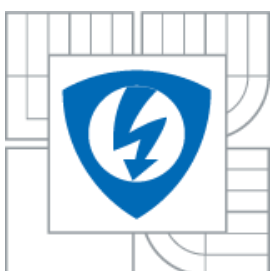




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS**

ŘÍZENÝ USMĚRŇOVACÍ MŮSTEK CONTROLLED RECTIFIER BRIDGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR-s THESIS

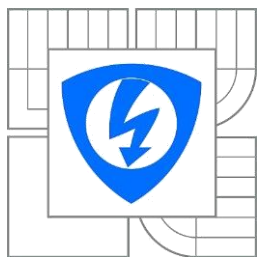
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Kučírek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Jankovský

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Martin Kučírek

ID: 146880

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Řízený usměrňovací můstek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Na Graetzově zapojení diodového usměrňovače popište jeho funkci a při usměrňování jednofázového napětí vyjádřete jeho energetické ztráty způsobené úbytky napětí na diodách.

Navrhněte zapojení řízeného usměrňovače, které bude maximálně eliminovat tyto ztráty a výpočtem, příp. simulací je určete.

Navrhněte konstrukci a technologii tohoto zapojení vhodné pro výrobu a realizujte vzorky.

Proměřte je z hlediska elektrických ztrát a z hlediska tepelných účinků, a porovnejte výsledek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10. 2. 2015

Termín odevzdání: 4. 6. 2015

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Jankovský

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009

ABSTRAKT

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá problematikou jednofázových dvoupulzních usměrňovačů - popisuje princip použitých součástek v zapojení jednofázového dvoupulzního neřízeného usměrňovače (Graetzova usměrňovače) a řízeného s výkonovými tranzistory MOSFET a I O LT4320. Praktická část vysvětluje postup výroby řízeného usměrňovacího můstku formou embedded systému. Na výsledném výrobku je provedeno měření a srovnání s komerčním neřízeným jednofázovým dvoupulzním usměrňovačem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Graetz, LT4320, řízený můstek, usměrňovač, embedded systém

ABSTRACT

This bachelor's thesis is concerned with problems of monophasic full-wave rectifiers - describes the components used in wiring monophasic full-wave uncontrolled rectifier (Graetz rectifier) and controlled with power MOSFETs and IC LT4320 in the theoretical part. The practical part explains manufacturing process controlled rectifier bridge in the form of embedded system. On the final product is carried out measurement and comparison with commercial uncontrolled monophasic full-wave rectifier.

KEYWORDS

Graetz, LT4320, controlled bridge, rectifier, embedded system

KUČÍREK, M. *Řízený usměrňovací můstek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2015. 52 s., 27 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Jankovský

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řízený usměrňovací můstek jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaroslavovi Jankovskému za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

podpis autora

Obsah

Obsah.....	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek.....	9
Úvod.....	10
Teoretická část.....	11
1 Použité komponenty	11
1.1 Usměrnovací dioda.....	11
1.2 Tranzistor MOSFET.....	12
1.2.1 Princip funkce.....	12
1.3 LT4320.....	14
1.3.1 Aplikační zásady	14
2 Můstkový neřízený usměrňovač.....	16
2.1 Popis funkce obvodu	17
2.2 Ztrátový výkon napětí na diodě neřízeného můstkového usměrňovače.....	17
2.3 Příklad 1	18
3 Řízený můstkový usměrňovač.....	19
3.1 Ztrátový výkon můstkového zapojení s MOSFETY	20
3.2 Příklad 2	20
4 Substrát.....	21
4.1 Anorganický substrát.....	21
4.2 Organický substrát (neohebný).....	21
4.2.1 Dvouvrstvé DPS	22
4.2.2 Vícevrstvé DPS	22
5 EMBEDDED systém.....	23
6 Pájky, pájecí pasty, osazení.....	24
6.1 Složení pájecí pasty	24
6.2 Olovnaté pájky	24
6.3 Bezolovnaté pájky	24
6.4 Nanášení pájecí pasty	25
6.4.1 Nanášení pasty dispenzerem.....	25
6.5 Osazení SMD	25
7 Pájení.....	26
7.1 Podélný teplotní profil.....	26
7.2 Defekty po pájení	27

Praktická část.....	28
8 Simulace můstkového zapojení v OrCAD PSpice	28
9 Výrobní postup	30
9.1 Návrh schéma DPS.....	30
9.2 Tvorba DPS	31
9.3 Nanesení pájecí pasty	32
9.4 Přetavení pájecí pasty	33
9.5 Statistika a vyhodnocení poruch po přetavení	34
9.5.1 Teplotní profil.....	34
9.5.2 Poruchy po přetavení	35
9.6 Tvorba embedded systému	37
9.7 Měření a testování	39
10 Srovnání vyrobený řízený vs. neřízený usměrňovací můstek	43
Závěr.....	45
Literatura	47
Seznam zkratk a symbolů	49
Seznam příloh.....	52

Seznam obrázků

Obrázek 1 Dioda a) kontaktovaný PN přechod, b) schématická značka, c) VA charakteristika.....	12
Obrázek 2 NMOS a) schématická značka s indukovaným kanálem b) schématická značka se zabudovaným kanálem c) zobrazení v řezu	13
Obrázek 3 VA charakteristika MOSFETu	13
Obrázek 4 Neřízený Graetzův usměrňovač	16
Obrázek 5 Průběhy napětí a proudů v Graetzově usměrňovači.....	17
Obrázek 6 Řízený můstkový usměrňovač	19
Obrázek 7 Řez strukturou embedded systému	23
Obrázek 8 Teplotní profil RTS pro pájecí slitinu SAC [9].....	27
Obrázek 9 Vstupní (zelené) a výstupní (žluté) napětí neřízeného můstkového usměrňovače ze simulace PSpice bez vyhlazovacího kondenzátoru	29
Obrázek 10 Vstupní (zelené) a výstupní (žluté) napětí neřízeného můstkového usměrňovače ze PSpice s vyhlazovacím kondenzátorem	29
Obrázek 11 DPS EAGLE	30
Obrázek 12 Přířez multiDPS	31
Obrázek 13 Osazovací pracoviště	32
Obrázek 14 Nanesení pájecí pasty.....	32
Obrázek 15 ESSEMTEC RO300FC.....	33
Obrázek 16 Přířez po přetavení	33
Obrázek 17 Použitý teplotní profil	34
Obrázek 18 Poruchy po přetavení	35
Obrázek 19 Vhodně přetavené	35
Obrázek 20 Kulička pájky (vlevo), zkrat vývodů (vpravo).....	36
Obrázek 21 Nadbytek pájky	36
Obrázek 22 Pootočená součástka	36
Obrázek 23 Slisovaný přířez 4V DPS galvanicky prokovené (ČEMEBO).....	37
Obrázek 24 Detail frézování.....	38
Obrázek 25 Výstupní DPS z ČEMEBO	38
Obrázek 26 Propojení jednoho vzorku pro měření a testování	39
Obrázek 27 Konečný výrobek – Řízený můstkový usměrňovač.....	42

Seznam tabulek

Tabulka 1 Prahové napětí, parametry	11
Tabulka 2 Hlavní parametry unipolárního tranzistoru BSZ110N06NS3 G [3].....	14
Tabulka 3 Porovnání základních vlastností FR-4 a AL_2O_3	22
Tabulka 4 Teplotní profily	34
Tabulka 5 Měření otevřených a zavřených tranzistorů při změně polaroty vstupu.....	39
Tabulka 6 Měření se zátěží vstup IN1 + a IN2 -	40
Tabulka 7 Měření se zátěží, vstup IN1 – a vstup IN2 +	41
Tabulka 8 Srovnání parametrů MULTICOMP CP1000 a řízeného usměrňovacího můstku	43

Úvod

S vývojem mikroelektroniky vznikají nové myšlenky realizované novými principy, výrobními postupy, novými součástkami. Obecný trend výroby DSP spěje k miniaturizaci, snížení hmotnosti, zvyšování zástavbové plochy, efektivity a jakosti, snižování nákladů. U součástek nebo stavebních bloků dochází ke zlepšování parametrů, které mimo jiné snižují ztrátový výkon a zvyšují tak jakost celého výrobku.

