

OCHRANNÉ OBVODY VÝKONOVÝCH POLOVODIČOVÝCH SÚČIASTOK (SAFEGUARD CIRCUITS OF POWER SEMICONDUCTOR PARTS)

*Irena KOVÁČOVÁ, **Dobroslav KOVÁČ

*Department of Electrical Drives and Mechatronics, Technical University of Košice, Letná 9, 042 00 Košice

**Department of Theoretical Electrotechnics and Electrical Measurement, Park Komenského 3, 042 00 Košice
Slovak Republic, Tel: +421-55-6022273; Fax: +421-55-6330115, E-mail: Irena.Kovacova@tuke.sk,
E-mail: Dobroslav.Kovac@tuke.sk

SUMMARY

The paper deals with the most important electrical limitation parameters of power semiconductor parts. Some recommended safeguard circuits are described and also is given the review about possibilities of the extension of it's above mentioned maximum electrical parameters.

Keywords: *power semiconductor parts, safeguard circuits, limitation data parameters*

1. ÚVOD

Okrem všeobecných popisov a návodov na prácu s výkonovými pol'om riadenými tranzistormi sa v nasledujúcom príspevku budeme venovať praktickým poznatkom, ktoré sa týkajú konkrétnych možností zapojení tranzistorov a ich doplnkových obvodov. Poukážeme tiež na ich použitie, prípadne na postupy a metódy výpočtov jednotlivých prvkov týchto obvodov.

2. NADPRÚDOVÉ OCHRANY

Základnými prvkami nadprúdových ochrán, bez ktorých by nebola možná ich spoľahlivá činnosť sú snímače.

Z hľadiska charakteru snímaných signálov sa snímače delia na:

- snímače, umožňujúce merať iba striedavé prúdy
- snímače, umožňujúce merať jednosmerné aj striedavé prúdy

Keďže snímač je len časť nadprúdovej ochrany a jeho výstupný signál sa má ďalej spracovávať, tak je v niektorých prípadoch výhodné, ak informácia o veľkosti prúdu nie je potenciálovo viazaná na snímané miesto. Z takéhoto hľadiska sa potom snímače prúdu delia na snímače:

- s galvanickým oddelením výstupného signálu
- bez galvanického oddelenia výstupného signálu

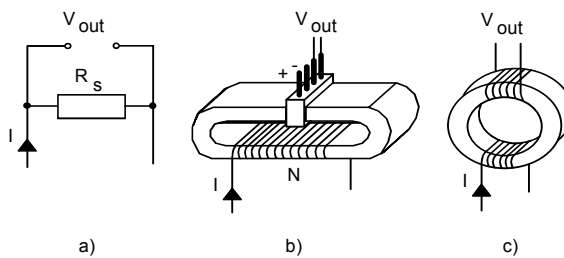
Okrem uvedených hľadísk musíme uvážiť aj potrebu prídavných napájacích zdrojov zabezpečujúcich činnosť snímačov a z tohto hľadiska sa snímače môžu deliť na:

- pasívne
- aktívne

Aby bola nadprúdová ochrana pol'om riadeného tranzistora dostatočne rýchla, aby ho ochránila pred zničením a pri prevádzke „do skratu“, tak jej zapojenie musí byť pomerne jednoduché. Nesmie vzniknúť veľké dopravné oneskorenie akčného zásahu. Požiadavka jednoduchosti ochrany vyplýva zo skutočnosti, že pol'om riadené súčiastky patria medzi dnes najrýchlejšie spínacie prvky. Akčný

zásah musí kvôli ochrane tranzistora zabezpečiť jeho vypnutie, čo môžeme vykonať skratovaním jeho hradla voči emitoru.

Z uvedeného vyplýva, že medzi najideálnejšie snímače prúdu by patrili pasívne snímače umožňujúce merať jednosmerné aj striedavé prúdy s galvanickým oddelením signálu. Takéto snímače však bohužiaľ neexistujú. Zatiaľ najrozšírejšími typmi snímačov sú snímače zobrazené na Obr. 1. Na Obr. 1.a) vidíme odporový snímač, ktorý využíva Ohmov zákon. Takýto snímač sa radí medzi pasívne snímače umožňujúce merať jednosmerné aj striedavé prúdy, ale bez galvanického oddelenia. Frekvenčný rozsah presného snímania prúdu je daný iba veľkosťou jeho parazitných kapacít a



Obr. 1 Najpoužívanejšie typy snímačov prúdu
Fig. 1 The most frequent utilized current sensors

indukčnosť. Čím budú menšie, čo je najdôležitejšie kritérium pri tomto type snímača, tým bude možné presne snímať priebehy s vyššími frekvenciami. V prípade existencie pomerne veľkých parazitných impedancií sa môže stať, že sa odporový snímač nehodí ani pre snímanie prúdov rozvodnej elektrickej siete. Na Obr. 1.b) vidíme principiálne vyhotovenie snímača prúdu využívajúceho Hallov jav. Snímaný prúd prechádza vinutím navinutým na magnetickom obvode. Prechodom prúdu sa v magnetickom obvode vytvára magnetický tok, ktorý je na určitom mieste magnetického obvodu snímaný vloženou Hallovou sondou. Hallova sonda napájaná zdrojom konštantného prúdu, generuje na svojich výstupných svorkách napätie úmerné

magnetickému toku, ktorý odpovedá snímanému prúdu. Z uvedeného vyplýva, že sa jedná o snímač aktívny umožňujúci snímať jednosmerné i striedavé prúdy s galvanickým oddelením výstupného signálu. Výrobcovia týchto snímačov, napr. firmy Siemens a Lem, uvádzajú frekvenčný rozsah 0 až 150 kHz s presnosťou snímania 0,1 %. Uvedený typ snímačov je dnes najrozšírenejší a najperspektívnejší. Na Obr. 1.c) je uvedený posledný používaný typ, snímač na princípe impulzného transformátora. Principiálne umožňuje snímať len striedavé prúdy, avšak v rôznych jeho mutáciách existujú aj zapojenia na princípe zmiešavačov signálov, ktoré merajú tiež jednosmerné prúdy. V jednoduchom prevedení je snímač pasívny, inak aktívny. Výhodou je galvanické oddelenie výstupného signálu. Frekvenčný rozsah je obmedzený magnetickým obvodom alebo frekvenciou zmiešavacieho obvodu. V zásade však môžeme povedať, že by mohol byť minimálne taký, ako pri snímačoch s Hallovou sondou, ktoré taktiež využívajú magnetický obvod.

