

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Testování přepět'ových ochran
polovodičových součástek**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav KALČÍK**
Osobní číslo: **E11N0016K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Testování přepětových ochran výkonových polovodičových součástek**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o j v ý p r a c o v á n í :

1. Navrhnete měřicí pracoviště (silové a měřicí obvody včetně parametrů jednotlivých prvků, řídicí obvody, atd.), které by bylo vhodné pro demonstraci vzniku přepětí ve výkonových polovodičových měničích.
2. Navrhnete systém řízení experimentů, který by umožnil jednoduché nastavení parametrů měření (např. velikost vypínaného proudu, spouštění osciloskopu, atd.) pro testování různých typů přepětových ochran.
3. Funkčnost navrženého systému otestujete (dle možností laboratoře) na konkrétním zapojení výkonového obvodu s několika typy přepětových ochran. Dosažené výsledky zhodnotíte.
4. Provedte návrh laboratorního cvičení s ukázkou vzorového referátu.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. skripta z doporučených předmětů, elektronické zdroje


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Fořt, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vytvoření testovacího obvodu a otestování funkce polovodičových součástek určených k ochraně proti přepětí, které vzniká při vypínání výkonových polovodičů.

Klíčová slova

Test, přepětí, testovací obvod, varistor, transil, trisil, přepět'ové ochranné prvky,

Abstract

This study is aimed at creating a test circuit and test the function of semiconductor devices designed to protect against surges that occur while switching power semiconductors.

Key words

Test, surge test circuit varistor, transil, trisil, surge protective devices,

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 4.3.2013

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Fořtovi, Ph.D. za cenné rady, doporučení, připomínky a metodické vedení práce. Rád bych poděkoval všem vyučujícím i vedení fakulty za soustavnou přípravu k úspěšnému zakončení magisterského studia. Věřím, že se i nadále budeme setkávat na odborných akcích.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 PŘEPĚTÍ	10
1.1 PŘEPĚTÍ ZÁKLADNÍ POPIS	10
1.2 PŘÍČINY VZNIKU PŘEPĚTÍ	10
2 SOUČÁSTKY PRO OMEZENÍ PŘEPĚŤOVÝCH ŠPIČEK	11
2.1 SOUČÁSTKY PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY	11
2.2 TRANSIL	11
2.3 TRISIL	12
2.4 VARISTOR	13
3 NÁVRH MĚŘÍČÍHO PRACOVÍŠTĚ :	14
3.1 NÁVRH PROCOVÍŠTĚ	14
3.2 NÁVRH ŘÍZENÍ - SILOVÝ OBVOD	14
3.3 NÁVRH ŘÍZENÍ - ŘÍDÍČÍHO OBVODU	15
3.3.1 Volba řídicího napětí	15
3.3.2 Volba klopného řídicího obvodu, časování	15
3.3.3 Porovnávací člen	17
3.3.4 Snímač proudu	18
3.3.5 Driver pro řízení IGBT tranzistoru	18
3.4 FUNKČNOST SYSTÉMU	19
3.5 TESTOVÁNÍ MEZNÍCH HODNOT TESTERU	20
3.6 NÁVRH ŘÍZENÍ EXPERIMENTU – TESTŮ	26
4 TESTOVÁNÍ PŘEPĚŤOVÝCH OCHRANNÝCH PRVKŮ	27
4.1 ZÁKLADNÍ NASTAVENÍ PARAMETRU TESTOVACÍHO OBVODU PRO VŠECHNY POUŽITÉ PŘEP. OCHRANY : ..	27
4.2 TEST VARISTORU	27
4.3 TEST TRANSILU	29
4.4 TEST ZENEROVY DIODY	31
5 VZOROVÝ REFERÁT	33
ZÁVĚR	36
POUŽITÁ LITERATURA	37
PŘÍLOHY	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

Úvod

V dnešní době se pro spínání výkonových proudů používá stále více polovodičových spínacích prvků. Předkládaná diplomová práce pojednává o přepětí, které vzniká na polovodičových spínacích prvcích vlivem rychlého vypínání a vlivem parazitních indukčností vodičů silového obvodu v blízkosti spínacího prvku.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo navrhnout systém vzniku přepětí, navrhnout a vyrobit vhodné pracoviště pro demonstraci vzniku přepětí. Ověřit na vyrobeném pracovišti funkci navrženého testovacího obvodu a vytváření přepětí v laboratorních podmínkách. Součástí DP je také ověření účinnosti funkce některých typů přepětových ochran.

Poznatky z měření mají přínos pro konstruktéry při řešení návrhu výkonových vypínačů, měničů s ohledem na přepětí. Také pro volbu ochranných prvků proti přepětí a také pro konstrukci řídicích obvodů polovodičových výkonových spínačů.

Seznam symbolů

Symbol	Seznam symbolů použitých v diplomové práci	Jednotka
R	Ohmický odpor	[Ω]
C	Kapacita	[F]
L	Indukčnost	[H]
U_r	Dovolené provozní napětí	[V]
U_b	Blokovací napětí	[V]
U_{br}	Průrazné napětí	[V]
I_h	Vratný proud	[A]
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem - <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>	
V_{CC}	Napájecí napětí všeobecně	[V]
U_{CG}	Řídící napětí Gatu Tranzistoru	[V]
i_{CE}	Proud protékající mezi Colektorem a Emitorem	[A]
$i_{CCE\ MAX}$	Maximální proud jednoho pulzu	[A]
U_{CES}, V_{CES}	Maximální hodnota napětí - přepětí	[V]
u_L	Napětí indukčnosti	[V]
U_{CE}	Jmenovité napětí silového obvodu, Napětí (Colektor-Emitor)	[V]
Tx	Časová konstanta	[s]
U_H	Porovnávací napětí komparátoru	[V]
U_{GE}	Řídící napětí	[V]
$U_{Reak.max}$	Maximální reakční přepětí- maximální napětí při funkci ochrany	[V]
U	Napětí	[V]
t	Čas	[s]
di	Změna proudu	[A]
dt	Změna času	[s]

1 Přepětí

1.1 Přepětí základní popis

Přepětí je elektrické napětí, vyšší než nejvyšší povolené provozní napětí (nejvyšší napětí pro zařízení). Přepětí v elektrizační soustavě vzniká v důsledku provozních manipulací a změn, provázených přechodovými ději (např. tzv. spínací přepětí), v důsledku rezonance nebo v důsledku vnějších příčin (atmosférická přepětí). Elektrická zařízení jsou obvykle konstruována tak, aby vydržela určitou úroveň přepětí po určitou dobu. Proti přepětí, které by mohlo zařízení poškodit, je nutno zařízení chránit vhodnou ochranou.

Přepět'ová ochrana je zařízení, které zamezuje nebo omezuje vznik přepětí a zneškodňuje jeho účinky. Začne působit, když napětí v elektrizační soustavě převyšuje předem dané hodnoty.

Nejjednodušší přepět'ové ochrany se skládají z jednotlivých součástek, které lze souhrnně označit jako ochranné prvky, tzv. svodiče přepětí. Rozdělují se na:

- ochranná jiskřiště, (bleskosvody, zemní lana, ochranná jiskřiště, svodiče přepětí).
- průrazky,
- bleskojistky,
- Transily, Trisily, Zenerovy diody, lavinové diody, supresorové diody a speciální rychlé polovodičové součástky,
- v poslední době v sítích téměř výhradně používané varistory z kysličníků kovů (ZnO).

1.2 Příčiny vzniku přepětí

- Atmosférické přepětí-přímý, nebo nepřímý úder blesku
- Provozní přepětí vlivem přechodových dějů
 - přechodné děje při poruchových stavech, zejména při zkratech a zemních spojení
 - přechodné děje vzniklé při spínání a vypínání
 - přechodné děje při náhlé ztrátě zatížení (tzv. dynamické přepětí)

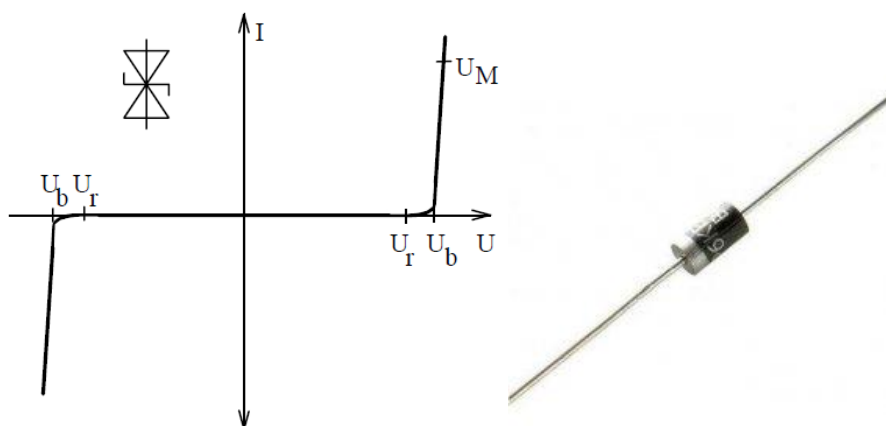
2 Souč'astky pro omezení přepět'ových špiček

2.1 Souč'astky přepět'ové ochrany

Nebezpečným druhem rušení v elektrických obvodech jsou přepětí, která vznikají přechodnými ději na vedeních, obvodech měničů i zátěži aj. Většinou se jedná o krátké a strmé napět'ové pulzy s nepříliš velkou energií. Klasické odporové a indukční spotřebiče obvykle neohrožují, mohou ale přepětím poškodit, nebo zničit polovodičové souč'astky. Zejména pro ochranu polovodičov'ych souč'astek byly v poslední době vyvinuty polovodičové prvky, které omezují velikost napětí na chráněném obvodu – transily, nebo souč'astky, které po příchodu přepětí vstup chráněného obvodu zkratují - trisily.

2.2 Transil

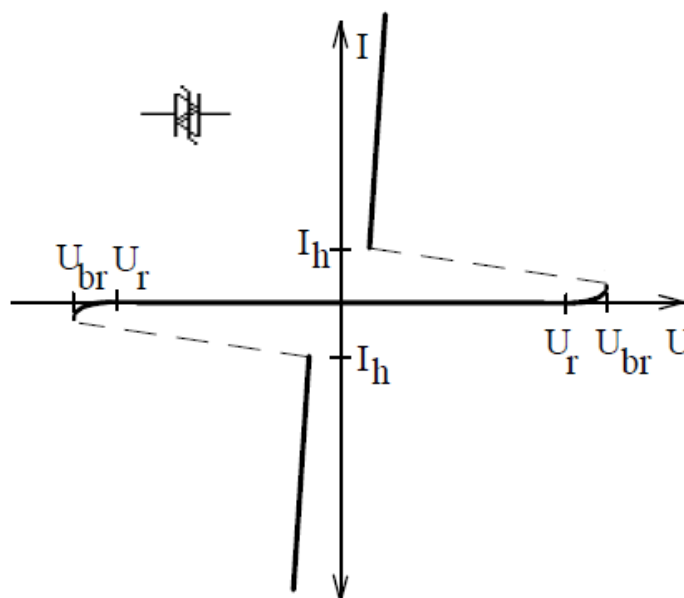
Transil se svojí voltampérovou charakteristikou, viz obr. 1, se podobá dvojici Zenerových diod v antisériovém zapojení. Dovolené pracovní napětí, přičemž transitem protéká jen zanedbatelný proud, je označováno jako U_r . Při překročení tohoto napětí na hodnotu U_b vzroste proud transilem na 1 mA a bezprostředně za tímto bodem charakteristika udržuje napětí na téměř konstantní hodnotě. Maximální možný proud, který souč'astka vydrží, je dán typem a odpovídá špičkovému výkonu 600 W až 15 kW při době trvání pulzu 1 μ s.