Bakalářská práce se bude zabývat novou myšlenkou řízeného usměrňovacího můstku (funguje podobně jako Graetzův usměrňovač - usměrnění probíhá pomocí MOSFET tranzistorů, což má za následek výrazné snížení ztrátového výkonu), který bude vyrobený jako embedded systém.

Její teoretická část přibližuje problematiku jednofázových dvoupulzních usměrňovačů. Stručně popisuje princip použitých součástek v zapojení neřízeného můstkového usměrňovače s diodami a především s MOSFET tranzistory s řídicím obvodem LT4320. Dále jsou popsány substráty, pájky a přiblížení myšlenky embedded technologie.

V praktické části je simulace funkce obvodu v programu PSpice, popsán výrobní postup formou embedded systému, měření a testování řízeného můstkového usměrňovače.

Na závěr jsou srovnány jeho základní parametry s konkrétním neřízeným usměrňovačem.

Teoretická část

Teoretická část se věnuje principům funkce polovodičových součástek použitých v neřízeném i řízeném můstkovém usměrňovači, použitým materiálům a výrobnímu postupu formou embedded systému.

1 Použité komponenty

Kapitola popisuje použité součástky včetně jejich hlavních parametrů.

1.1 Usměrňovací dioda

Usměrňovací dioda je polovodičová součástka zpravidla s jedním PN přechodem (rychlé Schottkyho diody jsou tvořeny přechodem kov-polovodič). Je konstruována pro usměrňování střídavého napětí a proudů na nízkých i vysokých kmitočtech. Je u ní požadován malý úbytek napětí v propustném směru, velký propustný proud a velké závěrné napětí. Typické hodnoty těchto parametrů pro Si diodu jsou uvedeny v tabulce 1. Na obrázku 1 je k vidění schématická značka a VA charakteristika. [1]

Terminologie:

U_p – prahové napětí diody = napětí, kdy dioda začíná vést proud

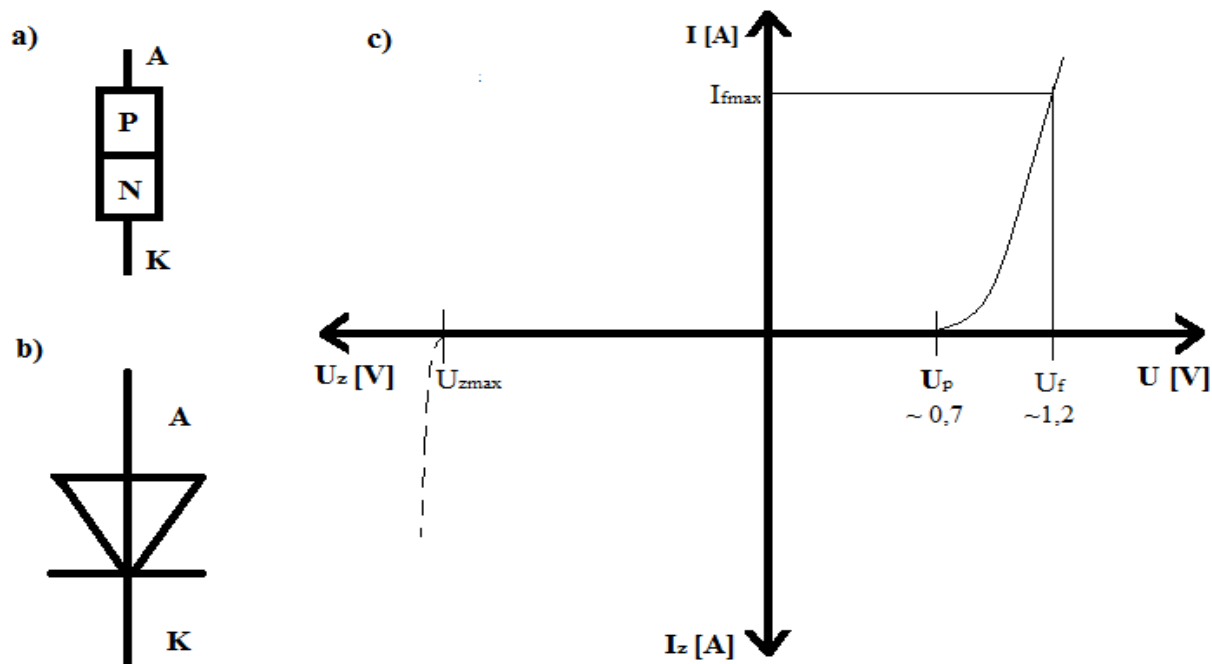
U_f – úbytek napětí na diodě v propustném směru

I_{fmax} – maximální proud, který může diodou protékat. Při jeho překročení dojde ke zničení diody

U_{zmax} – maximální závěrné napětí, které může být na diodu přiloženo, jinak dojde ke zničení diody

Tabulka 1 Prahové napětí, parametry

materiál diody	U_p [V]	parametr	typická hodnota
Ge	0,3	U_f	0,8 až 2 V
Si	0,7	U_{zmax}	stovky až tisíce V
GaAs	1,2	I_{fmax}	desítky až stovky A
GaP	2,2		



Obrázek 1 Dioda a) kontaktovaný PN přechod, b) schématická značka, c) VA charakteristika

1.2 Tranzistor MOSFET

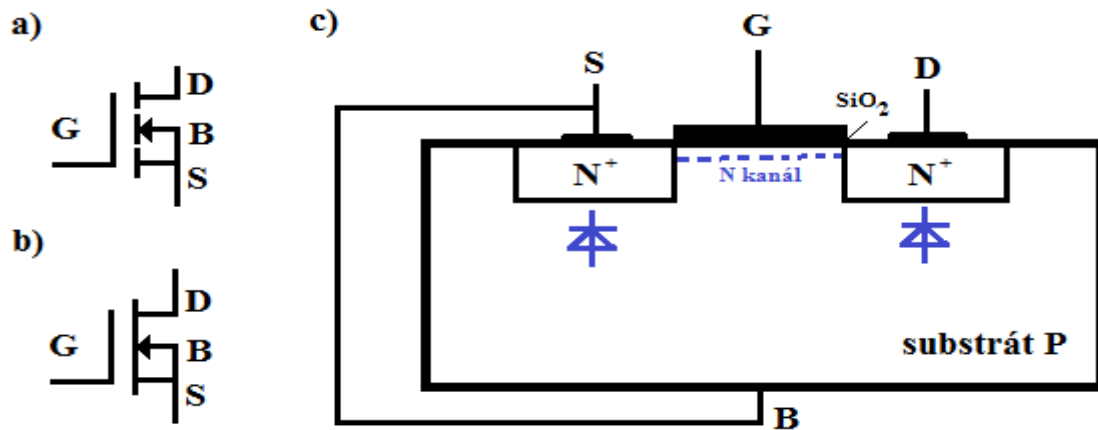
MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) je polem řízený tranzistor, u kterého je vodivost kanálu mezi elektrodami Source (emitor) a Drain (kolektor) ovládaná elektrickým polem vytvářeným ve struktuře MOS napětím přiloženým mezi hradlo Gate (báze) a Source. Pokud je vodivý kanál při $U_{GS} = 0V$, jedná se o MOSFET se zabudovaným kanálem. Pokud je pro vytvoření kanálu vodivosti přivést napětí $N - U_{GS} > 0$ ($P - U_{GS} < 0$), jedná se o MOSFET s indukovaným kanálem. [2]

1.2.1 Princip funkce

Princip funkce je popsán se substrátem P, viz obrázek 2. Po přiložení kladného napětí na Gate proti substrátu působí elektrické pole v opačném směru. Díry budou odpuzovány od povrchu a na jejich místě zůstanou záporné ionizované nepohyblivé akceptory tvořící OPN. Na hradle bude nahromaděn kladný náboj, který bude kompenzován záporným nábojem akceptorů na povrchu polovodiče. Při zvyšování napětí se tento děj opakuje až do určité míry, kdy není koncentrace akceptorů v OPN dostatečná a začne narůstat koncentrace volných elektronů vznikajících např. tepelnou generací, generací v OPN nebo na kontaktu substrátu. Při dosažení U_p je koncentrace elektronů rovná koncentraci majoritních děr. Při zvýšení U nad U_p na hradle kompenzován a díky kompenzaci se už moc nerozšiřuje. Koncentrace elektronů exponenciálně roste. Přiložení $U_{GS} > U_p$ způsobí, že na povrchu bude $n \gg p$ a dochází

k lokální přeměně substrátu P na N. Tato oblast se nazývá inverzní vrstva. Volné elektrony v kanálu tvoří náboj. Do substrátu P je přidán substrát N (Drain a Source). Source je připojen k zemi a Drain na kladném U, protože jinak by těmito substrátovými diodami tekla propustný proud. Proto jsou elektrody izolovány od substrátu pomocí OPN těchto diod, zatímco kanál je odizolován.