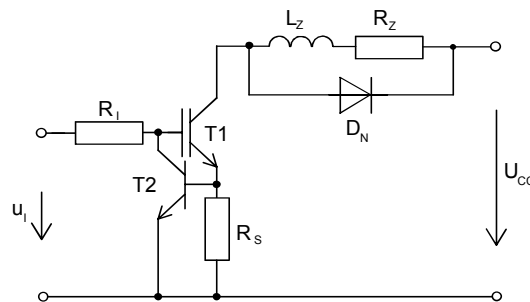
Ako už bolo uvedené, samotné zapojenie snímača prúdu do obvodu chránenej súčiastky nestačí. Musíme navrhnuť i akčnú časť obvodu, ktorá zabezpečí odpojenie ohrozenej časti. Z tohoto hľadiska sa konštruované zapojenia nadprúdových ochranných obvodov delia na tri základné skupiny.

Prvú skupinu tvoria nadprúdové ochrany, ktoré pri existencii krátkého nadprúdu odpoja chránenú súčiastku až do doby akčného zásahu obsluhy.

Druhú skupinu tvoria zapojenia, ktoré pri výskyte nadprúdu síce súčiastku vypnú, ale len do doby nasledujúcej spínacej periódy, kedy sa súčiastka opäť zapína a v prípade opätovného výskytu nadprúdu opäť vypína. Jedná sa teda o periodicky štartovateľné ochrany.

Tretím typom ochrany, ktorej ukážku zapojenia máme na Obr. 2, je ochrana, ktorá vypína v okamihu výskytu nadprúdu, pričom tranzistor vypína len na určitú dobu danú dopravnou časovou konštantou signálu, prípadne vôbec nevypína, ale sa len „priviera“, takže pracuje v aktívnej oblasti výstupných charakteristík, čo môže znamenať jeho zničenie vplyvom prekročenia dovoleného stratového výkonu.

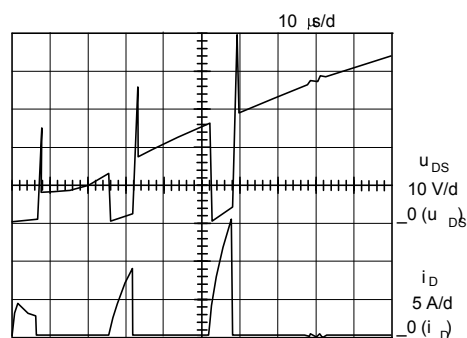
Najčastejšie používaným typom ochrany je ochrana na princípe periodického reštartovania. Možným príkladom zapojenia takejto ochrany by bola aj upravená ochrana podľa Obr. 2 a to takým spôsobom, že signál zo snímacieho odporu R_s by nebol pripojený priamo na bázu tranzistora T2, ale by vstupoval cez invertujúce hradlo do pomocného R-S klopného obvodu a na jeho vstup S tak, aby pri výskyte nadprúdu sa klopný R-S obvod na svojom výstupe preklonil na hodnotu logickej jednotky. Výstup klopného obvodu je potom už pripojený bázu tranzistora T2, čím dôjde k jeho zapnutiu a tým k vypnutiu tranzistora T1. Na druhý vstup klopného obvodu, vstup R, musí byť pripojený na riadiaci signál tranzistora. Treba však podotknúť, že vstupy R-S klopného obvodu musia byť dynamické. Pri príchode začiatku spínacieho impulzu na vstup R



Obr. 2 Príklad najjednoduchšieho zapojenia nadprúdovej ochrany

Fig. 2 Example of the simplest connection of overcurrent protection

sa klopný obvod prekloní a na výstupe bude hodnota logickej nuly, čo spôsobí vypnutie tranzistora T2 a možnosť zapnutia tranzistora T1. Ukážka spínacích priebehov napätia u_{DS} a prúdu i_D tranzistora MOSFET pri použití jednorázovej ochrany je na Obr. 3. Získané priebehy boli urobené meraním pri činnosti tranzistora „do skratu“, pričom bol použitý jednosmerný napäťový zdroj so zapojeným filtračným kondenzátorom. Vidíme, že postupným nabíjaním kondenzátora dochádza k vzrastu napätia



Obr. 3 Priebehy u_{DS} a i_D tranzistora MOSFET pri výskyte nadprúdu

Fig. 3 Transistor MOSFET u_{DS} and i_D waveforms at the instant of overcurrent

a tým i k vzrastu prúdu. Tranzistor spína až do okamihu, pokiaľ sa neprekročí dovolená hodnota prúdu. V tom okamihu vypína, čo trvá až do zásahu obsluhy.