Obr. 1.- Voltampérová charakteristika Transilu s fotografií [5]

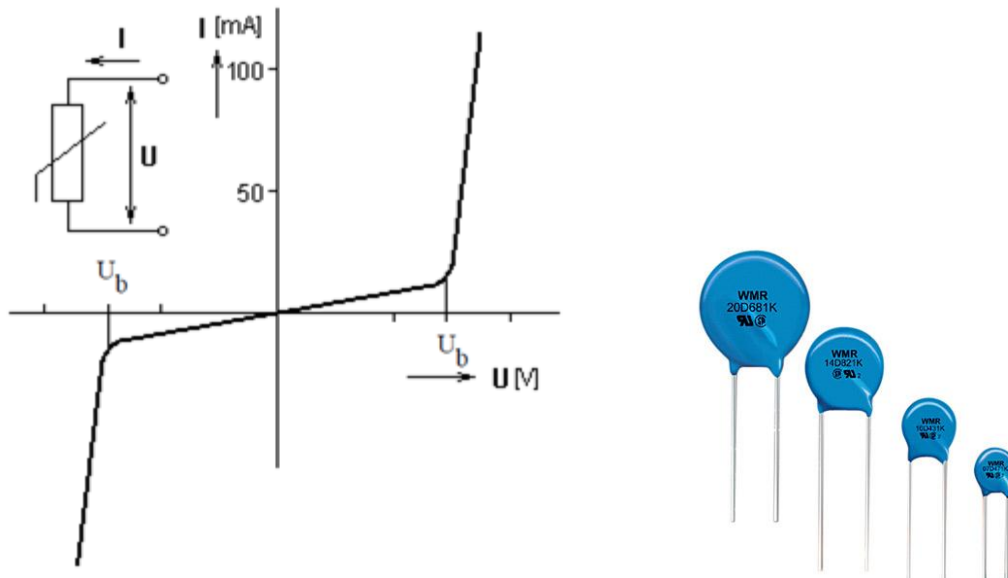
2.3 Trisil

Trisil je obdobou triaku spínaného překročením blokovacího spínacího napětí U_r až k hodnotě průrazného napětí U_{br} . Po jeho překročení součástka sepne a chová se stejně jako zapnutý triak. Vypíná teprve při poklesu proudu pod hodnotu vratného proudu I_h , která musí být způsobena jiným prvkem, který obvod např. rozezne (pojistkou). Úbytek napětí na trisilu v sepnutém stavu je kolem 1V. Blokovací (spínací) napětí U_{B0} je 50 až 400V, jedno pulzní proud v sepnutém stavu až 100A. Voltampérová charakteristika trisilu spolu s jeho schematickou značkou jsou na obr. 2. Obě součástky se vyznačují minimální dobou spínání a jsou tedy spolehlivou ochranou proti rychlým napět'ovým pulzům.



Obr. 2 - Voltampérová charakteristika Trisilu a značka [5]

2.4 Varistor



Obr. 3- Voltampérová charakteristika Varistoru s fotografií [5]

Varistory jsou nelineární odporové prvky, jejichž odpor je závislý především na přiloženém napětí. Vyrábějí se z kysličníku zinečnatého s příměsmi kysličníků chromu, kobaltu, manganu aj. Z kysličníků se lisují tyčinky nebo terčíky, které se spékají za vysoké teploty. Varistory mají při menším napětí velký odpor, řádově $10^6 - 10^7 \Omega$. Při zvýšení napětí na několik desítek až stovek voltů se proud varistoru prudce zvýší a jeho odpor prudce klesá. Příklad V-A charakteristiky varistoru je na obr. 3, kde Ochranné blokovací napětí U_b , ve voltampérové charakteristice je podle typu varistoru při napětí 25 až 1000 V. Dovolené výkonové zatížení varistorů je 1W. Nelineární charakteristika varistoru se využívá pro omezování přepětí při vypínacích a komutačních procesech.

3 Návrh měřícího pracoviště :

3.1 Návrh pracoviště

Pro měření bylo prvořadě sestrojito elektronický řídicí obvod který je schopen nasimulovat přepětovou špičku dostatečně velkou a vyhlazenou od kmitů. Požadavek byl na jednoduchost ovládání. Test spouštěn pouze jedním tlačítkem.

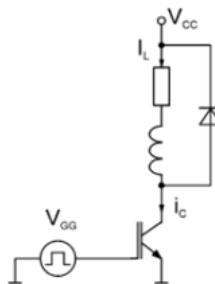
Pro vytvoření přepětové špičky jsem rozhodl využít přepětí vzniklé vlivem rychlého vypnutí silového obvodu po navýšení protékajícího proudu, podobně jako výkonových polovodičových měničů.

3.2 Návrh řízení - silový obvod

Podle myšlenky je navození sepnutého stavu IGBT tranzistoru krátkým řízeným impulzem (V_{CG}), až do navýšení protékajícího proudu (i_{CE}) IGBT tranzistorem a silovým obvodem. Do hodnoty proudu nepřevyšující maximálního proudu IGBT tranzistoru.

Z hlediska spínacího prvku, dojde k otevření IGBT tranzistoru a tím ke snížení napětí na svorkách IGBT tranzistoru k hodnotám nuly (mezi svorkami C-E). Po nárůstu spínacího proudu, dojde k opětovnému vypnutí (uzavření) IGBT tranzistoru a tím se z nulového napětí na svorkách IGBT tranzistoru (C-E) vytvoří vlivem nahromaděného náboje v parazitní indukčnosti a samotné spínané indukčnosti přepětí na spínacím prvku.

Limitující pro návrh silového obvodu, jsou mezní hodnoty proudu, ale i maximální napětí. (V_{CES}).



Obr. 4- Schéma silového testovacího obvodu. [12]

Zadáním práce bylo, také provést testování přepětových ochran výkonových polovodičových součástek, tímto postupem sepnutí indukčnosti IGBT tranzistorem docílíme přepětí (přepětové vlny, špičky) řádově tři násobku jmenovitého provozního napětí spínaného silového obvodu s indukčností dle vztahu pro přechodový děj při sepnutí indukčnosti.

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (1.)$$

Kde u_L - napětí na indukčnosti

L - indukčnost

di - změna proudu

dt - změna času

Na vytvořeném přepětí lze testovat součástky sloužící k ochraně proti přepětí.

Ke svorkám IGBT tranzistoru (kolektor,emitor) je paralelně připojena součástka pro ochranu proti přepětí (varistor, transil, trisil).

Předpokladem součástek pro ochranu proti přepětí je omezení hodnoty přepětí na hodnotu mírně vyšší než hodnotu jmenovitého napětí spínaného silového obvodu s indukčností.

3.3 Návrh řízení - řídicího obvodu

3.3.1 Volba řídicího napětí

Prvořadý krok pro návrh řídicího obvodu je jmenovité řídicí napětí. Nejnižší možné, ale zároveň dostatečné pro ovládní IGBT Tranzistoru. Jmenovitá hodnot řídicího napětí (V_{GE}) byla zvolena na stejnosměrné 15V.

3.3.2 Volba klopného řídicího obvodu, časování

Pro řídicí testovacího obvodu bylo navrženo zapojení klopných obvodů, který je blokově zobrazen na obr. 5.

Základem řídicího obvodu je CMOS – monostabilní klopní obvod CD4098BMS. Tato součástka poskytuje dva nezávislé klopné obvody s možností časového nastavení. Časová konstanta (T_x) vypočítaná podle vztahu:

(2.)

$$T_x = \frac{R_x \cdot C_x}{2}$$

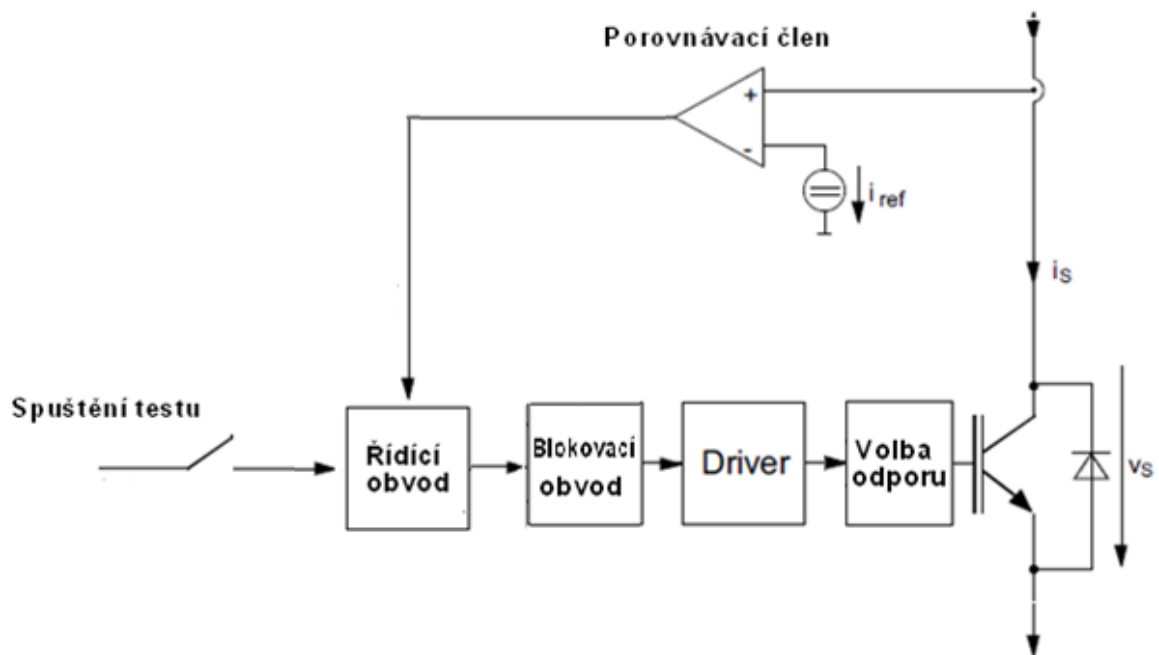
Kde T_x - časová konstanta klopného obvodu

R_x - vstupní odpor pro časovač

C_x - vstupní kapacita pro časovač

$$T_x = \frac{180000 \cdot 0,0000001}{2} = 9 \text{ ms.}$$

Po spuštění testu ovládacím tlačítkem zajišťuje T_x maximální čas spínaného impulsu IGBT tranzistoru. Časová konstantu využíváme pro přerušení testu v případě nedosažení proudu silového obvodu.



