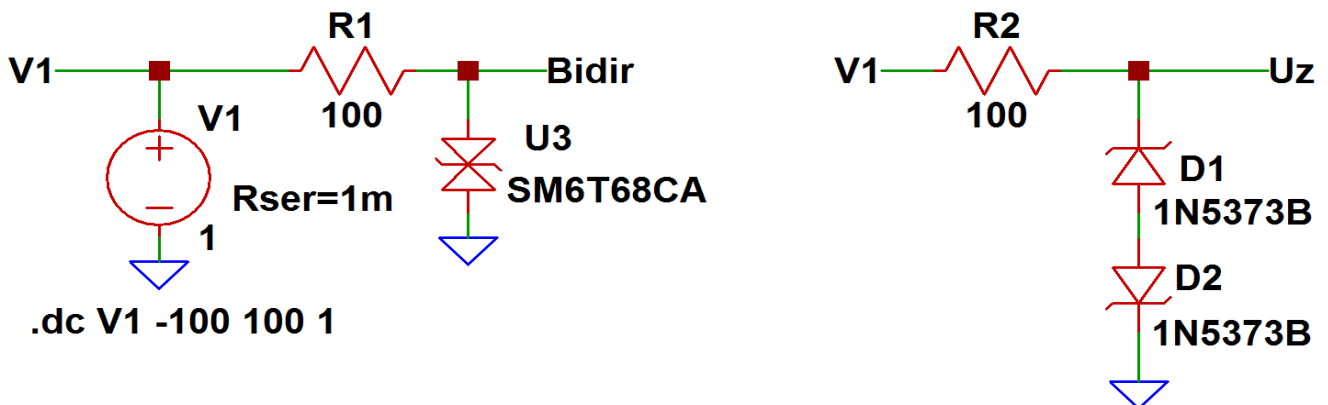


Obr. 18: Napětí na kolektoru IGBT tranzistoru s varistorem S10K320

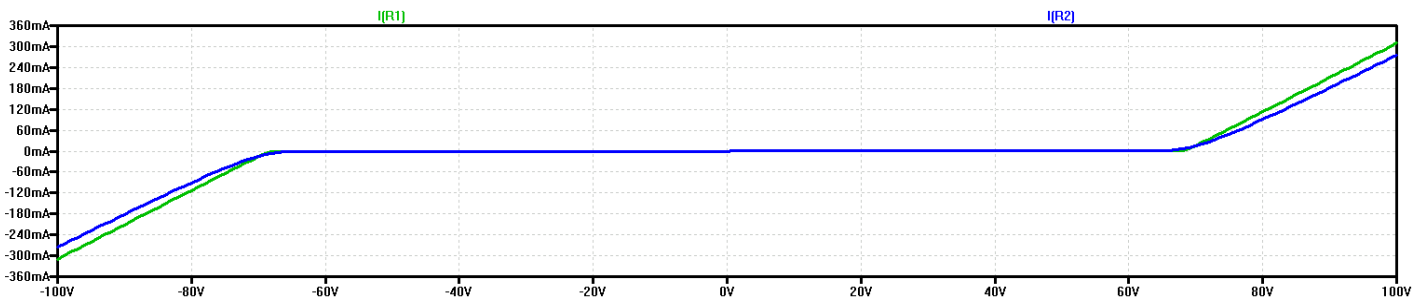
Z obr. 18 vyplývá, že ochrana IGBT tranzistoru s varistorem S10K320 je velmi účinná i s malým odporem R_1 . Situaci jsme ještě zhoršili tím, že jsme budič U1 napájeli ze symetrického zdroje 2 x 12V, protože pro otevření tranzistoru M1 se na odporu R_1 muselo vytvořit napětí o 12V vyšší než v předchozím případě.