Z hľadiska návrhu a konštrukcie nadprúdovej ochrany je ešte raz potrebné zdôrazniť, že pri výkonových poľom riadených tranzistoroch nie je vhodné používať okamžité reštartovateľné ochrany, pretože to môže vyvolať nežiadúce oscilácie vo výkonovom obvode, následne veľké straty a konečne tepelné zničenie súčiastky. Taktiež je potrebné zväziť použiteľnosť nadprúdových ochrán prevzatých z bipolárnych tranzistorov a pracujúcich na princípe snímania úbytku napätia na tranzistore v zopnutom stave, ktorý je priamoúmerný veľkosti pretekaného prúdu. Kritickou je v tomto prípade doba prechodu medzi stavom zapnutým, kedy má byť ochrana funkčná a stavom vypnutým, keď ochrana nesmie byť funkčná, pretože by vykazovala

nadprúd, čo nie je pravda. Počas spomínanej doby sa teda musí ochrana znecitlivieť. Z vyšetrovania spínacích priebehov výkonových polom riadených tranzistorov vieme, že najnepriaznivejší prípad prevádzky tranzistora nastáva práve pri jeho zapnutí, kedy sa k záťažnému prúdu pripočítava aj prúd od komutačného náboja nulovej diódy. Práve v tomto okamihu je pri použití spomínanej nadprúdovej ochrany, tranzistor nechránený. Rovnako je potrebné upozorniť, že akčný zásah, od signálu nadprúdu zo snímača, v riadiacom generátore alebo galvanických oddeľovacích stupňoch riadiaceho signálu vedie k príliš dlhému reakčnému času ochrany, a teda k väčšej pravdepodobnosti zničenia súčiastky.

3. PREPÄŤOVÉ OCHRANY

Prepätím sa v obvodoch s výkonovými polovodičovými súčiastkami chápe každé napätie, ktoré vzrastie nad hodnotu opakovaného špičkového záverného (blokovacieho) napätia U_{RRM} , (U_{DRM}). Prekročenie týchto hodnôt napätí môže viesť k zničeniu súčiastok. Preto sa zaraďujú do výkonových obvodov istiace obvody, ktoré zabraňujú vzniku prepätia.

Prepätia a príčiny ich vzniku rozdelíme do skupín podľa miesta vzniku. Prepätia sa na základe toho potom delia na prepätia vstupné, vnútorné a výstupné. V súlade s týmto rozdelením je možné rozlišovať i ochranné obvody.

Vstupné prepätia - vznikajú prevažne pri zapínaní a vypínaní prúdu vstupného transformátora. Pri rýchlych zmenách prúdu v primárnom obvode transformátora sa rýchlo mení aj magnetický tok v jadre transformátora a na sekundárnom vinutí vznikne prepätie (napäťová špička). Veľké prepätia vznikajú hlavne pri vypínaní nezaťažených transformátorov v okamihu vrcholu amplitúdy magnetizačného prúdu alebo pri pripojení transformátora na sieť v okamihu maximálnej okamžitej hodnoty vstupného sieťového napätia. Prepätie môže taktiež vzniknúť pri pretavení poistky alebo vplyvom atmosférických porúch (zvedenie blesku, indukciu).

Vnútorné (komutačné) prepätia - vznikajú priamo v chránenom zariadení, najčastejšie pri prerušení prúdu v obvode s indukčnosťou, čo býva pri vypnutí tranzistora FET. Amplitúda týchto prepätí závisí priamo úmerne na rýchlosti poklesu prúdu a veľkosti indukčnosti. V prípade použitia tranzistorov FET, ktoré majú relatívne krátke spínacie časy, bude vypnutie rýchle, čo spôsobí veľkú strmú poklesu tranzistorového prúdu a na indukčnostiach L_c , v obvode kolektora sa vytvorí značné napätie $L_c(di/dt)$, ktoré prispeje k rastu napätia u_{DS} . Takto vzniknuté napätie u_{DS} môže prekročiť aj maximálnu prípustnú hodnotu tranzistora FET a môže nastať jeho zničenie. V dôsledku toho sa musí použiť prepäťová ochrana. Požiadavky, ktoré kladieme na takúto ochranu sú:

1. rýchle a spoľahlivé obmedzenie prepätia,

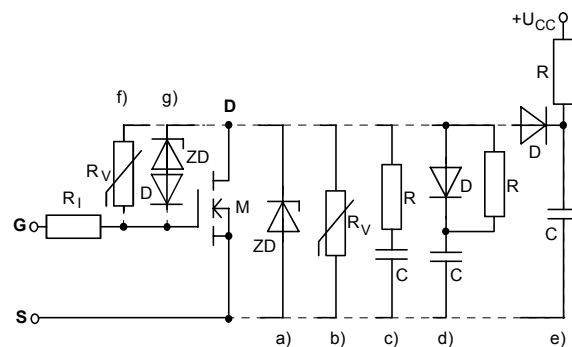
2. čo najmenší podiel na zväčšení celkových spínacích strát tranzistora FET,

3. čo najmenší zásah do optimalizovaných priebehov i_D a u_{DS} počas spínania.

Výstupné prepätia - vznikajú pri rozpojení obvodu záťaže, hlavne vtedy, ak má záťaž induktívny charakter.

Najčastejšie používané zapojenia prepäťových ochrán, zabezpečujúcich ochranu najcitlivejších prvkov obvodu - výkonových polovodičových súčiastok, sú zobrazené na Obr. 4. Budeme predpokladať, že prepätia vznikajúce v obvode sú zapríčinené existenciou parazitnej indukčnosti v kolektore tranzistora FET.