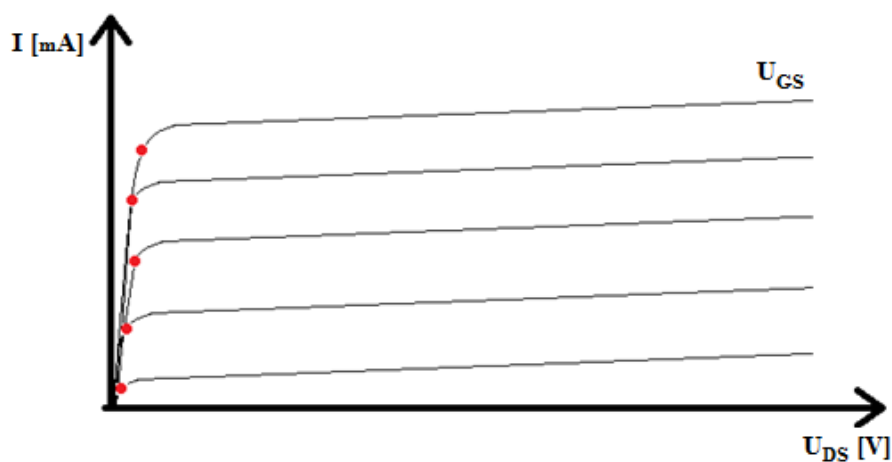
Z obrázku 2 je patrné, že $U_{GS} < U_p$ brání průchodu elektronů ze Source do Drain energetická bariéra PN substrát-source. Pro $U_{GS} > U_p$ nastane v polovodiči snížení energetické bariéry a možnost pohybu elektronů z Source do Drain. [2]



Obrázek 2 NMOS a) schématická značka s indukovaným kanálem b) schématická značka se zabudovaným kanálem c) zobrazení v řezu

Na obrázku 3 je zobrazena VA charakteristiku MOSFET tranzistoru. Červené tečky pod koleny jednotlivých charakteristik vyznačují oblast saturace tranzistoru a zobrazují maximální hodnoty pro nastavení pracovního bodu. Je nutné nastavit pracovní bod pod nebo na tyto body, ale ne za, protože posunutí pracovního bodu nad oblast kolena znamená větší výkonové zatížení a to je pro nás nežádoucí.

Obrázek 3 VA charakteristika MOSFETu



V řízeném usměrňovacím můstku budou použity NMOS tranzistory BSZ110N06NS3 G od firmy Infineon. Jeho základní parametry jsou uvedeny v tabulce 2, datasheet v příloze 2.

Tabulka 2 Hlavní parametry unipolárního tranzistoru BSZ110N06NS3 G [3]

parametr	V_{DS}	$R_{DS(on)}$	I_D
jednotka	V	m Ω	A
hodnota	60	max 11	20

1.3 LT4320

Integrovaný obvod LT4320 vyrábí americká firma Linear Technology. Obvod složí k regulaci NMOS tranzistorů při vstupním ss napětí až po střídavé s frekvencí do 60 Hz (tato firma vyrábí alternativu pro vyšší frekvence s označením LT4320-1 až do 600 Hz). Výstupní napětí musí být v rozmezí 9 – 72 V. Díky NMOS tento řízený diodový můstek snižuje nároky na napájení. Důsledkem toho se sníží ztrátový výkon zařízení a lokální ohřev desky. Dále není potřeba dimenzovat chladiče, proto dojde i k úspoře místa (zmenšení objemu) a zmenšení hmotnosti celého zařízení. V případě zkratu nebo přerušeni napájení rychle minimalizuje proudové přechody. V aplikacích s nízkým napětím významně zvyšuje účinnost, neboť na klasických diodách vzniká mnohem větší úbytek napětí (až 2 V) než na NMOS (0,03 V). Tento obvod je vyráběn ve 3 typech pouzder – 8 mi vývodové DFN a PDIP nebo 12 cti vývodové MSOP. Teplotní odolnost -40/125 °C. [4] Datasheet uveden v příloze 3.

1.3.1 Aplikační zásady

Správná činnost obvodu je podmíněna vhodně navrženými součástkami. Pro tranzistory výrobce doporučuje snížit ztrátové napětí U_{ZTR} NMOS na 30 mV. Výpočet odporu kanálu $R_{DS(on)}$ je různý pro ss a stř napájecí napětí. Při ss napájení platí vztah:

$$R_{DS(on)} \frac{U_{ZTR}}{I_{STŘ}} = \frac{0,03}{I_{STŘ}} [\Omega] \quad (1)$$

kde $I_{STŘ}$ = střední hodnota proudu protékajícím NMOS [A]

Pro napájení střídavým napětím použijeme vztah:

$$R_{DS(on)} = \frac{U_{ZTR}}{3 \cdot I_{STŘ}} = \frac{0,03}{3 \cdot I_{STŘ}} [\Omega] \quad (2)$$

MOSFET musí být vhodně proudově dimenzován na proudové špičky. Platí vztah:

$$I_D \geq 3 * I_{STŘ} [A] \quad (3)$$

U_{DSS} musí být navrženo vyšší než je maximální vstupní napětí. V případě stř napájení musíme určit špičkovou hodnotu ze vztahu:

$$U_{DSS} \gg U_{AC} * \sqrt{2} [V] \quad (4)$$

Dalším hlediskem je omezit zbytečné předimenzování MOSFETu, protože předimenzováním na vysoké pracovní frekvence dochází ke snížení účinnosti a tím pádem k prodloužení doby přepnutí (vypnutí nebo sepnutí tranzistoru).

Výrobce dále doporučuje U_{GS} alespoň 2 V nebo více. Nižší hodnota způsobí zvýšení doby přepnutí.

Další aplikační zásadou je vhodná hodnota filtrační kapacity a její umístění co nejbližší výstupům LT4320. Pro její výpočet platí vztah:

$$C \geq \frac{I_{STŘ}}{U_{ZVL} * 2 * f} [F] \quad (5)$$

kde U_{ZVL} = maximální zvlnění sítě [V] a f = frekvence sítě [Hz]

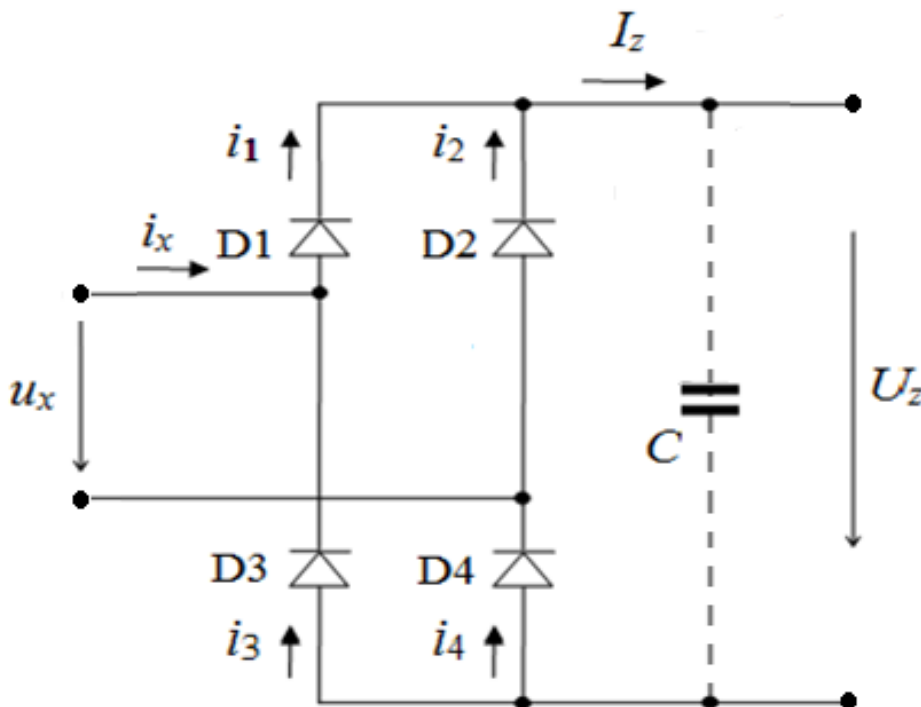
Minimální hodnota kapacity musí být 1 μ F pro keramické a 10 μ F pro elektrolytické kondenzátory. V úvahu také musíme vzít dimenzování kondenzátoru na napětí vyšší než je špičkové výstupní napětí.
[4]