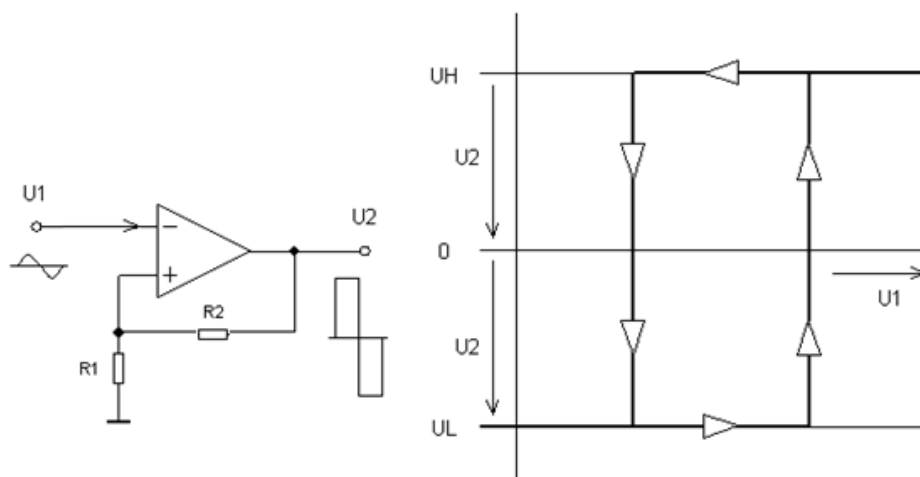
Obr. 5- Blokové schéma řídicího testovacího obvodu

Impulz je v prvotní fázi ověřování funkčnosti přiveden z logického výstupu ke komparátoru, ve kterém je porovnán s nastavenou hodnotou na logického vstupu (velikosti napětí mezi vstupy). Výstupem je logický impuls 1-0, které je přivedeno k druhému monostabilnímu klopnému obvodu, jež slouží jako blokující klopný obvod, pro vypnutí silového obvodu a blokování opětovného spuštění testu. Kde je nastavena časová konstanta, dle stejného vztahu pro T_x .

3.3.3 Porovnávací člen

Komparátor porovnávací operační zesilovač zvolen: LM 393.

Na výstupu z komparátoru, bylo důležité zajistit signál bez zákmitu, proto byl navržen komparátor s hysterezí – Schmitův klopný obvod.



Obr. 6- Schmitův klopný obvod, znázorněná hystereze [3]

Schmitův klopný obvod vznikne po doplnění klasického komparátoru kladnou zpětnou vazbou. Tak vznikne dvoustavový klopný obvod s hysterezí. K překlopení Schmitova klopného obvodu dochází, je-li napětí mezi rozdílovými vstupy nulové. To je splněno je-li **vstupní napětí U_H** rovno výstupnímu napětí rezistorového děliče. Dle vztahu:

(3.)

$$U_H = U_0 * \frac{R_1}{(R_1 + R_2)}$$

$$U_H = 10 * \frac{18000}{(18000+6500)} = 7,34 \text{ V}$$

Tímto zapojením odstraníme nežádoucí zákmity výstupu z komparátoru při blízkosti porovnávaných napětí z naměřeného proudového snímače.

3.3.4 Snímač proudu

Měřicí pracoviště bylo navrženo tak, aby dokázalo jednoduchou změnou nastavení trimru na řídicím CMOS- monostabilním klopném obvodu získat časový úsek ve kterém musí dojít k sepnutí silového obvodu a k nárůstu proudu silovým obvodem, který zaznamená připojený proudový snímač. Pro testovací obvod je zvolen **snímač proudu LEM- LA 55**. Snímač LA-55 splňuje požadavky testu hodnota měřeného primárního proudu je 50A, ale jmenovité napájecí napětí je dvojnásobné než jmenovité napětí řídicího obvodu. Tento problém se odstranil použitím dvou stejných stejnosměrných stabilizovaných zdrojů 15V. Lze použít i speciální zdroj s vyvedením uzlu středního nulového bodu. Vývody s napětím +15V, 0V, -15V.

3.3.5 Driver pro řízení IGBT tranzistoru

Driver pro funkčnost spínání je zvolen budič TC4427, který je kompatibilní k IGBT tranzistor IRG4BC30K. IGBT tranzistor IRG4BC30K splňuje ovládací napětí $V_{GE}=15V$ a Spínané napětí silového obvodu $V_{CES}=600V$, proud silového obvodu jedním pulzem $I_{CE MAX}=58A$ při $V_{GE}=15V$

Návrh testovacího obvodu v bodech.

- a) Prvním krokem byl návrh principu spínání silového obvodu, tak aby došlo k vytvoření přepětí měřitelného osciloskopem.
- b) Návrh jmenovitého napětí řídicího obvodu.
- c) Výběr elektronických součástí řídicího obvodu.
- d) Kroky k nastavení funkčnosti jednotlivých součástí obvodu.
- e) Vytvoření návrhu obvodu v elektronické formě.
- f) Vytvoření šablony pro výrobu plošného spoje řídicího obvodu.
- g) Výroba a následné ověření funkčnosti řídicího obvodu.
- h) Měření a zaznamenání průběhu napětí na spínacím prvku silového obvodu.
- i) Měření a zaznamenání průběhů napětí při použití přepětových ochranných prvků.

3.4 Funkčnost systému

Navržený obvod byl sestaven nejdříve na nepájeném poli, kde byl otestován zamýšlený teoretický princip.

Prvořadě bylo ověřit řízení pro sepnutí IGBT tranzistoru tak, aby při nárůstu proudu došlo k opětovnému vypnutí a tím došlo ke vzniku přepětové špičky vlivem spínané indukčnosti, obr. 7 a obr. 8. Přepětí je způsobeno parazitní indukčností v blízkosti spínacího IGBT Tranzistoru a nahromaděním el. energie ve spínané indukčnosti.

Pro testovací obvod byly použity dva stabilizované zdroje BS 554, které byly zapojeny, na svorky testovacího obvodu $V_{cc} = +15V$, $GND=0$, $V_{dd} (V_{CC-}) = -15V$.

Pro silový obvod použit stabilizovaný proudový zdroj NP 9615, na kterém silové napětí $U_{CE} = 30V$.

Připojení osciloskopu je provedeno na silové desce plošných spojů v těsné blízkosti svorek IGBT tranzistoru OUT 6, OUT 8.

Ověření funkčnosti, bylo sepnutí bez proudové zátěže silového obvodu. Testovaný obvod byl sepnut podle časového nastavení CMOS – monostabilní klopní obvodu. Nastavením trimru R4 pro řízení času je nastaven čas do 40 μs .

Připojením proudového zdroje do silového obvodu obr. 9, a spuštěním cyklu tlačítkem S1, byla otestována funkčnost snímače proudu LA-55 a reakce testovaného řídicího obvodu, na dosažený nastavený proud IGBT Tranzistorem. Vyobrazením, obr.7, průběh sepnutého cyklu na osciloskopu, je patrné v čase $T=1,5ms$, zaznamenán průběh napětí po sepnutí IGBT tranzistoru (pokles napětí $U_{CE} = 0V$) a opětovném vypnutí ($U_{CE} = 30V$). Na obr.7 je dále zobrazen průběh proudu silovým obvodem, který dosáhl při testu $i_{CE} = 16,3A$. Na obr. 8., je zobrazeno přiblížení pohledu náběžné hrany, kde je patrné přepětí vlivem vypnutí IGBT Tranzistoru. Hodnota přepětí mezi C-E Tranzistoru, při jmenovitém napětí silového obvodu $U_{CE} = 30V$ dosáhla přepětí $U_{CES} = 102V$.

Pro řízení velikosti a tvaru přepětové špičky je použit přepínač odporů (SW 1) pro spínání IGBT Tranzistoru do Gatu. Na obr. 9. Jsou viditelné průběhy přepětí při volbách přepínačem SW 1.

Pro plynulou volbu rychlosti sepnutí IGBT lze použít, také Trimer R4.

Tab. 1.

Velikost přepětí volbou přepínače SW 1, při jmenovitém napětí silového obvodu $U_{CE} = 30\text{ V}$

Předřazený odpor Gatu [V]	Velikost přepětí [V]
10Ω	102V
22Ω	97V
33Ω	84V
47Ω	68V

Postupným zvyšováním odporu je ověřeno, že dochází k menší spínací rychlosti a tím i pomalejší a nižší hranice přepětí špičky.

Pro potřeby testování součástek k ochraně proti přepětí je potřebné docílit velikosti přepětí tak, aby bylo možné testované součástky vyzkoušet nareakci vzniklého přepětí, proto byl maximální předřadný odpor Gatu IGBT Tranzistoru zvolena 47 Ω . Při 47 Ω předřadného odporu Gatu a 30V napájecího napětí silového obvodu jsme docílili velikosti přepětí 68 V to znamená, že už dále nemá smysl zvyšovat hodnotu odporu do Gatu. Pro naše účely, jsem proto do obvodu aplikoval maximální odpor 47Ω.

Postupnou změnou, jsem si ověřili reakce předřadného odporu Gatu. Testovací obvod nabízí možnost regulovat rychlost spínání IGBT tranzistoru a tím i velikost přepětí, také plynulým nastavením trimru komparátoru R4, Regulací R4 docílíme stejného efektu, pokud použijeme nejnižší odpor do Gatu, tj. 10 Ω. Postupným zvyšováním odporu trimru R4 do komparátoru docílíme stejných hodnot přepětíových špiček silovém obvodu.

3.5 Testování mezních hodnot testeru

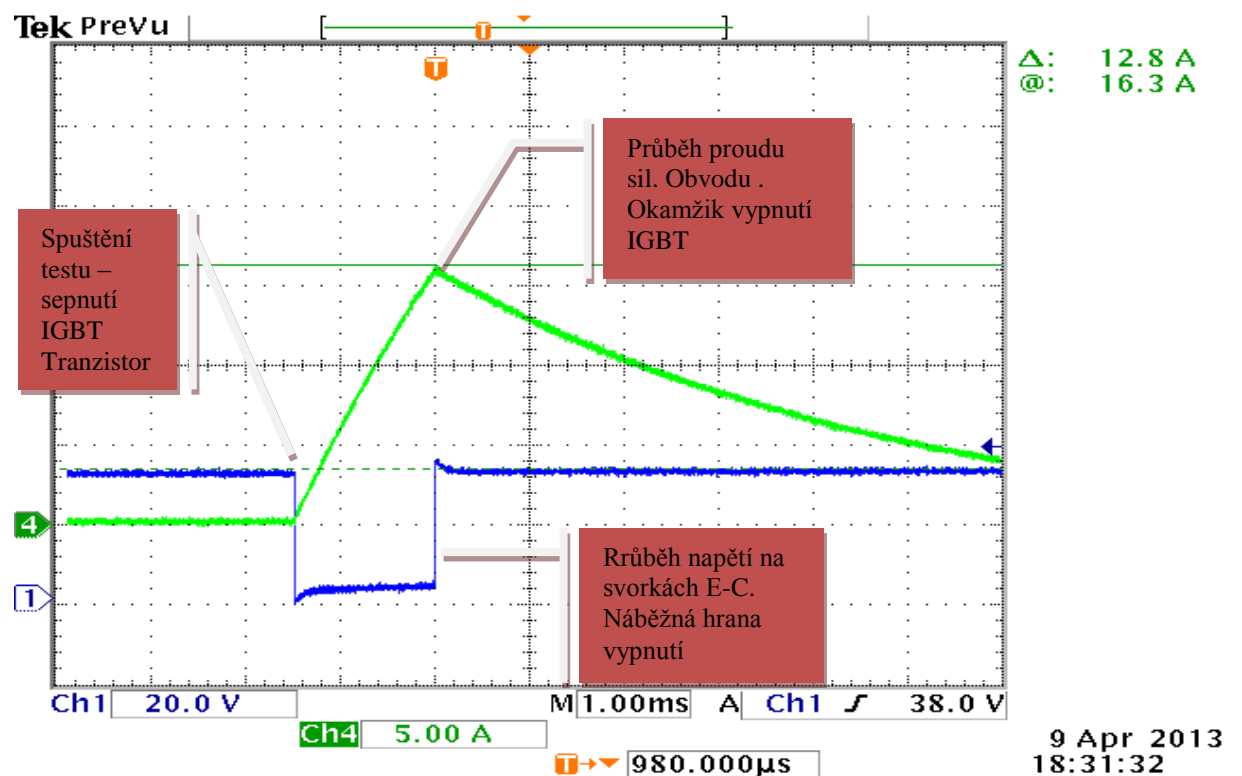
Pro testování mezních hodnot testovacího obvodu jsem snížil napětí silového obvodu z 30V na 20V a otestoval řadu předřadných odporů Gatu. Porovnáním se zjistilo pouze snížení přepětíových špiček při stejném času respektive době trvání přepětí. Pro naši potřebu dostačovalo napětí silového obvodu napájeného $U_{CE} = 30\text{ V}$.