Aktivní ochrana tranzistoru s transilem

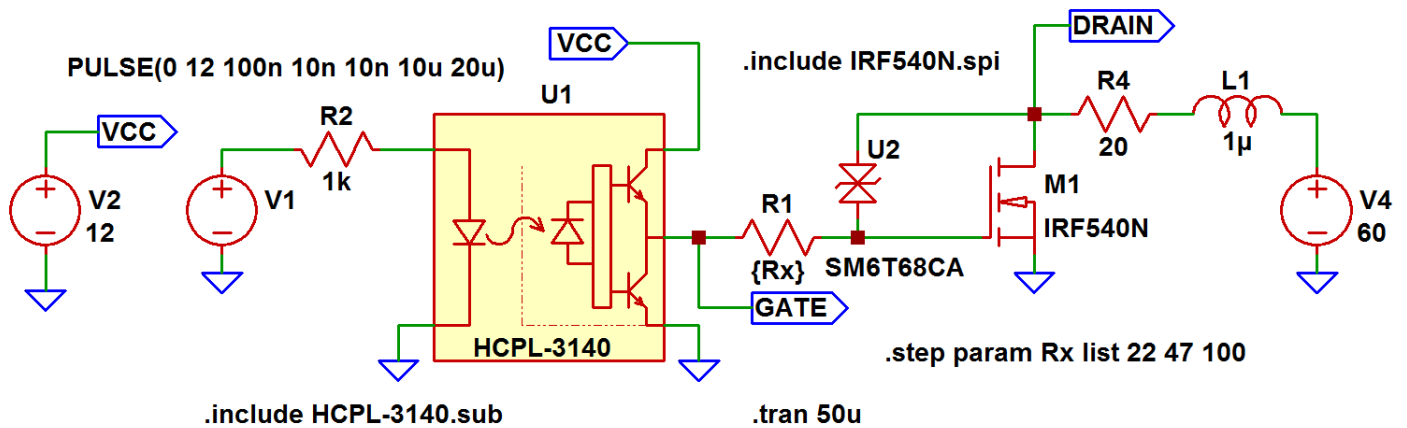
Podobně jako v případě varistoru, nejdříve porovnáme voltampérovou charakteristiku bipolárního transilu se Zenerovými diodami. Na obr. 20 můžete vidět, že VA charakteristika transilu se podobá VA charakteristice Zenerovy diody. Na tom není nic překvapivého, protože obě součástky využívají stejného principu. Na rozdíl od varistoru má VA charakteristika transilu ostřejší přechod do vodivého stavu. Měl by být tedy transil pro naše účely vhodnější. Přesvědčíme se o tom dále. Na obr. 22 máme průběhy napětí na drainu tranzistoru M1 z obr. 21 pro tři hodnoty odporu R_1 . Transil SM6T68CA má pracovní napětí 68V. Napětíové špičky se pohybují kolem této hodnoty v závislosti na velikosti R_1 . Můžeme tedy říci, pokud je model transilu dostatečně přesný, že ochrana s transilem je účinnější než s varistorem.



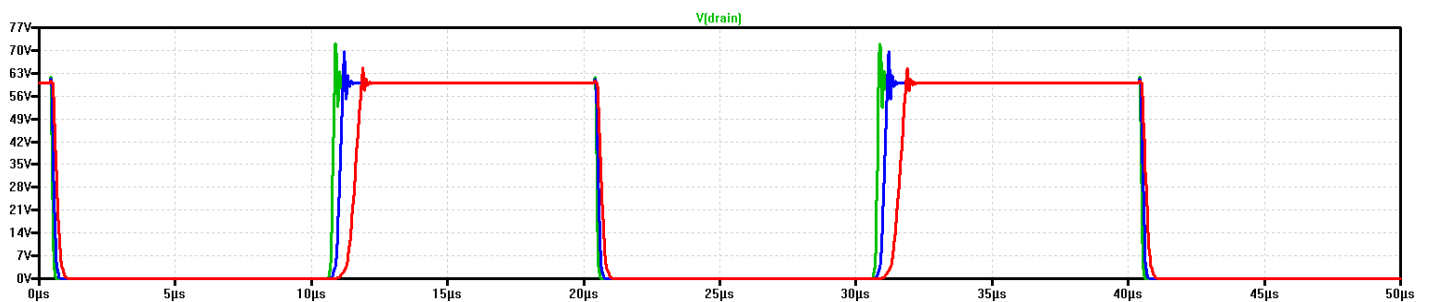
Obr. 19: Zapojení pro porovnání VA charakteristik transilu a Zenerovy diody