2 Můstkový neřízený usměrňovač

Usměrňovače jsou důležité obvodové bloky, které zajišťují ss napětí pro další bloky obvodu (T, IO, atd.). Základem každého usměrňovače je polovodičový prvek, neřízený, polořízený nebo řízený (dioda, tyristor, tranzistor). Usměrňovače se rozdělují podle počtu vstupních fází a výstupních pulzů. Můstkový usměrňovač (nazývaný též Graetzův usměrňovač) je jednofázový dvoupulzní neřízený usměrňovač se čtyřmi diodami. Na výstup bývá zpravidla připojen vyhlazovací prvek:

- kondenzátor- nevýhoda EMC – velmi nesinusový tvar výstupního proudu I_z (omezení použitelnosti do 1 kW) - zapojení pracuje jako výkonový špičkový detektor – kondenzátor má snahu se nabít na špičkovou hodnotu napětí U_z
- LC filtr- EMC je vysoká, protože díky tlumivce je na výstupu příznivý tvar fázového proudu. Jeho nevýhodou je velký rozdíl mezi střední hodnotou U_z v režimu spojitého proudu a špičkovou hodnotou U_{sp} v režimu přerušovaného proudu. LC filtr nemá v praxi příliš využití [5]

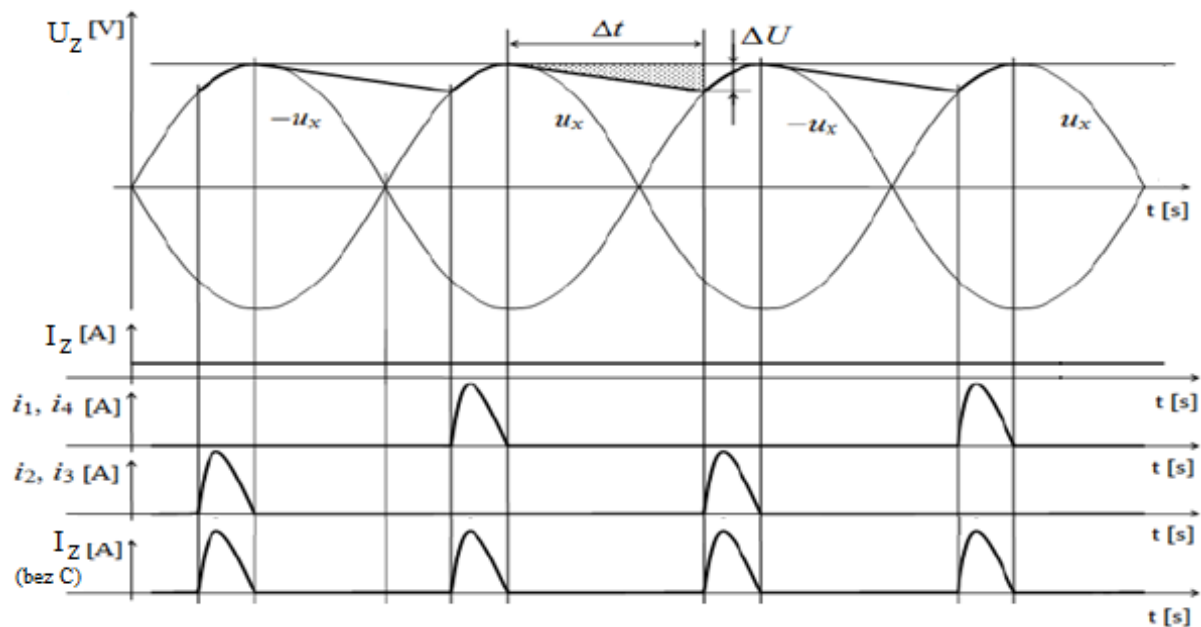
Funkční schéma Graetzova usměrňovače je zobrazeno na obrázku 4. Nevýhodami jsou malá účinnost při usměrňování nízkých napětí (jednotky V) a nutnost dimenzování chladiče při vysokých výkonech, protože vlivem lokálního ohřevu dochází k ovlivnění funkce okolních součástek. Zvýšená teplota urychluje stárnutí a to může vést v extrémním případě i k nenávratnému poškození celé desky.



Obrázek 4 Neřízený Graetzův usměrňovač

2.1 Popis funkce obvodu

Na vstup je přiveden jednofázový sinusový signál u_x . Každou půlvlňu jsou otevřeny 2 diody. Při kladné půlvlňe vstupního napětí teče proud i_x přes diodu D1, nabíjí se kondenzátor C a přes D4 se vrací zpět do sítě. Při záporné půlvlňe teče proud i_x přes D2, kondenzátor C se nabíjí a přes D3 teče zpět do sítě. Celkový výstupní proud I_Z je složen z proudů i_1 a i_2 . Kondenzátor může být na výstupu zapojen kvůli vyhlazení výstupního pulzujícímu signálu. Průběhy napětí a proudů jsou uvedeny na obrázku 5, ΔU představuje zvlnění výstupního napětí a Δt čas, kdy se kondenzátor vybíjí.



Obrázek 5 Průběhy napětí a proudů v Graetzově usměrňovači

2.2 Ztrátový výkon napětí na diodě neřízeného můstkového usměrňovače

V každé půlvlňe jsou otevřeny 2 diody. Podle typu diody na ní vzniká úbytek v rozmezí 0,8 – 2 V. Výkon na diodě popsán následujícím vztahem pro výpočet výkonu na lomené přímce:

$$P_D = U_p * I_{ST\bar{R}} + R_D * I_{EF}^2 \approx U_p * I_{st\bar{r}} \text{ [W]} \quad (6)$$

kde: P_D = výkon na diodě, U_p = prahové napětí diody [V], $I_{ST\bar{R}}$ = střední hodnota proudu tekoucího diodou [A], R_D = diferenciální odpor diody [Ω], I_{EF} = efektivní hodnota proudu tekoucího diodou [A]

Pro výpočet ztrátového napětí na diodě platí:

$$U_f = U_p + R_d * I_{MAX} [V] \quad (7)$$

kde: U_f = ztrátové napětí na diodě, U_p = prahové napětí diody [V], R_D = diferenciální odpor diody [Ω], I_{MAX} = maximální proud diodou [A]; ($I_Z = I_{MAX}$)

2.3 Příklad 1

Je uvažován neřízený můstkový usměrňovač se střídavým vstupním napětím $u_x = 30$ V a odebíraným proudem $I_Z = 3$ A. Použitá křemíková dioda má parametry: $U_p = 0,7$ V, $R_D = 20$ m Ω .

Pro výpočet I_{STR} platí vztah:

$$I_{STR} = s * I_Z [A] \quad (8)$$

kde s je střída impulzu

Řešení:

Z rovnice 8 plyne hodnota středního proudu tekoucího diodou (s je 0,5, protože dioda je otevřena půl periody).

$$I_{STR} = s * I_Z = 0,5 * 3 = 1,5 \text{ A}$$

Nyní můžeme vypočítat z rovnice 7 ztrátový výkon diody.

$$P_1 \approx U_p * I_{STR} = 0,7 * 1,5 \approx 1,05 \text{ W}$$

Ztrátové napětí na diodě podle rovnice 8 bude:

$$U_f = U_p + R_D * I_Z = 0,7 + 0,02 * 3 = 0,76 \text{ V}$$

Ztrátový výkon usměrňovače je:

$$P_{ZU1} = U_f * I_Z = 0,76 * 3 = 2,28 \text{ W}$$

Z vypočítaného ztrátového výkonu P_{ZU1} lze usoudit, že už vzniká problém s chlazením. Samostatný návrh chladiče v této práci popsán nebude, protože tato problematika není obsahem bakalářské práce.