Historicky ako prvé zapojenie prepäťovej ochrany bolo zapojenie na Obr. 4.a) využívajúce Zenerovu diódu. Výhody tohoto zapojenia sú zrejme z toho, že sú splnené všetky tri požiadavky kladené na prepäťovú ochranu. Nevýhodou zapojenia bolo iba to, že výkonový tranzistor mohol spínať napätia iba niekoľko desiatok voltov a prúdy rádovo jednotky ampérov, pretože výkonové Zenerove diódy neboli a ani nie sú vyrábané pre vyššie napätia ako 100 V a umožňujú v svojej štruktúre rozptyliť



Obr. 4 Najčastejšie zapojenia prepäťových ochrán tranzistorov FET

Fig. 4 The most frequent connections of FET overvoltage protection circuit

pomerne malý stratový výkon, čo vedie k významnému prúdovému obmedzeniu ich použitia. Dalo by sa uvažovať o ich sériovo paralelnom zapojení, avšak v tomto prípade sa musí zohľadniť i celková dynamika vzniknutého zapojenia, ktorá sa výrazne zhorší, čím sa stane, že v kritickom okamihu krátkeho vypínacieho deja nie je tranzistor FET chránený proti prepätiu a môže dôjsť k jeho zničeniu. Dá sa povedať, že popisovaná ochrana našla svoje uplatnenie iba pri prechode z nevykonových tranzistorov na prvé tranzistory výkonové. Pre realizáciu takejto ochrany je potrebné splniť nasledujúce tri podmienky:

$$U_{ZD} > U_{CC} \quad (1)$$

$$P_{ZD(AV)} \geq \frac{\frac{1}{2} L_c i_{Dvyp}^2 * \frac{U_{ZD}}{U_{ZD} - U_{CC}}}{T} \quad (2)$$

$$I_{ZDmax} \geq i_{Dvyp} \quad (3)$$

kde U_{ZD} je veľkosť Zenerovho napätia, U_{CC} je veľkosť napájacieho napätia obvodu, $P_{ZD(AV)}$ je dovolený stredný stratový výkon Zenerovej diódy, L_e je kolektorová indukčnosť, $i_{Dvyp.}$ je prúd tranzistora FET pri vypnutí, T je doba periódy spínania tranzistora a I_{ZDmax} je maximálny dovolený prúd Zenerovej diódy.

Ako historicky ďalšie bolo, a je, používané zapojenie prepäťovej R, C ochrany podľa Obr. 4.c). Priníp činnosti ochrany spočíva v myšlienke postupného prenosu energie nahromadenej v parazitnej indukčnosti L_e na kondenzátor s kapacitou C. Teda vychádzame zo vzťahu:

$$W_{L_e} = \frac{1}{2} L_e i_{Dvyp.}^2 = \frac{1}{2} C (U_o^2 - U_c^2) \quad (4)$$

kde U_o je amplitúda prepätia a U_c je hodnota napätia na kondenzátore v okamihu prerušenia prúdu tranzistorom. Ak si z danej rovnice vyjadríme veľkosť prepätia, potom dostaneme:

$$U_o = \sqrt{\frac{L_e}{C} i_{Dvyp.}^2 + U_c^2} \quad (5)$$

Veľkosť prepätia je možné znížiť zmenšením parazitnej indukčnosti L_e , zmenšením vypínaného prúdu $i_{Dvyp.}$, zmenšením napätia kondenzátora U_c v okamihu prerušenia prúdu a nakoniec zväčšením kapacity C. Zdalo by sa, že ak použijeme dostatočne veľký kondenzátor C, dá sa prepätie eliminovať na minimálnu mieru. To je pravda, ale okrem tejto skutočnosti je potrebné ešte uvážiť, že pri periodickej činnosti vypínania tranzistora sa musí na kondenzátore obnovovať počiatočná hodnota napätia U_c . Zabezpečiť to môžeme len takým spôsobom, že tranzistor pred opätovným prerušením prúdu zapneme minimálne na takú dlhú dobu, že sa kondenzátor C vybije z hodnoty prepätia U_o na hodnotu U_c . Spomínaný vybíjací proces pridáva k záťažnému prúdu tranzistora aj vybíjací prúd ochrany, čo môže zapríčiniť prekročenie dovolených maximálnych prúdových parametrov tranzistora. Pre obmedzenie špičky prúdu musí byť do série s kapacitou zapojený odpor R. Veľkosť tohto odporu by z hľadiska funkcie prepäťovej ochrany mala byť čo najmenšia, ale z hľadiska bezpečnosti tranzistora musí platiť:

$$R \geq \frac{U_o}{I_{max}} \quad (6)$$

pričom I_{max} je maximálny dovolený prúd chránenej súčiastky. Navyše sa musí zväžiť skutočnosť, že ak má ochrana správne pracovať, tranzistor musí zopnúť každú periódu aspoň na minimálny čas daný rovnicou:

$$t_{min} \geq RC \ln \frac{U_o}{U_c} \quad (7)$$

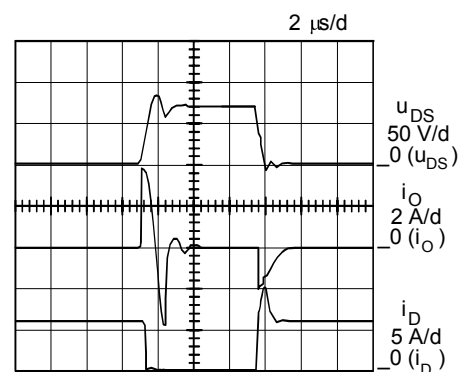
Na základe uvedených vzťahov je jasné, že ak sa snažíme o čo najväčšie využitie regulovateľnosti