Obr. 20: VA charakteristiky transilu a Zenerovy diody



Obr. 21: Ochrana tranzistoru pomocí transilu



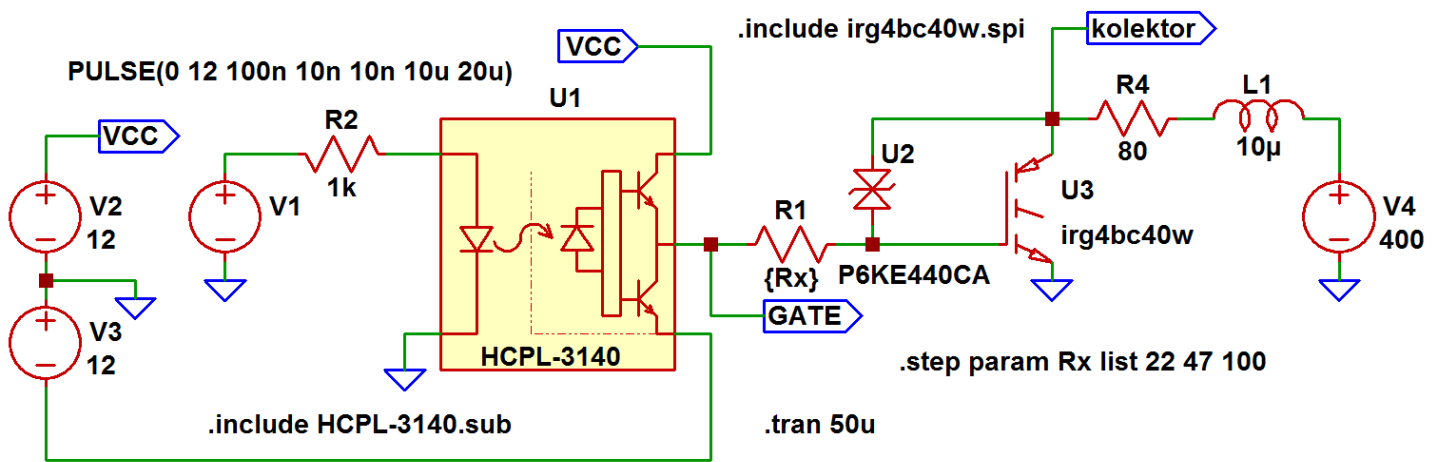
Obr. 22: Napětí na drainu pro různé hodnoty R1

Nakonec zkusíme pomocí transilu chránit IGBT tranzistor, který snese maximální napětí 600V a proud 40A. Zapojení bude stejné jako na obr. 16 s tím rozdílem, že tranzistorem tentokrát místo 4A poteče 5A a indukčnost bude mít hodnotu 10μH, zatímco v předchozím případě to bylo pouze 8μH. Podmínky pro vznik špiček napětí jsou tedy příznivější. Pro $R1 = 22\Omega$ má špička na obr. 24 amplitudu cca 480V, takže máme ještě rezervu 120V. Je třeba poznamenat, že řídicí napětí pro IGBT je 2 x 12V. Pokud bychom pro řízení tranzistoru použili pouze +12V, špičky by byly menší. Simulací jsem zjistil, že v tomto případě byla amplituda napětí na kolektoru při stejné hodnotě $R1$ pouze 461V.