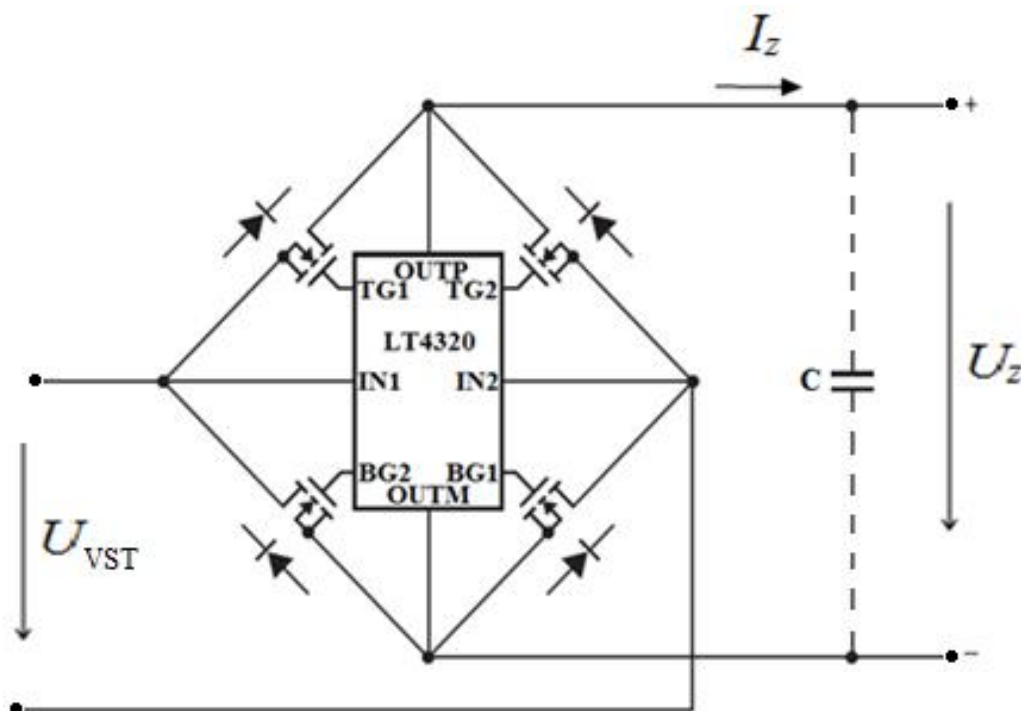
3 Řízený můstkový usměrňovač

Hlavní částí tohoto zapojení je integrovaný obvod LT4320 (více informací o tomto obvodu je uvedeno v kapitole 1.3), který řídí 4 tranzistory MOSFET typu N. Řízený můstkový usměrňovač funguje podobně jako Graetzův usměrňovač, viz obrázek 6:

- Při kladné půlplně na vstupu IN1 prochází proud přes otevřený MOSFET TG1, zátěž a BG1 zpět do sítě
- Při kladné půlplně na vstupu IN2 prochází proud přes otevřený MOSFET TG2, zátěž a BG2 zpět do sítě

Na výstup může být připojen vyhlazovací kondenzátor, jeho návrhem se bakalářská práce nebude zabývat. Obvod je navržen pro použití do frekvence 60 Hz (LT4320-1 do 600 Hz) s výstupním napětím v rozmezí 9 – 72 V a proudem zátěže I_{MAX} 10 A.

Nespornými výhodami tohoto zapojení jsou malé rozměry pouzdra (3 x 3 x 0,8 mm), vysoká účinnost při usměrňování malých napětí (protože úbytek na NMOS je v řádu desítek mV) a minimalizace ztrátového výkonu. To má za následek lokální snížení zahřívání substrátu. Nižší okolní teplota zvyšuje jakost, spolehlivost a životnost výrobku. Vzhledem k těmto vlastnostem je umožněno použití embedded technologie. Nevýhodou je vyšší cena oproti zapojení s usměrňovacími diodami. Schéma zapojení je uvedeno na Obrázku 6. V k výrobě bude použit I O LT 4320 IDD.[4]



Obrázek 6 Řízený můstkový usměrňovač

3.1 Ztrátový výkon můstkového zapojení s MOSFETY

Pro výpočet ztrátového výkonu na MOSFETu platí vztah výkonu na lineárním odporu:

$$P_M = R_{DSON} * I_{EF}^2 [W] \quad (9)$$

kde: P_M = výkon MOSFETu [W], R_{DSON} = odpor kanálu DS [Ω], I_{EF} = efektivní proud tekoucí MOSFETem [A]

3.2 Příklad 2

Zadání je stejné jako u příkladu 1. Je uvažován usměřovač s vstupním střídavým napětím $u_x = 30$ V a odebíraným proudem $I_Z = 3$ A. Víme, že úbytek na NMOS (U_{ZTR}) bude 30 mV. Pro výpočet I_{EF} platí vztah:

$$I_{EF} = I_Z * \sqrt{S} [A] \quad (10)$$

Řešení:

Pro výpočet odporu kanálu je použit Ohmův zákon:

$$R_{DSON} = \frac{U_{ZTR}}{I_Z} = \frac{0,03}{10} = 3 \text{ m}\Omega$$

Z rovnice 10 je určen efektivní proud, s je opět půl periody = 0,5

$$I_{EF} = I_Z * \sqrt{S} = 10 * \sqrt{0,5} = 2,121 \text{ A}$$

Ztrátový výkon tranzistoru je vypočten rovnicí 9.

$$P_2 = R_{DSON} * I_{EF}^2 = 3 * 10^{-3} * 2,121^2 = 0,013 \text{ W}$$

Ztrátový výkon usměřovače bude:

$$P_{ZU2} = U_{ZTR} * I_Z = 0,03 * 3 = 0,09 \text{ W}$$

Na závěr je ztrátový výkon z obou příkladů podělen.

$$P_K = \frac{P_{ZU1}}{P_{ZU2}} = \frac{2,28}{0,09} \approx 25$$

Z poměru výkonů obou příkladů plyne, že řízený usměřovací můstek vyzařuje 25x méně ztrátového výkonu než neřízený. Tato skutečnost umožňuje tvorbu řízeného můstkového usměřovače formou emedded technologie.

4 Substrát

Použité elektrické součástky a komponenty v navrženém obvodu musí být propojeny, fixovány, odizolovány. K tomuto účelu slouží substrát (základní materiál). Skládá se z nosné podložky (izolační a teplovodivá vrstva) a vodivé vrstvy (Cu folie nebo vodivé pasty). Substrát může být anorganický nebo organický, přičemž může být ohebný, neohebný či kombinovaný.

4.1 Anorganický substrát

Tvoří různé druhy keramiky – korundová Al_2O_3 (využívaná pro většinu aplikací), beriliová BeO , ovrstvené kovové jádro, křemenné, skleněné a feritové substráty.

Mezi hlavní výhody keramického substrátu patří velmi dobrá tepelná vodivost, chemická odolnost, malá hodnota TCE. Naopak nevýhodami jsou vyšší hmotnost a cena, křehkost, toxicita (BeO) a náročnější způsob opracování (náročný proces vytváření otvorů).

Vytváření vodivých, příp. odporových cest je tvořeno tlustovrstvou nebo tenkovrstvou technologií.

4.2 Organický substrát (neohebný)

Skládá se z výstuže (tvrzený papír, skleněné, uhlíkové, aramidové a křemenné vlákno) a pojiva (různé typy reaktoplastových pryskyřic a termoplastů), což určuje jeho mechanické, chemické, elektrické a tepelné vlastnosti.