Pro navržení plošného spoje silového obvodu, spínacího prvku (IGBT tranzistoru), bylo důležité umístit součástky co nejbližší u sebe, aby tím byla omezena parazitní indukčnost na vodičích silového obvodu.

Obvod se podařilo vyřešit ve velké blízkosti součástek, kde byli parazitní indukčnosti minimální. Pro ověření vlivů parazitních indukčností jsme použili 5 cm izolovaného vodiče připojeného sériově do obvodu od emitoru ke zdroji.

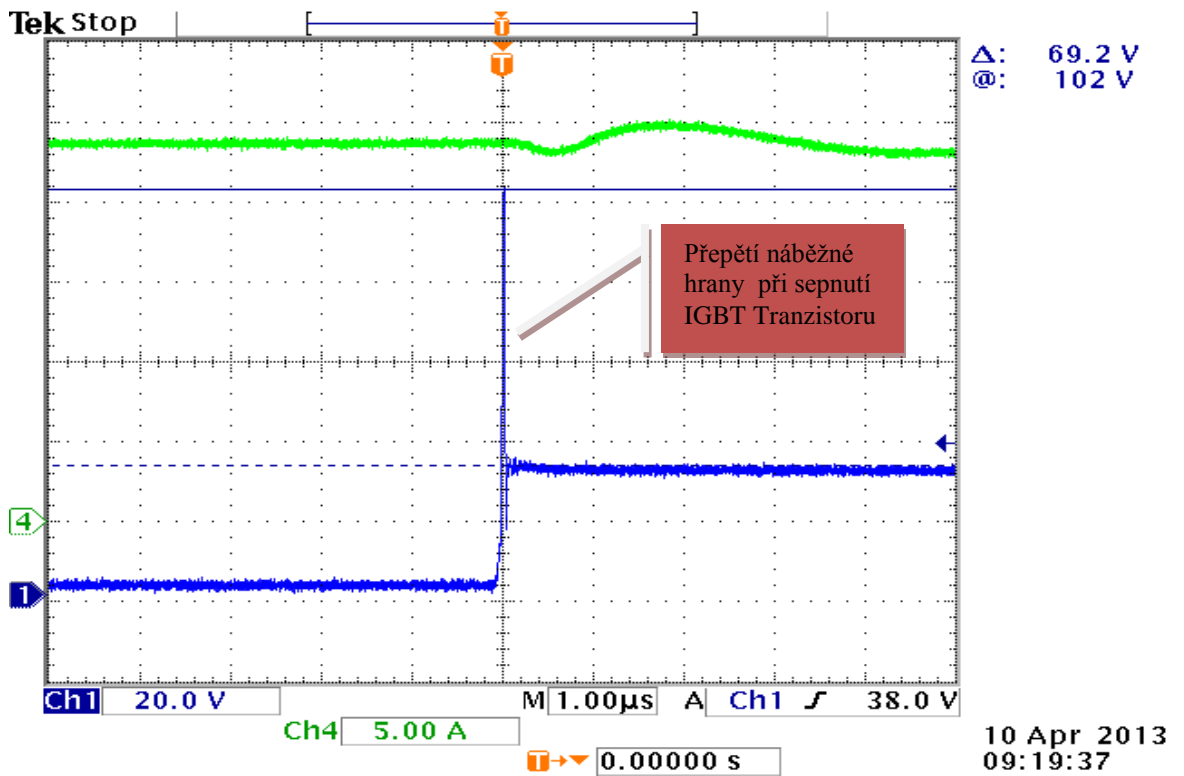
Tímto pokusem jsme zvýšili parazitní indukčnost. V blízkosti polovodičového spínacího prvku IGBT tranzistoru mezi kolektorem a emitorem se zvýšilo přepětí při stejných parametrech obvodu až na $U_{CES} = 190\text{V}$.

Dle výrobce IGBT tranzistoru je maximální spínací špička 600V, ale pro náš testovací obvod nebylo potřebné dosahovat velikosti krajních hodnot spínacího prvku.

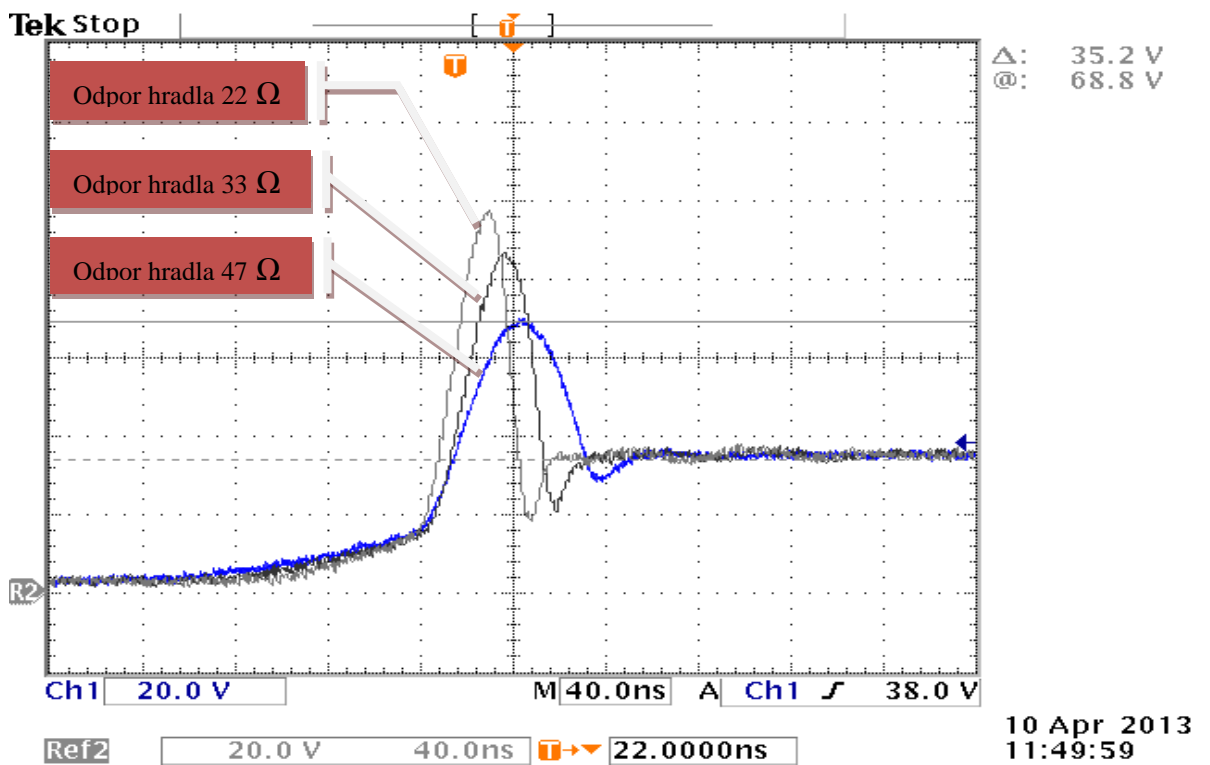


Obr. 7- Průběh spínacího cyklu silového obvodu 4-proud, 1- napětí na IGBT

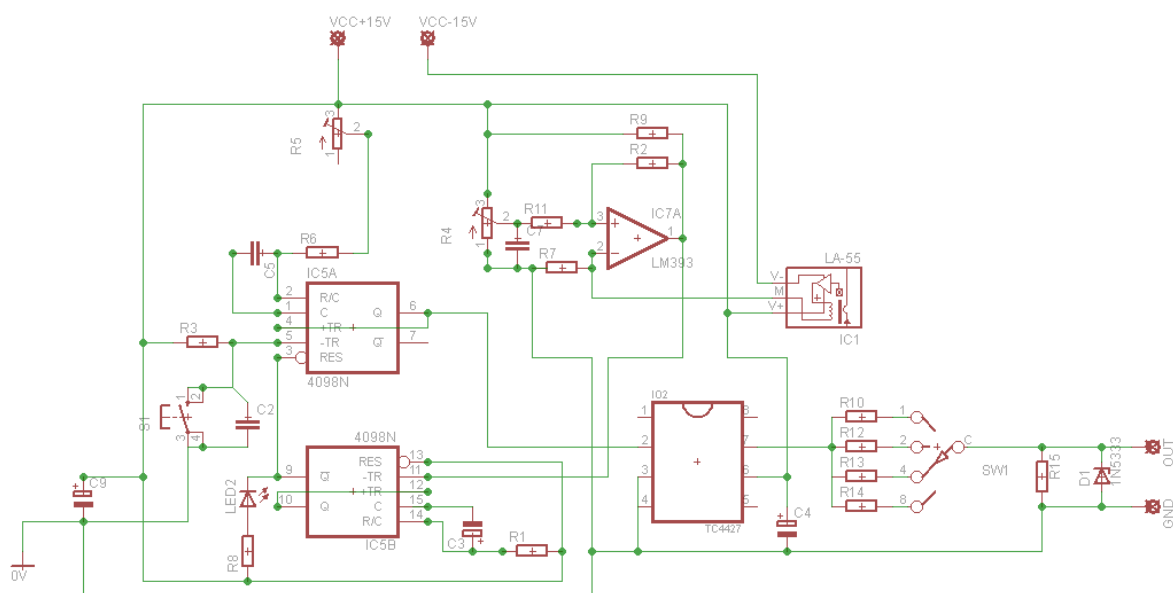
Viditelný nárůst proudu $i_{CE} = 16,3\text{A}$