spínania tranzistora, čo znamená skrátenie doby t_{min} na najkratšiu možnú dobu, tak požadujeme malú hodnotu odporu R, kapacity C, prepätia U_o a čo najväčšie počiatočné napätie kondenzátora U_c . Tieto požiadavky sú však protichodné, preto musíme voliť kompromis. Zvolíme primeranú dovolenú hodnotu prepätia U_o , ktorá je asi o 20 % až 30 % vyššia ako je hodnota napájacieho napätia U_{CC} zariadenia, ale ktorá zároveň predstavuje asi 80 % maximálneho dovoleného napätia tranzistora. Maximum nevolíme z bezpečnostných dôvodov, kvôli bezpečnostnej rezerve. V ďalšom si vypočítame z rovnice (6) potrebnú hodnotu odporu R. Za počiatočné napätie U_c na kapacite C sa volí také napätie ako je na zopnutom tranzistore, čo je najnepriaznivejší prípad, pretože kapacita sa vybíja najdlhšiu dobu. Na základe požiadavky regulačného rozsahu riadenia tranzistora stanovíme minimálnu dobu jeho zopnutia t_{min} a z rovnice (7) vypočítame hodnotu kapacity C. Túto hodnotu potom spolu s ďalšími aktuálnymi údajmi dosadíme do rovnice (5) a vypočítame veľkosť prepätia U_o . V prípade, že vypočítané prepätie je menšie než odhadované na začiatku, tak návrh je správny a ochranu možno realizovať. Ak vyjde prepätie väčšie ako predpokladané, tak postup návrhu zopakujeme, ale musíme svoje požiadavky znížiť. To znamená, dovoliť väčšie prepätie, väčší vybíjací prúd (čo súvisí s voľbou súčiastky) alebo dlhší minimálny čas zopnutia tranzistora. Pri realizácii konkrétnej ochrany volíme kondenzátor s čo najmenšou vlastnou indukčnosťou. Odpor výkonovo dimenzujeme tak, aby sa teplotne nezničil, preto musí spĺňať podmienku:

$$P_R \geq CU_o^2 f \quad (8)$$

Stratový výkon v prípade RC ochrany nie je zanedbateľný a zhoršuje účinnosť zariadenia.

Namerané priebehy zobrazujúce činnosť ochrany sú na Obr. 5. Na hornej stope je napätie kolektor - emitor tranzistora MOSFET. Prepätie má tvar sínusového charakteru, čo je spôsobené tým, že parazitná indukčnosť L_e a RC ochrana spolu vytvárajú RLC oscilačný obvod. Tomuto zodpovedá aj priebeh prúdu ochrany, ktorý vidíme na stope



Obr. 5 Namerané priebehy prepäťovej RC ochrany
Fig. 5 Measured waveforms of RC overvoltage protection circuit

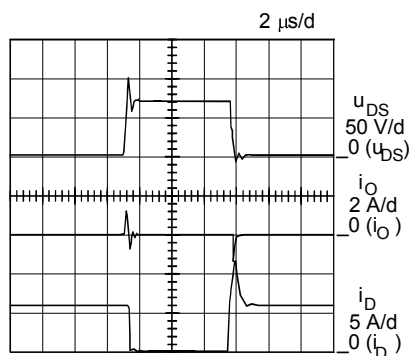
v strede. V okamihu vypínania tranzistora sa kondenzátor C prepäťovej ochrany kosinusovým kmitom prúdu nabíja, čo potvrdzuje existenciu oscilačného obvodu. Zapnutím tranzistora MOSFET sa kondenzátor C vybíja z hodnoty U_{CC} na svoju minimálnu hodnotu cez odpor R. Špička vybíjacieho prúdu je na stope v strede, vpravo. Taktiež na spodnej stope si všimnime, že sa táto špička prúdu pripočítava k záťažnému prúdu tranzistora. Situácia je však o to horšia, že sa v tomto okamihu pridáva k súčtu spomínaných prúdov ešte aj prúd od komutačného náboja nulovej diódy. Viditeľné je to z veľkosti špičky prúdu tranzistorom, ktorá je väčšia ako súčet záťažného prúdu a vybíjacieho prúdu RC ochrany.

Zdokonalenejším typom prepäťovej ochrany je ochrana RCD na Obr. 4 d). Jej výhodou v porovnaní s predchádzajúcim typom ochrany je, že je dynamicky rýchlejšia a chráni aj protu nadmernému nárastu du/dt , pretože prenos energie z parazitnej indukčnosti L_e na kondenzátor ochrany C prebieha cez diódu D, takže nie je spomaľovaný odporom R vytvárajúcim s kapacitou C časovú konštantu $\tau = RC$. Odpor R sa uplatňuje len pri vybíjaní kondenzátora C tým, že naďalej obmedzuje špičku vybíjacieho prúdu. Odporom prechádza len vybíjací prúd a jeho straty klesnú na polovicu, čo výrazne ovplyvní účinnosť zapojenia. Pre dimenzovanie odporu potom platí:

$$P_R \geq \frac{1}{2} C U_o^2 f \quad (9)$$

Postup návrhu hodnôt jednotlivých prvkov ochrany ako aj východiskové rovnice ostávajú rovnaké ako v predchádzajúcom prípade, až na uvedenú výnimku (9). Dimenzovanie diódy v RCD ochrane z hľadiska maximálnej hodnoty napätia a prúdu musí byť rovnaké ako chráneného tranzistora.

Namerané priebehy zachytávajúce činnosť ochrany sú uvedené na Obr. 6. Horná stopa opäť ukazuje priebeh napätia kolektor-emitor tranzistora MOSFET. Zasluchou vynechania odporu z nabíjacej cesty kondenzátora sa celý prenos energie z



Obr. 6 Namerané priebehy prepäťovej RCD ochrany

Fig. 6 Measured waveforms of RCD overvoltage protection circuit

indukčnosti L_e časovo skrátil. Na prostrednej stope je zobrazený priebeh prúdu kondenzátora ochrany. Pri vypínaní tranzistora MOSFET je nabíjací prúdový kmit kondenzátora a pri zapínaní tranzistora, vybíjací. Rovnako ako u predchádzajúcej ochrany aj tu sa vybíjací prúd pripočítava k záťažnému prúdu a prúdu od komutačného náboja nulovej diódy.