Mezi těmito materiály je nejpoužívanější s označením FR-4, jehož výstuž tvoří skelné vlákno a jako pojivo je použita epoxidová pryskyřice. Srovnání hlavních parametrů FR-4 (bez multifunkčních pryskyřic) a Al_2O_3 je uvedeno v tabulce 3.

Jeho výhodami jsou výborné mechanické a dobré elektrické vlastnosti, vyšší teplotní odolnost, malá nasákavost. Nevýhodami jsou horší mechanické opracování a v porovnání s FR-2 (vrstevnatý papír + fenolformaldehydová pryskyřice) dvojnásobně vyšší cena.

Na substrát (z jedné nebo obou stran) je nalaminována Cu folie s vysokou čistotou (99,5%) definované tloušťky 17,5; 35; 70; 105 μm , vzniká tak základní plátovaný materiál. [6][7]

Výhody FR-4 předurčují tento materiál k použití v bakalářské práci.

Tabulka 3 Porovnání základních vlastností FR-4 a Al_2O_3

vlastnosti	jednotka	materiál	
		Al_2O_3	FR-4
ϵ - permitivita (1 MHz)		9 až 10	4,7
tg. δ – ztrátový činitel (1MHz)		0,08	0,019
TCE - součinitel teplotní roztažnosti	ppmK ⁻¹	6,5	13
tepelná vodivost	Js ⁻¹ m ⁻¹ K ¹	34 až 38	0,25
ekologičnost		vyhovuje	vyhovuje
mechanická stabilita		křehkost	výborná
měrný odpor	Ohm*cm	7.10e12	8*10e14
Tg - teplota skelného přechodu	°C		130
elektrická pevnost	kVmm ⁻¹	8	35-65

4.2.1 Dvouvrstvé DPS

Pro výrobu dvouvrstvých DPS existují 3 technologie:

1. Subtraktivní (základní plátovaný materiál je vyvrtán, aplikace fotorezistu a odleptání měděné folie)
 - Pattern plating
 - Panel plating
2. Semiaditivní (používá se mikrolept, vodivé cesty jsou tvořeny chemicky na zvodivělém povrchu)
3. Aditivní (vytváření obrazce chemickou mědí bez leptání)

4.2.2 Vícevrstvé DPS

Vícevrstvou DPS je možné sestavit ze střídavě vodivých a izolačních vrstev, kde vodivé vrstvy jsou alespoň dvě. Související problém je zvýšení nároků na zvládnutí technologie.

Stavební DPS – základní VV DPS, kdy je jedno nebo oboustranně vytvořen motiv. Tato DPS není samostatným výrobkem.

Lepící list (prepreg, v zhraniční literatuře může být označen jako B – resin a po vytvrzení C-resin) je tenká folie (v řádu desetin mm), která tvoří izolační vrstvu. Složením se jedná o neúplně vytvrzený základní materiál, jehož vytvrzení je dokončené procesem laminace (získá požadované vlastnosti). Prepreg je používán pro spojení a odizolování dvou nebo více stavebních desek ve výslednou VV desku. [7]

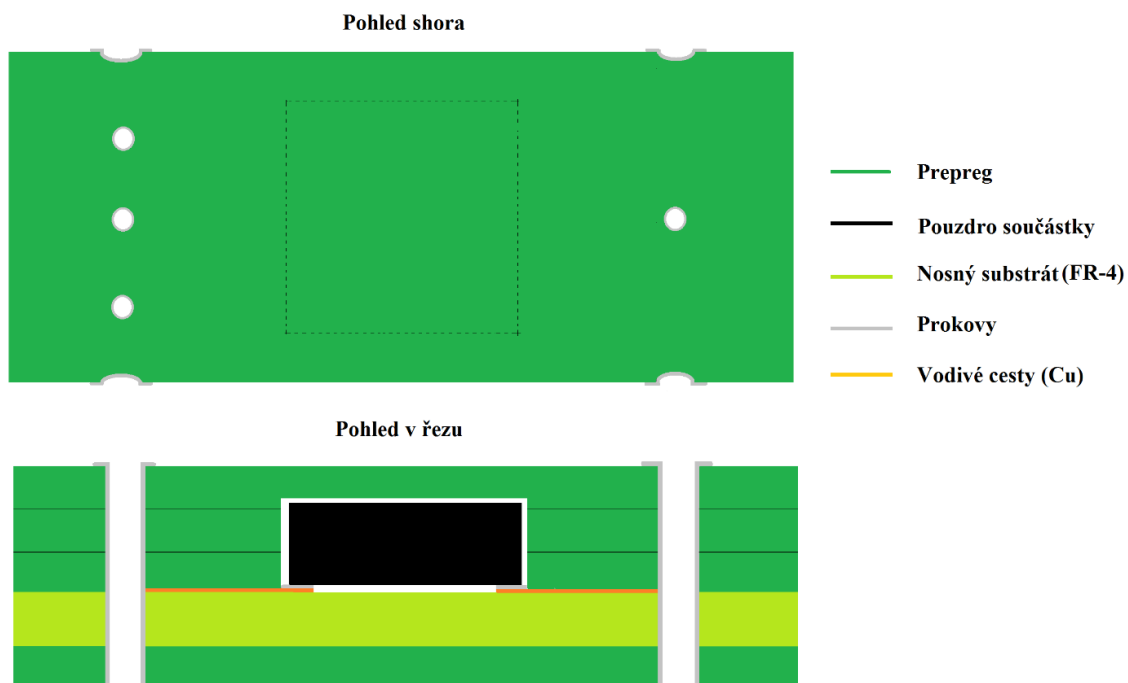
5 EMBEDDED systém

Obecný vývoj technologií osazování DPS spěje k miniaturizaci a zhušťování zástavby VV DPS. Do DPS se integrují pasivní součástky a probíhá vývoj s polovodičovými substráty (polovodičové součástky jsou vytvořeny do nosné podložky). Jednou z nových technologií je tzv. EMBEDDED (vnořený) systém. Jedná se o VV DPS, kdy je součástka (řídící obvod) osazena uvnitř desky – je součástí desky.

Vzhledem k tomu, že řízený usměrňovací můstek nevyzařuje téměř žádné teplo a velikost pouzder čipů je pouze 3 x 3 x 1 mm, nabízí se přímo tvorba touto technologií. Na obrázku 7 je vidět řez strukturou embedded systému s jedním pouzdem.

Základním substrátem bude FR-4 oboustranně plátovaný. Na hlavní (top) straně bude osazena součástka, spodní (bottom) strana bude sloužit na případné propojení. Takto vytvořená DPS bude zalisována z obou stran tenkými vrstvami prepregu. Při pohledu v řezu je vidět několik na sobě navrstvených fólií prepregu a malá kavita mezi pouzdem a prepregy. Vznikne 4 vrstvá embedded struktura. Jednotlivé struktury budou na sebe navrstveny, propojeny v celek funkčního řízeného usměrňovacího můstku.

Výhodou této technologie je ochrana pouzdra součástky a vodivého motivu před mechanickým poškozením, zábrana vniku vlhkosti, prachu nebo jiných nečistot. Nevýhodou je nemožnost opravy a náročnější požadavky na technologii.



Obrázek 7 Řez strukturou embedded systému

6 Pájky, pájecí pasty, osazení

Pájení je v dnešní době nejrozšířenější spojování součástek. Kvalitně zapájený spoj má velký vliv na spolehlivost a jakost výrobku. Pájky a pájecí pasty lze obecně rozdělit na olovnaté a bezolvnaté. Bezolvnaté pájky se v dnešní době používají (dle nařízení EU o eliminaci zdraví škodlivých materiálů v elektrotechnické výrobě od 1. 6. 2006) pro většinu běžných spotřebních aplikací. [6]

6.1 Složení pájecí pasty

Pájecí pasta se skládá z 3 základních složek, jejich vhodným smícháním získáme pasty s rozdílnou smáčivostí, viskozitou a oxidací:

- Pájecí materiál – kuličky pájecí slitiny v řádech μm
- Tavidlo – převládá použití „no clean“ tavidel, protože nezanechávají žádné množství zbytků a odpadají tak náklady na čištění
- Pojivové složky – rozpouštědla, aktivátory, zahušťovadla a teplotní stabilizátory – upravují viskozitu a vlastnosti během pájení na požadovanou hodnotu

6.2 Olovnaté pájky

Slitina SnPb s bodem tání 189°C (větší procesní okno). Použití pouze v domácích podmínkách, prototypch nebo v elektrických zařízeních závislých přímo na zdraví člověka (letectví, medicína). Výhody pájek - lesklejší spoje, které tolik nedegradují v čase, lepší smáčivost, roztékavost, menší povrchové napětí.