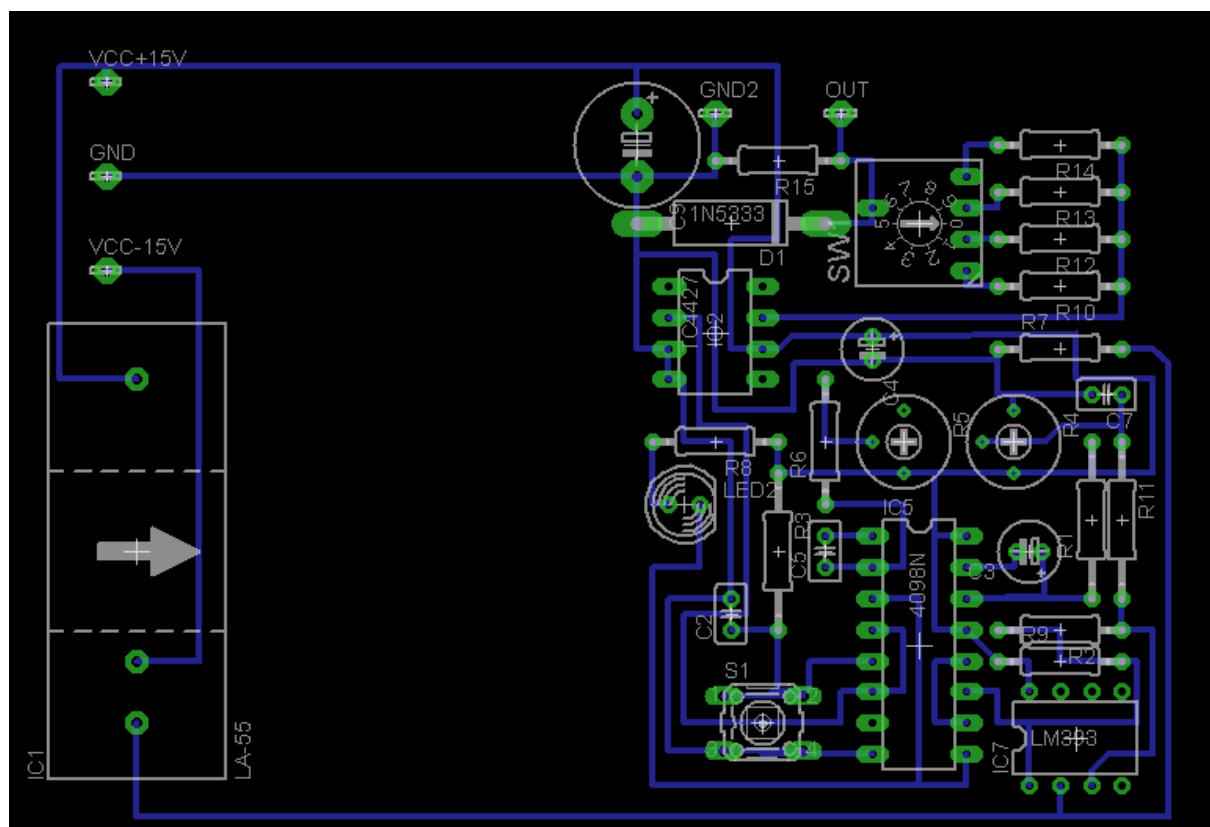
Obr. 8- Přiblížení náběžné hrany při vypnutí IGBT, 4-proud, 1- napětí
Viditelné přepětí $U_{CES}=102V$



Obr. 9- Průběh přepětí pro rozdílné hodnoty odporu do Gatu, volených přepínačem SW 1



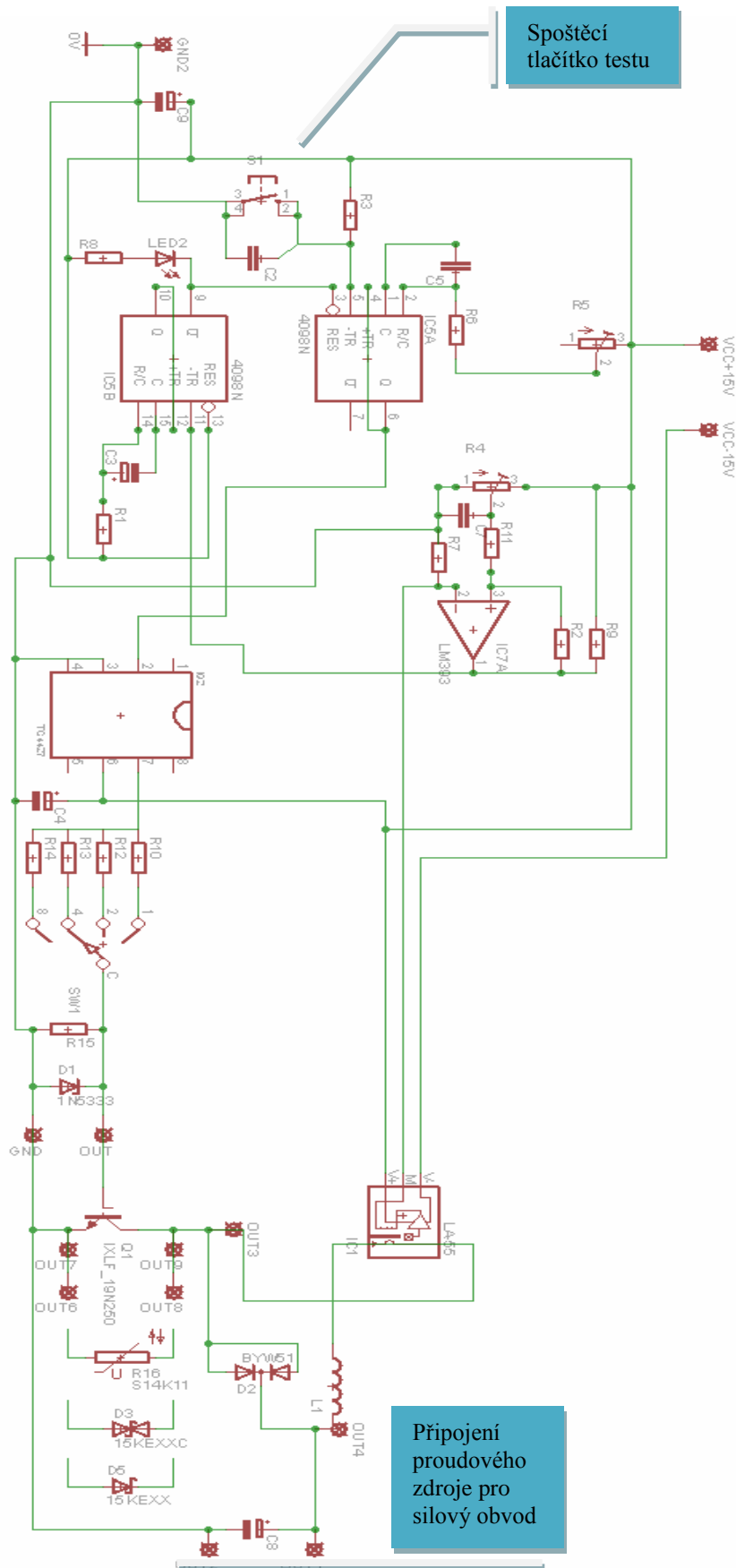
Obr. 10- Schéma zapojení řídicího obvodu



Obr. 11- Návrh plošného spoje řídicího obvodu v programu EAGLE

Tab.2. Výpis součástek pro testovací obvod:

Název součástky	Označení součástky	Hodnota
Rezistor R1	R1	100 K Ω
Rezistor R2	R2	18 K Ω
Rezistor R3	R3	25 K Ω
Rezistor nastavitelný R4	R4	50 K Ω
Rezistor nastavitelný R5	R5	810 k Ω
Rezistor R6	R6	5,1 K Ω
Rezistor R7	R7	100 Ω
Rezistor R8	R8	5,1 K Ω
Rezistor R9	R9	3,9 K Ω
Rezistor R10	R10	10 Ω
Rezistor R11	R11	680 Ω
Rezistor R12	R12	22 Ω
Rezistor R13	R13	33 Ω
Rezistor R14	R14	47 Ω
Rezistor R15	R15	51 K Ω
Kondenzátor Capacitor	C2	1nF
Kondenzátor elektrolytický	C3	100 μ F, 16V
Kondenzátor elektrolytický	C4	22 μ F, 35V
Kondenzátor Capacitor	C5	100 nF
Kondenzátor Capacitor	C7	4,7nF
Kondenzátor elektrolytický	C8	10 mF, 63V
Kondenzátor elektrolytický	C9	100 μ F, 36V
Zenerova Dioda	D1	1N 5333
Světelná Dioda	LED 2 červená	
Klopný obvod, Komparátor	LM 393	LM 393
Klopný obvod, CMOS Log.	CD 4098 BE	CD 4098 BE
Driver IGBT	TC 4427	TC 4427
IGBT Tranzistor	IXLF	IRG 4 BC 30K
Proudový snímač	LA 55	LEM – LA 55P
Dioda	D2	BYW51 Alternativa je (BYV 42 E)



Obr. 12- Schema zapojení celého testovacího pracoviště

3.6 Návrh řízení experimentu – testů

- Po připojení napájecího stejnosměrného napětí +15V, 0V, -15V
- Připojení napájení silového obvodu stejnosměrným napětím +30V
- Připojení Osciloskopu ke svorkám OUT6, OUT8
- Přepínačem SW 1 navolíme stupeň rychlosti sepnutí (volbou připnutého odporu do G Tranzistoru)
- Sepnutím tlačítka S1 se sepne krátce na přibližně 1,5ms IGBT Tranzistor
- Dojde k navýšení protékajícího proudu
- Proudový senzor LA 55 navýší proud do komparátoru LM 393
- Komparátor překlopí a signál přejde ke druhému klopnému obvodu v CD 4098, který slouží jako blokující.
- Na blokujícím klopném obvodu je nastaven čas blokování 4s, slouží k blokování proti náhodnému opětovnému spuštění testu.
- Po dobu testu (od spuštění tlačítkem do ukončení času blokování) svítí signalizační světelná dioda.
- Na oscilátoru nejprve zobrazíme průběh podle **obrázku**
- Přiblížením náběžné hrany při vypnutí IGBT tranzistoru osciloskop zobrazuje viditelné přepětí **obr. ...**
- Velikost přepětí změřit a zaznamenat, případně uložit zobrazení v osciloskopu
- Postupným přepínáním SW jsou v zobrazení osciloskopu rozdíly v rychlosti a velikosti přepětí na svorkách C-E.
- Pro vhodnost zjištění reakce ochrany zvolíme od nejpomalejší rychlosti sepnutí (odpor do G 47Ω) až po nejrychlejší (odpor do G 10Ω) Hodnota 10Ω je minimální dle dokumentace výrobce.
- Volba rychlosti sepnutí pro dostatečné přepětí pro zjištění reakce ochrany.
- Připojení konkrétního ochranného prvku ke svorkám OUT7, OUT9.
- Spuštění nového testu tlačítkem S1.
- Zaznamenání reakce ochranného prvku na přepětí. Změření skutečného reakčního napětí a velikost reakčního překmitu.
- Vyhodnocení reakcí ochranných prvků a výběr nejúčinnějšího ochranného prvku.

4 Testování přepět'ových ochranných prvků

4.1 Základní nastavení parametru testovacího obvodu pro všechny použité přepět'ové ochrany :

Napájecí napětí řídicího obvodu 2x 15V SS

Řídicí napětí Gatu IGBT Tranzistoru $U_{GE} = 15V$

Napájecí napětí silového spínaného obvodu $U_{CE} = 30V$.