Ďalším typom prepäťovej ochrany je zapojenie podľa Obr. 4 e) označované aj ako ochrana fixačným napätím. Činnosť ochrany sa prejavuje v okamihu, keď potenciál kolektora tranzistora prekročí hodnotu napájacieho (ochranného - fixačného) napätia U_{CC} o hodnotu asi 0,6 V. V tom okamihu sa otvorá priepustne polarizovaná dióda D a odvádza energiu parazitnej indukčnosti L_e do kondenzátora C. Po odčerpaní energie indukčnosti sa dióda D uzatvára a kondenzátor C sa prostredníctvom odporu R začína vybíjať do napäťového zdroja s napätím U_{CC} . Pre dimenzovanie jednotlivých prvkov platia podmienky:

$$U_o = \sqrt{\frac{L_e i_{D, \text{vyp.}}^2}{C} + U_{CC}^2} \quad (10)$$

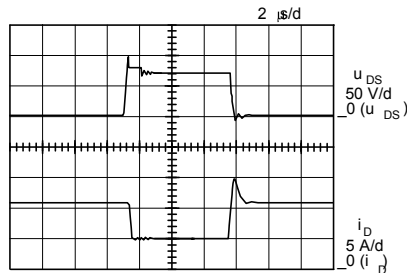
$$R \leq \frac{I}{f C \ln \frac{U_o}{U_{CC}}} \quad (11)$$

$$P_R \geq \frac{1}{2} C (U_o - U_{CC})^2 f \quad (12)$$

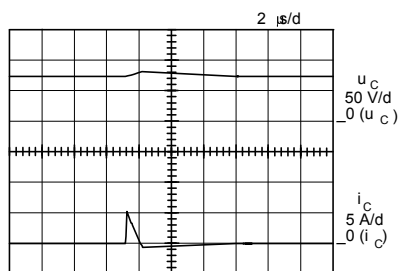
kde f je frekvencia spínania tranzistora, U_o je veľkosť prepätia, U_{CC} je veľkosť fixačného napätia a P_R je veľkosť stratového výkonu odporu R. Postup návrhu prvkov ochrany sa rovnako ako pri RC ochrane začína voľbou veľkosti prepätia (špičkovej hodnoty kolektorového napätia). Na základe rovnice (10) vypočítame veľkosť potrebnej kapacity C. Zo vzťahu (11) a požadovanej pracovnej frekvencie určíme veľkosť odporu R, pričom jeho výkonové dimenzovanie vyplýva z rovnice (12). Maximálne napäťové a prúdové parametre použitej diódy musia byť rovnaké ako chráneného tranzistora. Výhoda tejto ochrany spočíva v tom, že pre svoju činnosť nevyžaduje stanovenie minimálneho času zopnutia výkonovej súčiastky, čím sa zväčšuje možnosť jej regulačného rozsahu i znižuje možnosť poruchy činnosti ochrany. Dimenzovanie jednotlivých prvkov ochrany nie je navzájom medzi sebou až tak podmienené protirečivými požiadavkami ako pri ochranách RC a RCD, a preto je ľahšie realizovateľné. Priamym dôsledkom popísanej skutočnosti je lepšie prúdové a napäťové využitie chránenej súčiastky, pretože vybíjací prúd už neprechádza tranzistorom, a teda o to väčší môže byť záťažný prúd. Ochrana s pomocným napätím zaručuje nižšie prepätia a lepšie napäťové využitie súčiastky (súčiastka môže byť na nižšie napätie a menší prúd ako súčiastka s RC alebo RCD ochranou, pričom spína rovnaký výkon do záťaže).

Priebehy znázorňujúce popisované skutočnosti v reálnom, meranom obvode sú zachytené na Obr. 7 a Obr. 8 Na hornej stope Obr. 7 vidíme, že prepätie

v napätí kolektor - emitor tranzistora MOSFET dosahuje menšie hodnoty ako v predchádzajúcich prípadoch. Ochrana s pomocným napätím vyžaduje pre svoju spoľahlivú činnosť rýchlu diódu a kvalitný kondenzátor. Prepojenie týchto reálnych prvkov vnáša doobvodu určitú indukčnosť, čím sa účinnosť



Obr. 7 Napätie a prúd tranzistora MOSFET pri použití ochrany s pomocným napätím
Fig. 7 MOSFET collector voltage and current in overvoltage protection circuit based on auxiliary voltage method



Obr. 8 Napätie a prúd kondenzátora pri použití ochrany s pomocným napätím
Fig. 8 The voltage and current of capacitor in overvoltage protection circuit based on auxiliary voltage method

a spoľahlivosť ochrany znižuje. Evidentný dôkaz tejto skutočnosti je krátka napätiová špička v priebehu napätia tranzistora. Ďalšou podstatnou výhodou tejto ochrany je, že sa nabíjaním kondenzátora ochrany neovplyvňuje prirodzený priebeh napätia tranzistora, daný jeho vypínacími vlastnosťami. Na spodnej stope popisovaného obrázka je prúd tranzistora z už uvedených dôvodov menší ako v predchádzajúcich prípadoch. Na Obr. 8 a hornej stope je uvedené zväčšenie napätia ochranného kondenzátora v okamihu vypínania tranzistora a v ďalšom jeho pokles pri vybíjaní cez odpor R ochrany. Na spodnej stope toho istého obrázka je jasný dôkaz uvedenej skutočnosti, ktorý vyplýva z krátkeho kladného nabíjacieho prúdu kondenzátora a malého, dlho trvajúceho, záporného vybíjacieho prúdu.