6.3 Bezolvnaté pájky

Slitiny SAC (Sn Ag Cu), kde je největším podílem zastoupen Sn. Slitiny SAC se liší teplotou tavení $212-219^\circ\text{C}$ podle podílu kovů. Tato vyšší teplota má za následek nižší procesní okno (jen cca 20°C). Vyznačují se zašedlými spoji, uvnitř pájky větší je možnost vzniku bublin, na povrchu trhliny nebo zvrásnění. Mají horší roztékavost a smáčivost vlivem vyššího povrchového napětí. Ke zlepšení výsledků se často používá dusíková atmosféra.

6.4 Nanášení pájecí pasty

Nanášení pájecí pasty je uskutečňováno základními metodami:

- Šablonovým tiskem
- Sítotiskem
- Dispenzerem

Přičemž každá metoda může být realizována:

- Ručně
- Poloautomaticky
- Automaticky

6.4.1 Nanášení pasty dispenzerem

Pneumatický dispenzer umožňuje nanést přesné množství pájecí pasty. Proces je regulován pomocí tlakového ventilu, kdy tlak vytlačí pastu z kartuše přes kanylu. Průměr kanyly definuje množství nanesené pájecí pasty. Tlakový ventil je ovládán pomocí nožního pedálového spínače.[8]

6.5 Osazení SMD

Na osazení substrátu součástkami bude použito pracoviště vybavené vakuovým osazovacím zařízením. Osazovací hlava na zařízení umožňuje pohyb ve všech třech osách. Její umístění je na pohyblivém rameni, které umožňuje uchopení SMD součástek přísátím, přemístění včetně otočení do požadované orientace a osazení na substrát. Přisávání k součástce je spouštěno přítlačným spínačem spojeným se sací kanylou, kdy se spustí prvním stiskem a druhým vypne. [8]

7 Pájení

Proces, kdy dojde ke spojení 2 nebo více kovových částí roztaveným kovem (resp. vhodnou slitinou), který má nižší bod tavení, než spojované části. Pájení se dělí podle teploty liquidu na měkké a tvrdé, podle způsobu na ruční a strojní. V mikroelektronice převažuje měkké strojní pájení (do 260 °C). Ruční pájení se používá pouze při opravách, malých sériích nebo při dopajování speciálních komponent (např. konektory, jejichž obal tvoří tepelně neodolný plast). Vhodné pájení DPS je nezbytné pro dlouhou životnost a jakost celého výrobku.

Měkké pájení je realizováno 3 základními způsoby:

- Pájení vlnou
- Ruční pájení
- Pájení přetavením (přetavení nanesené pájecí pasty v pecích nebo parách)

7.1 Podélný teplotní profil

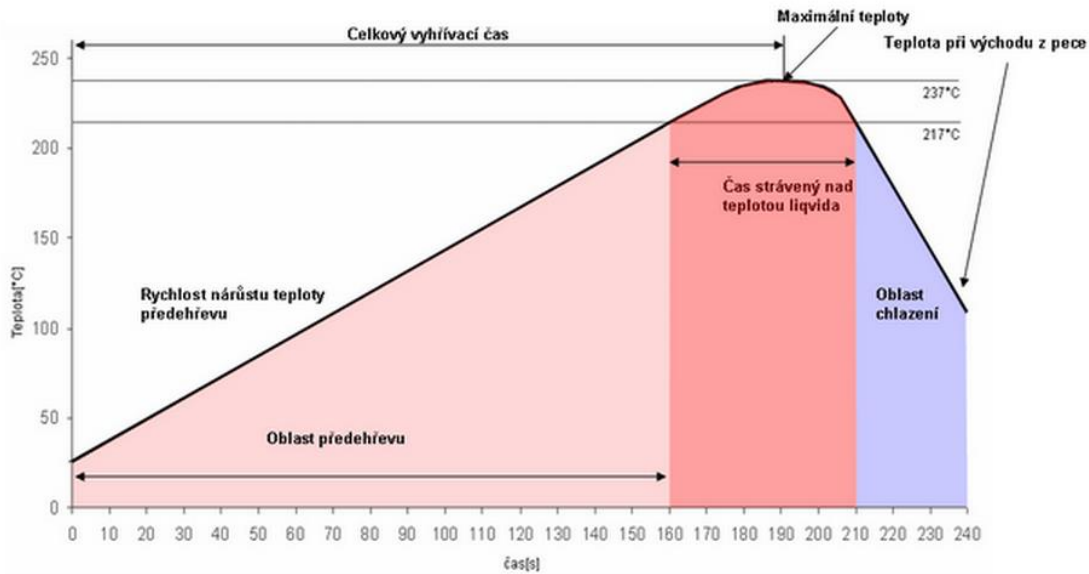
Podélný teplotní profil je graf závislosti teploty na čase pájení. Kromě termokamer je to jediný spolehlivý nástroj, který poskytuje informace během pájecího procesu. Jsou rozlišovány 2 typy:

- Sedlový profil - RSS (Ramp Soak Spike)
- Lineární profil - RTS (Ramp To Spike)

RTS profil vykazuje méně problémů s pájitelností, protože tavidlo vydrží déle v oblasti přehřevu. To vede k lepšímu smáčení – zvyšuje účinnost, snižuje defekty po pájení a zjednodušuje pájecí profil. RTS profil je k vidění na obrázku 8, jeho důležitými parametry jsou:

- Oblast přehřevu (∇ nesmí přesáhnout 4-5°C/s kvůli rovnoměrnému ohřevu součástek a DPS, aktivace tavidla, odpaření těkavých složek)
- Oblast přetavení (Maximální teplota T_{MAX} nesmí překročit hranici odolnosti plastových součástí -patic, konektorů. Čas nad teplotou tavení T_{LIQ} by měl být řádově v desítkách sekund)
- Oblast chlazení (∇ alespoň 5°C/s, což způsobí minimální nárůst intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a zabrání tvorbě velkých krystalů uvnitř spoje) [9]

Pozn.: U sedlového profilu je mezi oblastí přehřevu a přetavení ještě oblast teplotního vyrovnání, kdy dochází k dohřevu pomalejších součástek a samozřejmě aktivaci tavidla)



Obrázek 8 Teplotní profil RTS pro pájecí slitinu SAC [9]

Díky těmto informacím je možné upravit nebo regulovat kolísání teploty v pájecích zónách pecí, zjišťovat rozdíly mezi skutečnou a teoretickou teplotou. K měření se používají termočlánky nebo profiloměry. Ideální teplotní profily většinou poskytují výrobci k danému typu pájecí pasty.

7.2 Defekty po pájení

Nedodržením vhodného teplotního profilu daného výrobcem nebo špatného výběru pájecí slitiny vůči povrchové úpravě DPS může dojít k defektům po pájení. Nejčastějšími defekty jsou (příčiny):

- Můstky (nevhodně nanesená pájecí pasta, špatná teplota při pájení, dlouhá délka pájení, přehřátí spoje, nevhodné nebo chybějící tavidlo, špatný návrh)
- Pomerančová kůra (špatný teplotní profil, oxidace v průběhu pájení v důsledku nedostatku tavidla nebo jeho nedostatečné aktivity)
- Pavučiny (příliš aktivní tavidlo, nadměrná tvorba oxidů)
- Kuličky (nevhodně provedené nanášení pájky, příliš vysoká teplota pájky nebo aktivní tavidlo)
- Tombstoning (velké povrchové napětí tavené pájky a teplotní rozdíly na substrátu)
- Pootočení (rozdílné povrchové napětí, nevhodně nanesená pasta)
- Málo pájky (nevhodně nanesená pájecí pasta, nevhodná pasta)
- Špatná smáčivost (špatná povrchová úprava, nevhodné nebo slabé tavidlo) [10]

Praktická část

Praktická část se zabývá simulací, postupem výroby řízeného usměrňovacího můstku formou embedded systému včetně měření na hotovém výrobku a srovnáním naměřených parametrů s komerčním neřízeným usměrňovačem.