Předřadný odpor Gatu 22Ω –maximální přepětí $U_{CES} = 102V$

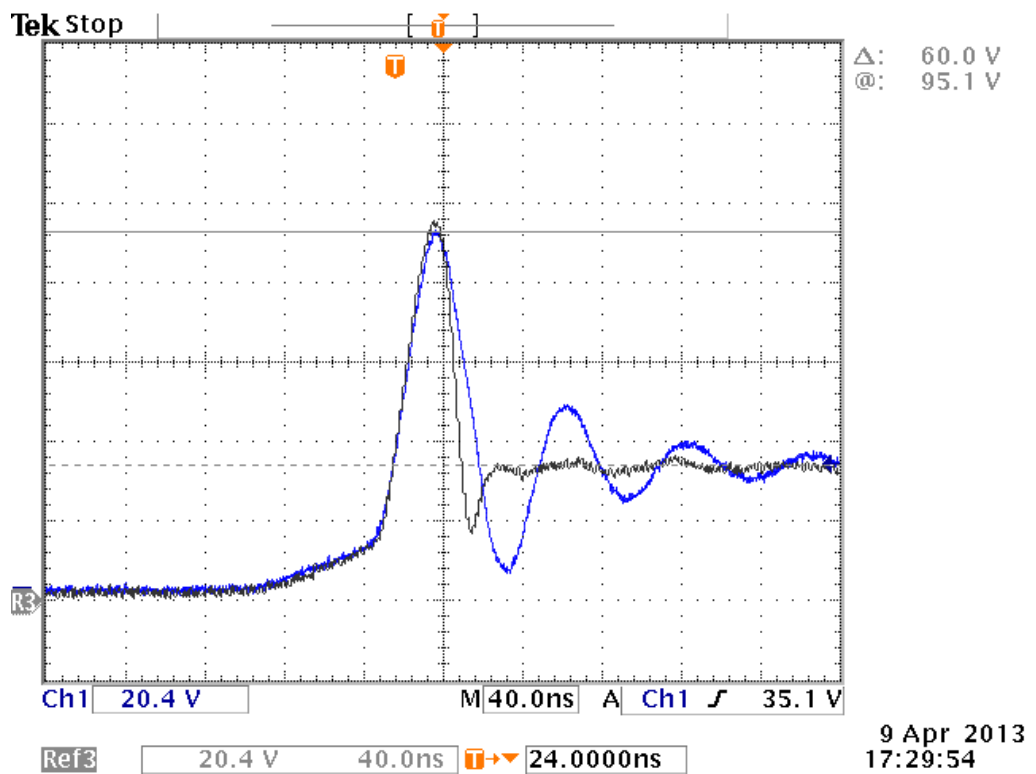
4.2 Test varistoru

Připojením varistorů mezi svorky IGBT tranzistoru emitor a kolektor by se měl docílit snížení přepět'ové špičky na hodnoty udávané výrobcem varistorů.

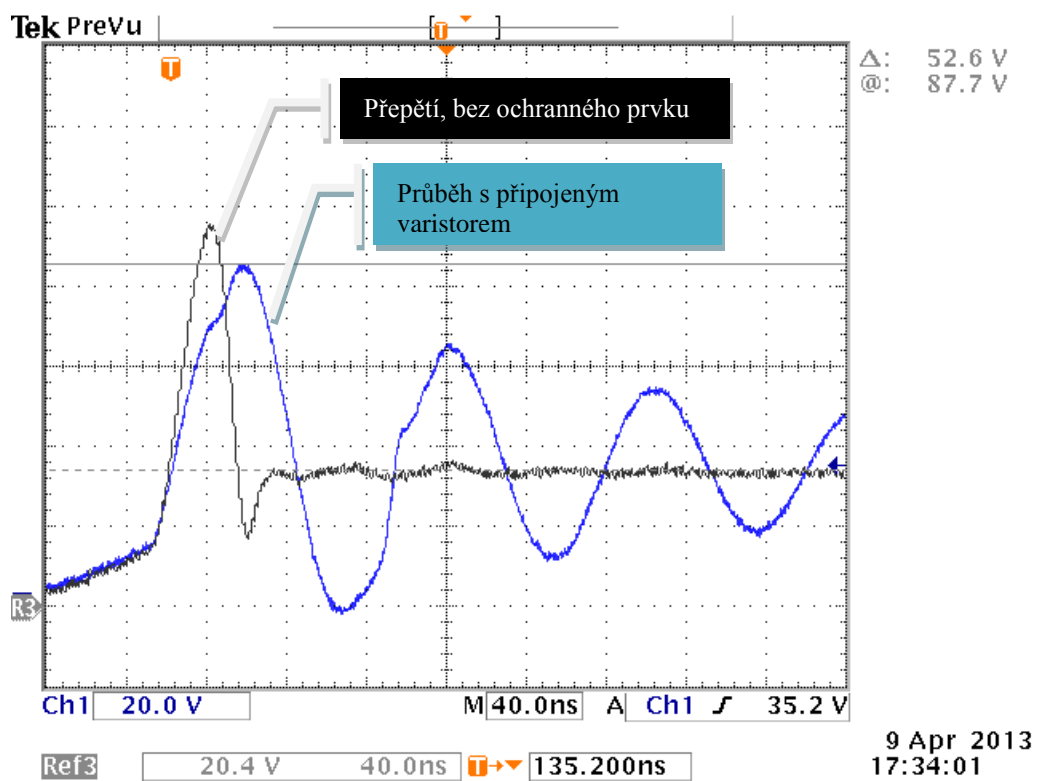
Pro náš test bylo zvoleno jmenovitého napětí silového obvodu stanoveného na 30V. Varistory byly použity VCR 07D47 0K a VCR 14N101.

Varistor VCR 07D47 $U_{br} = 47V$ průměr 9,0x 4,9mm. Průběh přepětí na svorkách Emitor-colektor zobrazuje obr.13, kde černou barvou je znázorněn průběh bez použití přepět'ové ochrany, to dosahovalo hodnot $U_{CES} = 102V$ Předřadný odpor hradla Gatu je 22Ω . Modrá barva znázorňuje průběh napětí s použitím varistoru VCR 07D47. Porovnáním průběhu je patrné rozkmitání přepětí při připojení Varistoru a nedostatečná reakce na přepětí (omezení přepětí nenastalo). Blokovací napětí dle výrobce je udáno $U_{br} = 47V$. Naměřeno, bylo maximální dosažené přepětí (Reakční přepětí $U_{reak.max.} = 95V$)

Připojení Varistoru VCR 14N101 , $U_{br} = 100V$, průměr 16,50x 4,9mm, je zobrazeno na obr. 14. Kde černou barvou je znázorněn průběh přepětí bez ochrany. Modrou barvou je znázorněn průběh s připojeným varistorem. Bez použití přepět'ové ochrany $U_{CES} = 102V$ Předřadný odpor hradla Gatu je 22Ω . Reakce byla obdobná, jako u typu VCR 07D47 . Blokovací napětí dle výrobce je udáno $U_{br} = 100V$. Naměřeno, bylo maximální dosažené přepětí (Reakční přepětí $U_{reak.max.} = 95V$). Přepětí nedosahovalo maximálních hodnot, ale ani při testu s parazitní indukčností, kde přepětí dosahovalo $U_{CES} = 190V$, nestačily varistory omezit přepět'ovou špičku.



Obr. 13- Průběh testu Varistoru VCR 07D4 70K odpor hradla G 22Ω



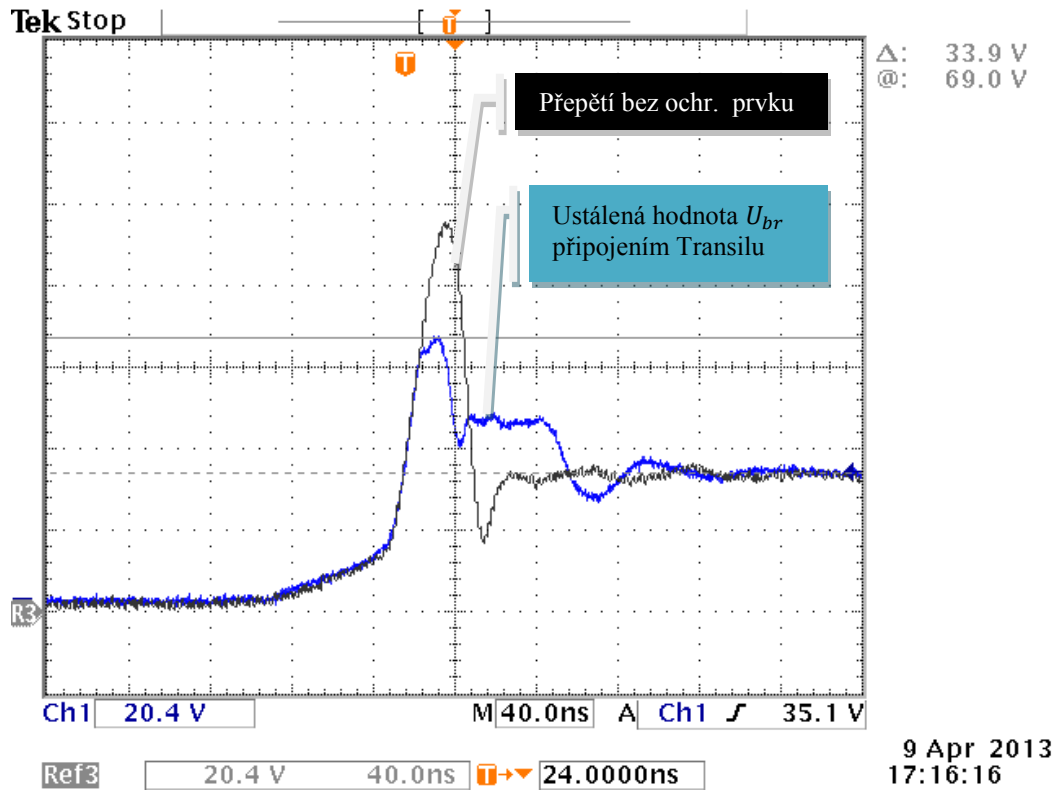
Obr. 14- Průběh testu Varistoru VCR 14N10, odpor hradla G 22Ω

Porovnáním průběhů, bez varistoru a s varistorem bylo zjištěno, že varistor nebyl schopen eliminovat přepětovou špičku, ale naopak došlo k velkému rozkmitání ustáleného napětí po vypnutí IGBT tranzistoru.. Varistory byly otestovány na rozsah vygenerovaných přepětových špiček, ale ani jedna reakce varistoru nebyla dostatečně rychlá k omezení přepětí na IGBT tranzistoru. Reakce rozkmitání přepětí je naopak negativem varistoru pro spínací prvek.