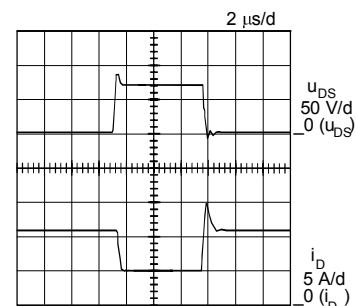
Ešte perspektívnejším a používaným typom prepäťovej ochrany výkonových polom riadených tranzistorov je zapojenie ochrany podľa Obr. 4 g). Na rozdiel od použitia takejto ochrany v spojení s BT, pri tranzistoroch MOSFET a IGBT, zapojená Zenerova dióda nemusí byť výkonová. Postačujúce

je ak jej maximálny prúd je okolo 200 mA. Do série s ňou zapojená dióda D musí byť dostatočne rýchla a jej záverné napätie musí byť väčšie ako amplitúda vstupných napätiových impulzov u_i . Želaná veľkosť priravného napätia Zenerovej diódy sa dá spoľahlivo získať sériovým zapojením viacerých vhodných nevýkonových Zenerových diód. Činnosť ochrany spočíva v tom, že po príchode nulového riadiaceho napätia u_i tranzistor vypína. V okamihu, keď napätie u_{DS} prekročí hodnotu napätia $U_{ZD} + u_{GS}$, Zenerovou diódou začne pretekať prúd, ktorý vytvorí na odpore R_1 úbytok napätia. V dôsledku toho dôjde k nárastu napätia u_{GS} a k "pootvoreniu" tranzistora MOSFET, ktorý sa v tomto okamihu správa ako výkonová Zenerova dióda. Priebeh výstupného napätia u_{DS} tranzistora MOSFET a jeho prúdu i_D je na Obr. 9. Špička v napätí u_{DS} dosahuje maximálnu hodnotu danú Zenerovým napätím použitej diódy. V tom istom okamihu nastáva predĺženie doby vodivosti prúdu i_D tranzistora MOSFET. Ochrana nemá vplyv na zmenu tvaru oboch sledovaných veličín počas zapínania tranzistora, čo je jej významná výhoda. Najdôležitejšia podmienka, ktorú musí ochrana spĺňať okrem toho, že dióda je schopná viesť špičkový prúd okolo 300 až 400 mA je:

$$1,2 * U_{CC} < U_{ZD} < 0,8 * U_{DSmax} \quad \text{resp.} \\ (0,8 * U_{CEmax}) \quad (13)$$

Požiadavka 20 percentnej rezervy zdola vyplýva z potreby najkratšej doby pôsobenia ochrany. Rezerva zhora je daná bezpečnosťou tranzistora pri existujúcich zmenách parametrov prívodných vodičov a ich parazitných indukčností.

Z hľadiska dimenzovania stratového výkonu je potrebné si uvedomiť, že prepätie pri vypínaní je približne rovnaké na tranzistore i Zenerovej dióde. Stratový výkon na jednotlivých súčiastkach je potom daný iba veľkosťou prúdu prechádzajúceho príslušnou súčiastkou. Z popisovania vlastností výkonových polom riadených tranzistorov vieme,



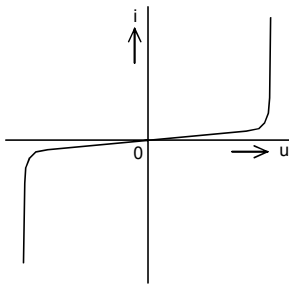
Obr. 9 Napätie a prúd tranzistora MOSFET pri použití ochrany so Zenerovou diódou zapojenou medzi kolektorom a hradlom

Fig. 9 MOSFET collector voltage and current in Zener overvoltage protection circuit

že pomer ich riadiaceho výkonu vzhľadom k výkonu spínanému je veľmi malý. Preto bude taktiež malý

i pomer strát na Zenerovej dióde riadiaceho obvodu v porovnaní so stratami na výkonovom tranzistore. Ak odhadneme najnepriaznivejší pomer riadiaceho a výkonového prúdu ako 1:20, tak sa aj straty budú deliť v tomto pomere. Keďže reálne môžeme s pomocou ofukovaného chladiča odvádzať zo spínacieho tranzistora maximálne straty o veľkosti 200 W, znamená to, že bez ďalších presnejších výpočtov volíme typ 10 W Zenerovej diódy. Takáto dióda je väčšinou v kovovom púzdre, nemusí sa upevňovať na žiadne chladiace teleso a postačuje jej „samochladienie“.

Najnovšími a najpoužívanějšími typmi zapojení prepäťových ochrán sa v poslednom čase stali zapojenia podľa Obr. 4 b) a 4 f). Tieto zapojenia sa nelíšia od zapojení so Zenerovými diódami. Podstatný rozdiel je len v použitej súčiastke. V tomto prípade je Zenerova dióda nahradená novou veľmi výhodnou súčiastkou - výkonovým varistorom. Základné vlastnosti výkonového varistora zistíme z voltampérovej charakteristiky, ktorá je na Obr. 10. Jedná sa o symetrickú súčiastku, teda ľubovoľným koncom „pripojiteľnú“ na kolektor



Obr. 10 Voltampérová charakteristika varistora
Fig. 10 V-A varistor characteristic

tranzistora. Odpor varistora je do určitej hodnoty napätia veľmi veľký, no stúpnutím napätia nad túto hodnotu sa strmo mení a stáva sa veľmi malým. V podstate sa charakteristika varistora podobá závernej charakteristike Zenerovej diódy. Princíp vzniku vodivého stavu je u oboch súčiastok podstatne rozdielny. Varistor je polykrystalická istiača súčiastka tvorená drobnými zrnkami materiálu (najčastejšie ZnO). Jednotlivé zrná sú od seba oddelené povrchovou bariérou, ktorá sa zmenšuje v závislosti na veľkosti elektrického poľa. Výstupnú charakteristiku varistora je možné vyjadriť vzťahom:

$$I = AU^\beta \quad (14)$$

pričom A a β sú konštanty dané typom materiálu a rozmermi varistora. Akonáhle stúpne napätie na varistore, klesne odpor varistora a energia prepätia sa odvádza paralelnou cestou mimo istenej súčiastky, čo je princíp činnosti ochrany na Obr. 4 b). Doba odozvy je krátka, iba okolo 25 ns. Jednotlivé varistory sa vyrábajú v širokom rozpätí napätí a majú veľkú schopnosť pohlcovania energie jedného impulzu, ktorá dosahuje až stovky Jouleov.