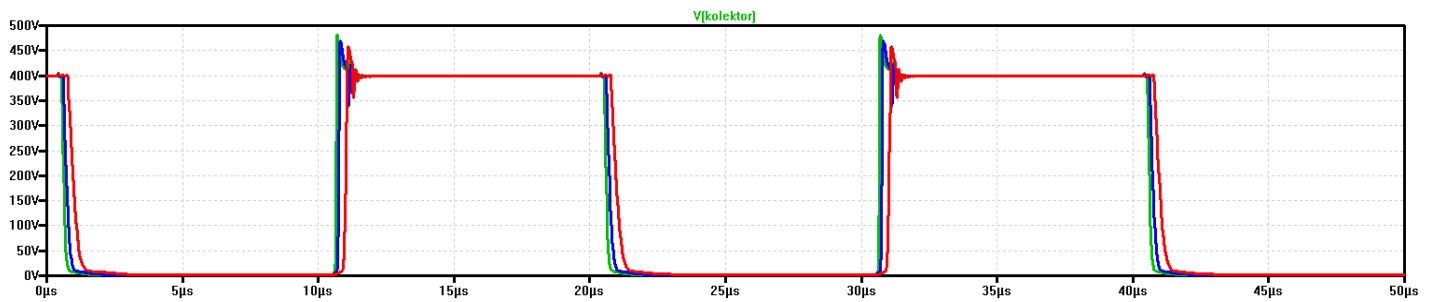
Nakonec ještě provedeme kontrolu s odpojeným transilem. Na výsledek simulace se můžete podívat na obr. 25. Bez transilu jsme na kolektoru M1 naměřili amplitudu maximálně 1200V při napájení optočlenu 2 x 12V a při napájení 1 x 12V pouze 681V. To je zajímavý výsledek, který svědčí o tom, že přivedení záporného napětí na gate tranzistoru urychlí jeho vypnutí.

Závěr

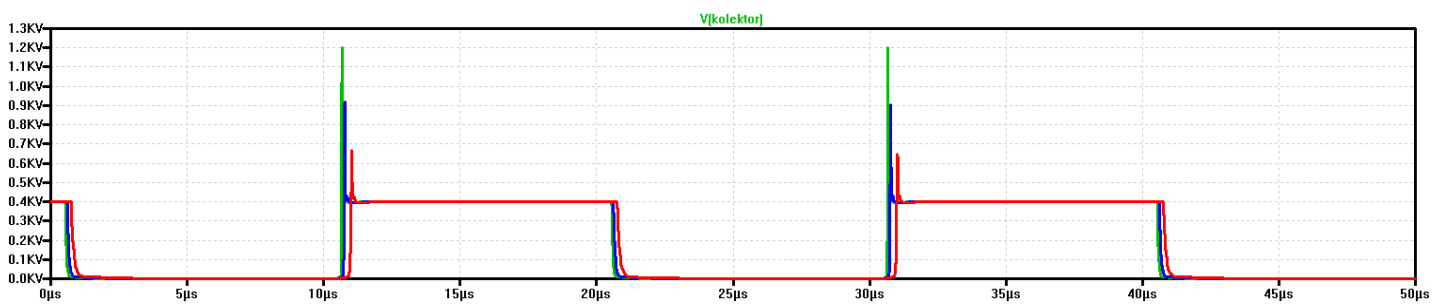
V literatuře se uvádí zapojení aktivní ochrany tranzistoru se Zenerovou diodou. Simulace ukázaly, že podobně fungují ochrany s varistorem a transilem. Použití transilu se mi jeví jako vhodnější, protože jeho VA charakteristika se více podobá char. Zenerovy diody. Na druhé straně, varistory se vyrábějí s rozmanitějším rozsahem pracovních napětí.



Obr. 23: Ochrana IGBT tranzistoru s transilem



Obr. 24: Napětí na kolektoru IGBT pro různé hodnoty R1 - transilem



Obr. 25: Napětí na kolektoru IGBT pro různé hodnoty R1 – bez transilu