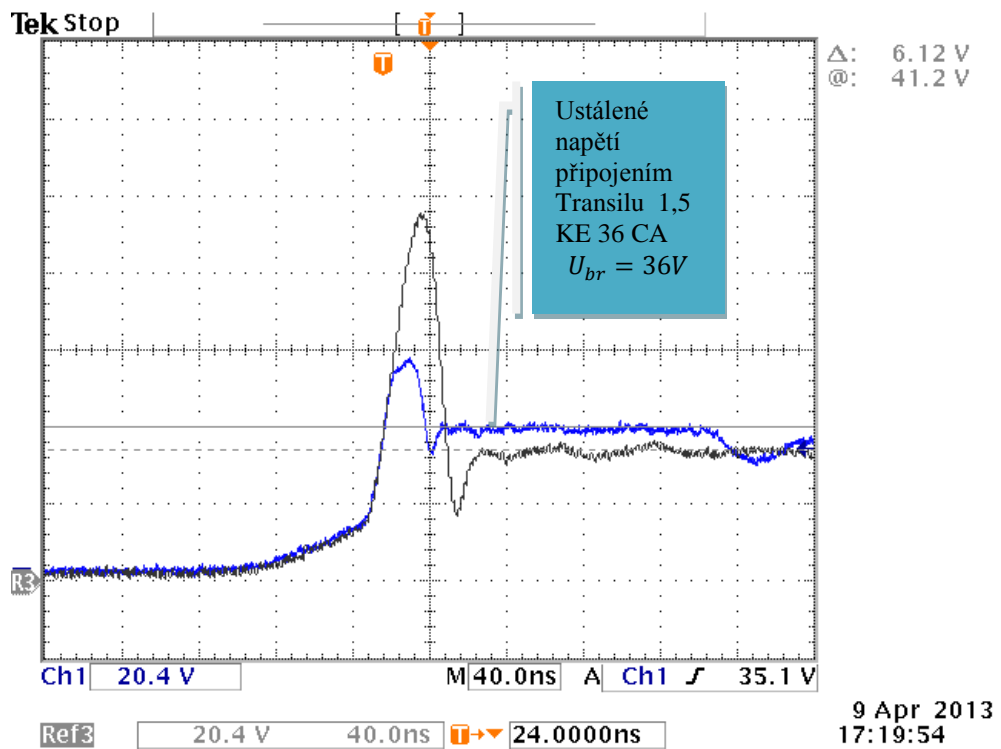
4.3 Test transilu

Při připojení transilů Typu: 1,5 KE 47A ($U_{br}=47V$) a 1,5KE 36CA ($U_{br}=36V$). Do obvodu s odporem do hradla 22Ω , byl na svorky pro ochranný prvek připojen **Transil 1,5 KE 47A**. Na obr. 15 je zobrazen průběh přepětí bez ochrany (černou barvou) a modrou barvou s připojeným transilem. Blokovací napětí udané výrobcem je $U_{br}=47V$, na zobrazení osciloskopu je patrné rychlé omezení přepětí na hodnotu udanou výrobcem. Důležité je správná polarita připojení, protože se jedná o jednosměrnou součástku, připojení musí být v závěrném (blokovacím) směru transilu. Při připojení transilu 1,5KE 36CA je blokovací napětí udané výrobcem $U_{br}=36V$. Průběh je zobrazen na obr. 16, kde je patrné omezení přepětí na hodnotu výrobce $U_{br}=36V$.

Do obvodu bylo porovnáním průběhu zjištěno, že reakční doba na vzniklé přepětí U_{br} je rychlá a dokáže omezit přepětovou špičku a ustálit přepětí na hodnotu danou výrobcem transilu. V zobrazením osciloskopu je názorně vidět omezení přepětí ze $U_{CES}=102V$ na $U_{Reak.max} = 66,4V$ a $U_{br}=36V$ - reakční napětí dané výrobcem Transilu.



Obr. 15- Průběh Transilu 1,5 KE 47A odpor hradla G 22 Ω



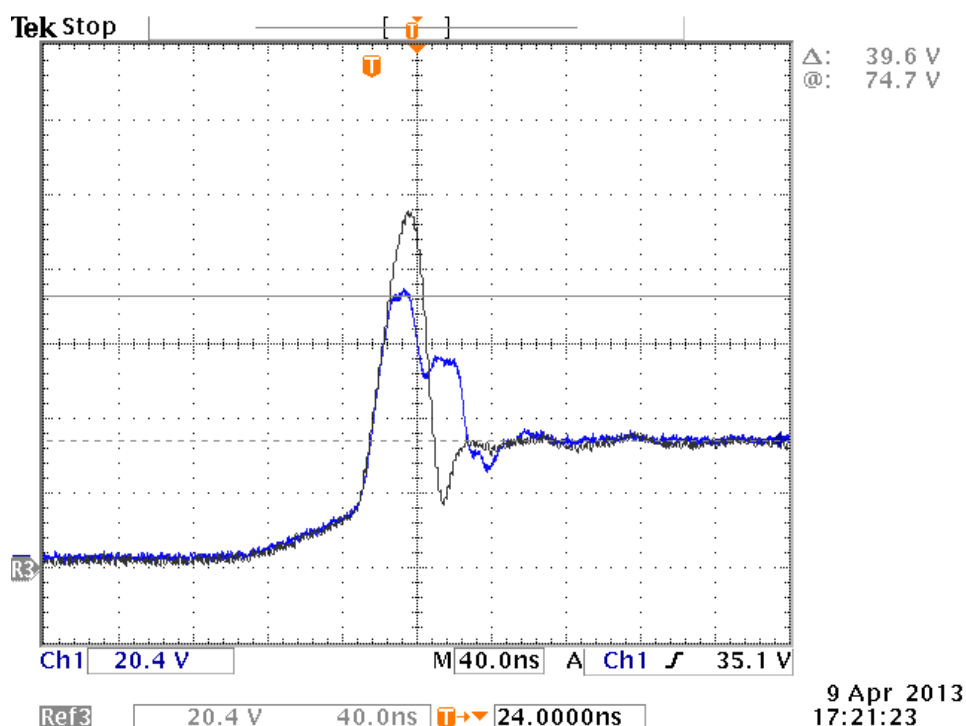
Obr. 16 - Průběh testu Transilu 1,5KE 36CA, odpor hradla G 22 Ω

4.4 Test Zenerovy diody

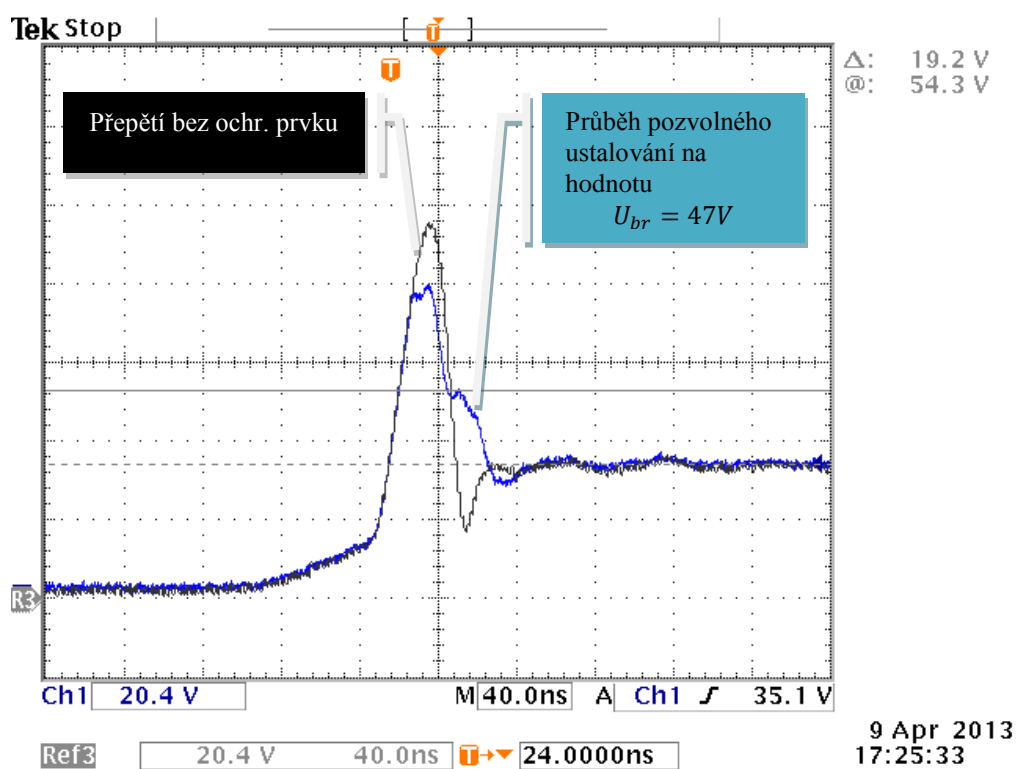
Zenerova dioda není charakteristická součástka pro ochranu výkonových polovodičových spínačů. Nevýhodou Zenerových diod, je nízký přenášený výkon.

Připojením Zenerovy diody IN 5370B ZD 56V/5W , kde je blokovací napětí udané výrobcem $U_{br}=56V$, je průběh omezování přepětí v porovnání s transilem horší. Z hlediska reakční doby i ustálení přepětí daného výrobcem Zenerovy diody. Reakční doba je delší reakční přepětí je vyšší $U_{Reak.max}=74,7V$. Na hodnotu danou výrobcem se přepětí dostávalo pozvolným poklesem. Průběh je zobrazen dle obr. 17. Černou je zobrazen průběh, bez připojené Zenerovy diody a modrou barvou je znázorněn průběh po připojení Ochranné Zenerovy diody. Na testovací obvodu byla připojena pro ověření funkce také stabilizační Zenerova dioda ZD 47V. Průběh je zobrazen na obr.18. kde je patrný pozvolný pokles napětí k hodnotě reakčního blokovacího napětí udaného výrobcem $U_{br}=47V$.

Podle zobrazení osciloskopu je patrné omezení přepětí, proto je možnost Zenerovy diody použít.



Obr. 17- Průběh testu Zenerovy diody IN5370B ZD 56V, odpor hradla G 22 Ω



Obr. 18- Průběh testu Zenerovy diody ZD 47V, odpor hradla $G 22\Omega$

5 Vzorový referát.

Zadání :

Zjistěte reakci přepětových ochranných prvků na vzniklé přepětí.

Úkol měření:

- Změřte hodnoty přepětí U_{CES} na spínaném polovodiči IGBT tranzistoru IRG 4BC 30K, bez použití ochranných součástek proti přepětí.
- Změřte maximální hodnotu reakčního přepětí $U_{Reak.max}$ a hodnotu ustáleného reakčního přepětí ochranného prvku U_{br} . Měření proveďte na Transilu 1,5KE 36 CA a Zenerově Diodě IN 5370B
- Naměřené hodnoty zaznamenejte a zhodnoťte.

Použité zařízení pro úlohu:

Snižovací pulzní měnič, řízený testovacím obvodem.