Avšak vzhľadom k menším rozmerom majú stredný stratový výkon v rozsahu niekoľkých Wattov. Z hľadiska výberu správneho typu varistora je potrebné dodržať nasledujúce podmienky:

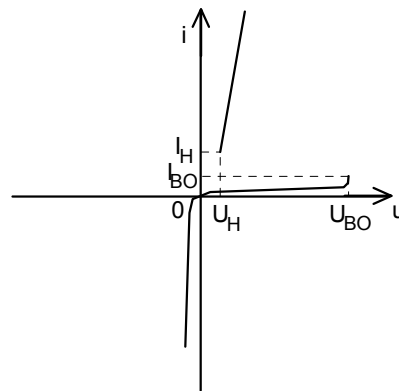
$$U_{CC} < U_{N(DC)} \quad (15)$$

$$U_{CEmax} \quad \text{resp.} \quad U_{DSmax} > U_C \quad (16)$$

$$P_{VAR} > \frac{1}{2} Li_{Dvyp}^2 \cdot f \quad (17)$$

Nominálne napätie $U_{N(DC)}$, pri ktorom tečie varistorom prúd 1 mA má byť o niečo väčšie ako napájacie napätie U_{CC} , ale zároveň maximálne napätie ochrany U_C (clamping voltage), väčšinou určené pre prúdový impulz 200 A a čas 8/20 μ s (8 μ s je čas náběhu impulzu a 20 μ s je čas po jeho poklesu na 50 %), musí byť menšie, ako maximálne dovolené napätie kolektora chráneného tranzistora. Taktiež musí byť zabezpečené, aby bol stratový výkon varistora väčší, ako stredný stratový výkon vnášaný do obvodu parazitnou indukčnosťou L_e . Ak by sa podmienka stratového výkonu nedala dodržať zapojením jedinej súčiastky, je možné použiť paralelné zapojenie viacerých súčiastok. V prípade zapojenia prepäťovej ochrany s varistorom podľa Obr. 4 f) je situácia v dimenzovaní podobná, len stratový výkon môže byť 20 násobne menší, pretože hlavné straty sa rozptýlia v chránenom tranzistore. Princíp sme už spomínali pri činnosti ochrany so Zenerovou diódou.

Iným typom polovodičovej súčiastky, ktorá je určená pre istenie proti prepätiam je prepäťová dióda BOD (Break Over Diode). Jej voltampérová charakteristika je zobrazená na Obr. 11. Ide o tyristorovú štruktúru malého výkonu bez riadiacej elektródy, teda diódový tyristor - spätné vodivý. Jednotlivé BOD diódy sa vyrábajú pre napätia do 1000 V. Použitie BOD diód v prepäťových ochránach sa realizuje väčšinou takým spôsobom, že sa pomocou nich zapína súčiastka ohrozená prepätím, čo vykonáva napríklad ochrana na Obr. 4 f) a 4 g). Svojou funkciou môžu, v tomto prípade, v plnej miere nahradiť výkonovú Zenerovú diódu.



Obr. 11 Voltampérová charakteristika BOD diódy
Fig. 11 V-A Characteristic of BOD diode

LITERATÚRA

- [1] Marcheuský, S.: Elektronické prvky, Alfa Bratislava, 1989
- [2] Kováč, D.: Napäťový striedač s výkonovými poľom riadenými tranzistormi pre napájanie asynchrónneho motora s kotvou nakrátko, kandidátska dizertačná práca, Košice, KEF EF VŠT, 1992
- [3] Kováč, D. - Šimková, I.: Spínanie jednovad-rantového impluzového meniča s výkonovým tranzistorom riadeným poľom, I. - zapínací proces, II. - vypínací proces, Elektrotechnický časopis, 1989, č. 7, č. 8
- [4] Kováč, D. - Šimková, I.: Vplyv nulových diód na celkové a spínacie straty výkonových poľom riadených tranzistorov, Elektrotechnický časopis, 1987, č. 11, str. 871-878
- [5] Lanáková, G. - Špánik, P. - Kopecký, P.: Návrh prepäťových ochrán výkonových polovodi-čových súčiastok, Práce a štúdie Žilinskej univerzity, séria elektrotechnická 24, EDIS Žilinská univerzita, Žilina, 1999, str. 9-21
- [6] Dobrucký, B. - Špánik, P.: Výkonové polo-vodičové meniče v Pspice Schematics, EDIS Žilinská univerzita, Žilina, 1999

BIOGRAPHIES

Kováčová Irena - She finished her studies in 1982 at the Technical University of Košice, Department of Electrical Drives, direction - Power electronics with excellent evaluation. From this time she has worked at the Department of Electrical Drives, first as assistant lecturer and now as associate professor. In 1988 she has got her doctoral diploma. In 1991 she has got the Award of Minister of Education for Development of Science and Technology. Her working interest is mainly focused to the field of power electronics, especially to the construction of converters and inverters with new perspective elements and computer simulation of new power semiconductor parts and devices.

Kováč Dobroslav - He finished his studies in 1985 at the Technical University of Košice, Department of Electrical Drives, direction - Power electronics with excellent evaluation. Then he worked as research worker at the Department of Electrical Drives. His research work was focused to the practical application of new power semiconductor devices. In 1989 he has got the Award of Minister of Education for Development of Science and Technology. From 1991 he has worked as assistant lecturer at the Department of Theoretical electrical engineering and Electrical measurement. He got his doctoral diploma in 1992 for the work on the field of power electronics. From 2000 he worked as professor and his working interest is now focused mainly to the field of computer simulation of power electronic circuits and automatized computer measuring.