Stabilizovaný zdroj stejnosměrného napětí. 30V

Osciloskop

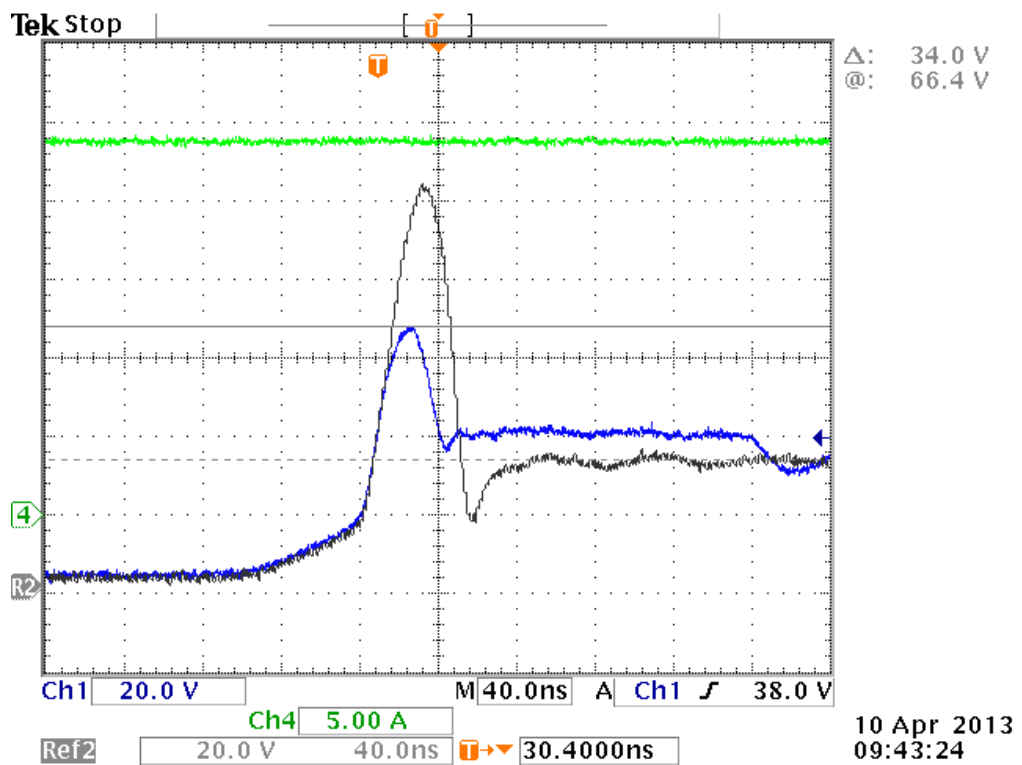
Přepět'ové ochranné prvky : Transil 1,5 KE 36 CA

Zenerova Dioda IN 5370B

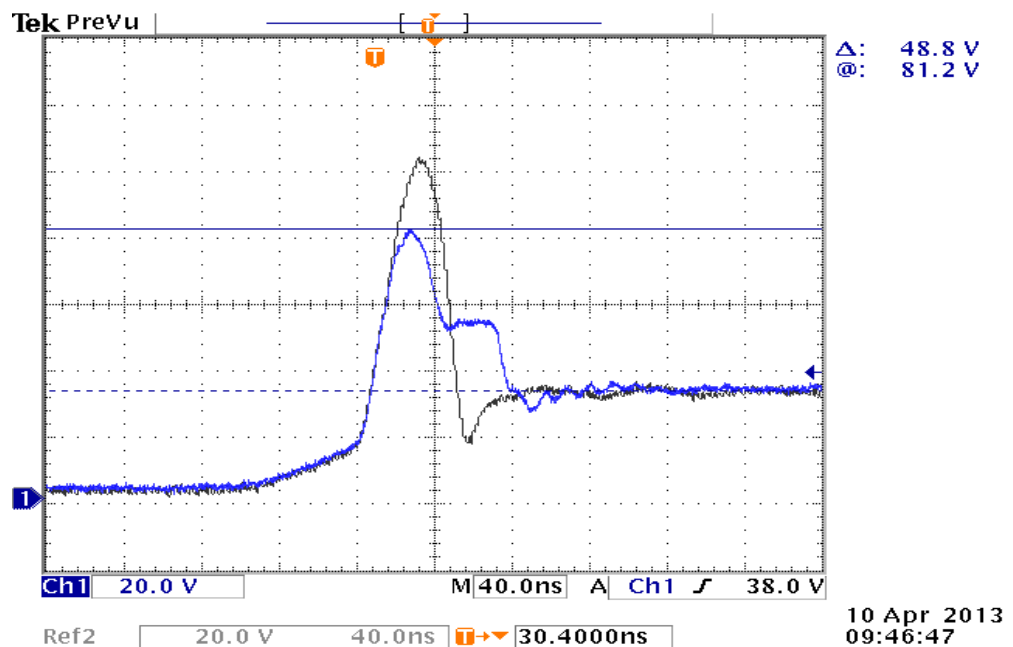
Postup měření:

- Připojte měřicí sondu osciloskopu na svorky v těsné blízkosti svorek pro připojení ochranných prvků mezi kolektor a emitor IGBT Tranzistoru.
- Zapněte napájecí zdroje.
- Nastavte na přepínači odpor hradla GATU na 22Ω .
- Nastavte oscilátor pro vyhledání průběhu.
- Spusťte test pomocí tlačítka na testovacím obvodu.
- Vyhledejte a zaznamenejte průběh bez připojené přepět'ové ochrany.
- Připojte měřený přepět'ový ochranný prvek mezi kolektor a emitor IGBT Tranzistoru.
- Spusťte opětovně test.
- Naměřené hodnoty omezeného přepětí zaznamenejte, zapište a zhodnoťte.

Naměřené průběhy při testu:

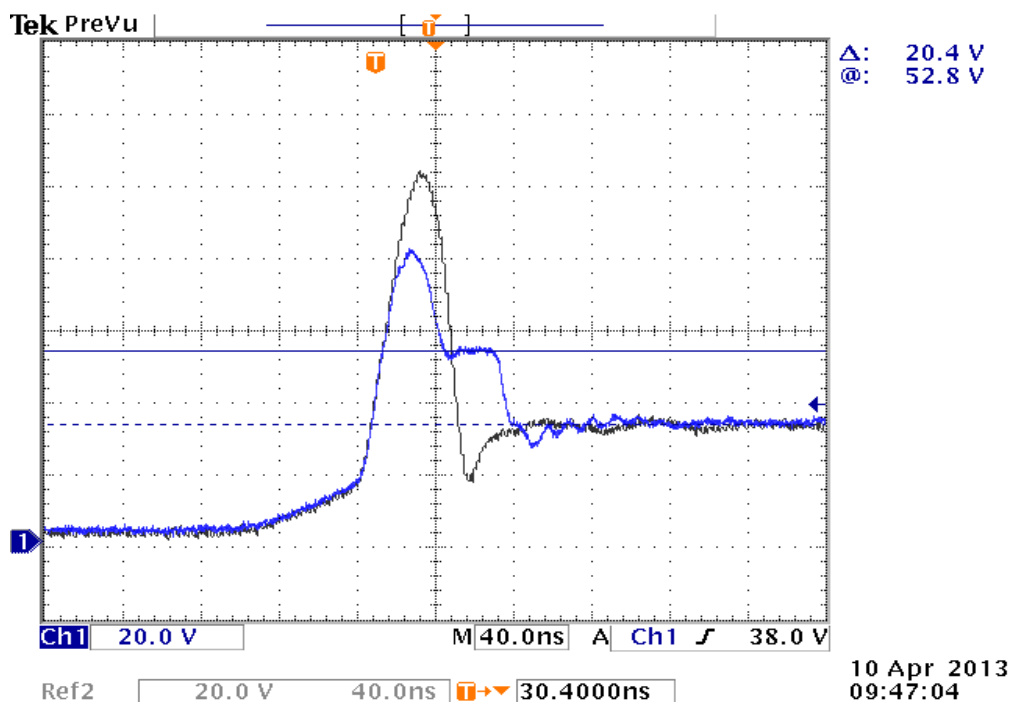


Obr. 19- Naměřené reakční přepětí - Transil 1,5 KE 36



Obr. 20 - Naměřené Maximální reakční přepětí Zenerova Dioda IN 5370B

$$U_{Reak.max} = 81V$$



Obr. 21 - Naměřené reakční přepětí -Zenerova Dioda IN 5370B $U_{br} = 52,8V$

Porovnávací Tabulka:

Použitá ochrana	$U_{Reak.max}$	U_{CES}	U_{br}
Transilu 1,5KE 36 CA	66.4 V	102V	38V
Zenerova Dioda IN 5370B	81V	102V	52V

Závěr Vzorového referátu:

Měřením jsme zjistily správnou funkci přepětových ochranných prvků, (Transil 1,5 KE 36 CA, i Zenerova Dioda IN 5370B). Porovnáním obou ochranných prvků v tabulce má rychlejší reakci i nižší blokovací napětí Transil.

Závěr

V první části diplomové práce je obsažen přehled součástek nejčastěji používaných pro ochranu proti přepětí. V dalších částech se zabývám návrhem pracoviště pro demonstraci vzniku přepětí, na spínacích polovodičových prvcích. Povedlo se navrhnout a vyrobit testovacího pracoviště pro demonstrativní účely laboratoře. Na vyrobeném testovacím zařízení jsem ověřil vznik přepětí při vypínání polovodičů a také konstrukční vlivy na velikost přepětí, které nebezpečně ohrožuje funkčnost spínacích výkonových polovodičových prvků, měničů.

Na testovacím pracovišti jsem provedl řadu měření s ochrannými prvky proti přepětí. Testem jsem si ověřil funkčnost ochranných prvků na vzniklé přepětí. Porovnáním reakce ochranných prvků proti přepětí, je patrné, že z hlediska omezení přepětí, jsou neúčinnější transily, které bezpečně reagovaly a omezovaly přepětí na hodnoty udané výrobcem. Jako nevyhovující se jeví Varistory, které reagovaly velkým rozkmitem, který převyšoval i neomezovaný průběh přepětí.

Také se ověřil velký vliv rychlosti spínání IGBT Tranzistoru na vznik přepětí, kde zvýšením rychlosti sepnutí zvýšíme i velikost přepětí. Dalším poznatkem, který jsem ověřil je parazitní indukčnost, která velkou měrou zvyšuje přepětí na spínacím prvku.

Podářilo se vymyslet a vyrobit demonstrativní pracoviště, které bude mít přínos pro testování reakce přepětových ochran, ale i pro demonstraci přepětí v rámci výuky.

Použitá literatura

- [1] Pinker J., Koucký V.: Analogové elektronické systémy 1., ZČU Plzeň, 2001
- [2] Benešová Z., Ledvinová M.: Základy elektrických obvodů v příkladech, ZČU Plzeň, 2008
- [3] www.semikron.com/skcompub/en/Application_Manual_en_2011.pdf
[cit. 2013-03-02].
- [4] <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-05-23.7953032978/view>
[cit. 2013-03-02].
- [5] http://brve.strojar.com/data/Download/Skola/MEL/Soucastky_prepet_ochrany.pdf
[cit. 2013-03-02].
- [6] http://www.ibselectronics.com/ibs/cmpnts/rgaco/catalog/D/MetalOVD2_16-opt.pdf
[cit. 2013-03-02].
- [7] http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/C/D/4/0/CD4098.shtml
[cit. 2013-03-02].
- [8] http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/150/50345_DS.pdf
[cit. 2013-03-02].
- [9] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/irg4bc30k.pdf>
[cit. 2013-03-02].
- [10] http://www.datasheetcatalog.org/datasheets2/70/70473_2.pdf
[cit. 2013-03-02].
- [11] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/microchip/21422b.pdf>
[cit. 2013-03-02].
- [12] http://www.amapro.cz/datove_zdroje/ar/konstrukce_ar_2/obsah_ar2.php
[cit. 2013-03-02].

Přílohy

Přílohy nejsou součástí této diplomové práce.

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje Diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:.....

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta / katedra	Datum	Podpis