8 Simulace můstkového zapojení v OrCAD PSpice

Před samotnou výrobou obvodu je nutné ověřit teoretické poznatky simulací ve vhodném programu, kde budou odhaleny případné nedostatky z návrhu.

Pro simulaci neřízeného usměrňovacího můstku byla použita křemíková dioda SBM1040. PSpice model byl dohledán na www stránkách. [11] Textový zápis pro simulaci v programu je uveden v příloze 1. Výstupní charakteristiky ze simulace jsou k vidění na obrázcích 9 a 10.

Obvod byl simulován pro proud zátěží I_Z 3 A při vstupním střídavém napětí 30 V stř s frekvencí 50 Hz. Bylo nutné dopočítat zatěžovací odpor:

$$R_Z = \frac{U_Z}{I_Z} [\Omega] \quad (11)$$

Dosazení do rovnice 11:

$$R_Z = \frac{30}{3} = 10 \Omega.$$

Simulace byla provedena i pro vyhlazovací kondenzátor. Akceptované zvlnění výstupního napětí ΔU bylo zvoleno 1,5 V a Δt 8 ms (méně než polovina periody sítě). Pro výpočet filtračního kondenzátoru platí vztah:

$$C = \frac{I_Z * \Delta t}{\Delta U_Z} [F] \quad (12)$$

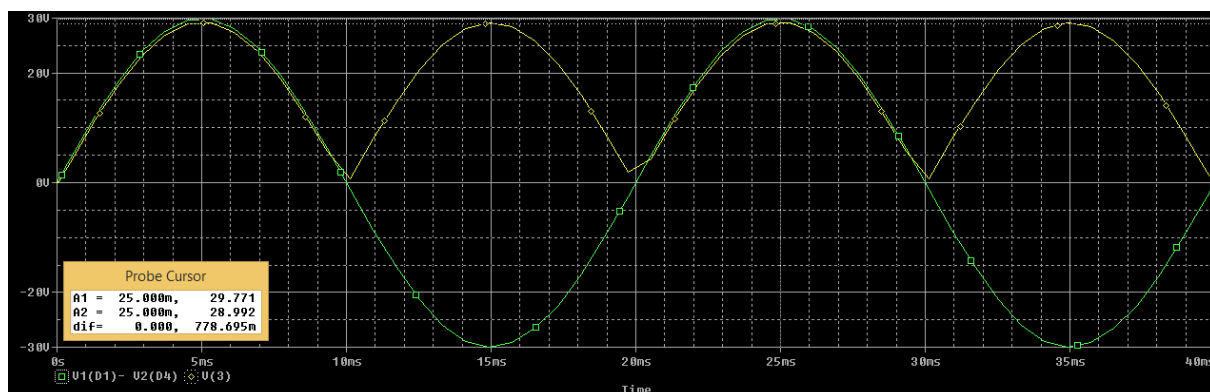
Dosazením do rovnice 12:

$$C = \frac{3 * 8 * 10^{-3}}{1,5} = 0,016 F$$

Na obrázku 9 je vidět vstupní napětí (zelené) a výstupní usměrněné napětí (žluté). Pomocí kurzorů byl určen úbytek napětí 778,695 mV. Lze snadno dopočítat ztrátový výkon usměrňovače:

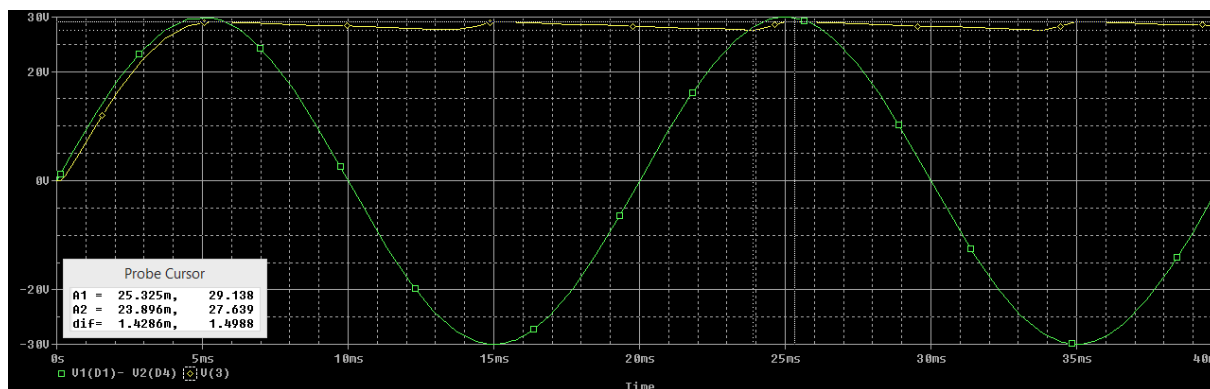
$$P_{ZU} = U_{ZTR} * I_Z = 0,7787 * 3 = 2,33 \text{ W}$$

Simulovaný ztrátový výkon je 2,33 W, což téměř odpovídá teoreticky vypočtené hodnotě z příkladu 1 (2,28 W).



Obrázek 9 Vstupní (zelené) a výstupní (žluté) napětí neřízeného můstkového usměrňovače ze simulace PSpice bez vyhlazovacího kondenzátoru

Na obrázku 10 je výstup ze simulace se zapojeným vyhlazovacím kondenzátorem. Pomocí kurzorů byl změřen ΔU 1,4988 V, což odpovídá teoreticky spočítané hodnotě z rovnice 12 (1,5 V).



Obrázek 10 Vstupní (zelené) a výstupní (žluté) napětí neřízeného můstkového usměrňovače ze PSpice s vyhlazovacím kondenzátorem

Simulaci řízeného usměrňovacího můstku nebylo možné udělat, protože k integrovanému obvodu LT4320 neexistuje PSpice model.

9 Výrobní postup

V této kapitole je popsán pouze stručný úvod posloupnosti úkonů výroby řízeného můstkového usměrňovače. Jednotlivé výrobní kroky jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách.

Cílem je vyrobit můstkový usměrňovač formou embedded systému (podrobněji v kapitole 5). Nejdříve bude nutné navrhnout schéma zapojení ve vhodném prostředí. Z poskytnutých dat zhotoví ČEMEBO přířez multiDPS.

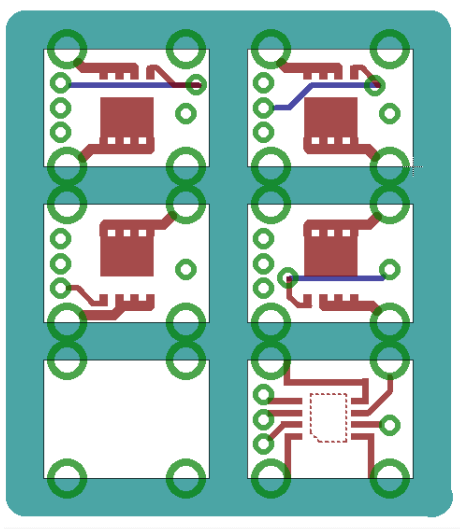
Součástky budou osazeny a zapájeny na UMEL. Tato multiDPS není hotovým výrobkem, ale bude odeslána zpět do ČEMEBA na lisování prepregu, provrtání přířezu, prokovení a frézování.

Takto zhotovené embedded systémy budou na UMEL proměřeny. Nepoškozené kusy embedded systémů budou na sebe navrstveny, propojeny do celku a vznikne funkční řízený usměrňovací můstek.

Měřením funkčního kusu budou ověřeny teoretické parametry (podrobněji kapitola 3) a na závěr práce bude řízený můstkový usměrňovač srovnán s komerčně prodávaným neřízeným můstkovým usměrňovačem podobných parametrů.

9.1 Návrh schéma DPS

Pro návrh schématu DPS existuje mnoho vývojových prostředí a programů pro toto určených - ORCAD, PADS, EAGLE atd. Pro potřeby bakalářské práce bylo zvoleno jednoduché návrhové prostředí EAGLE. Hlavními hledisky byl poměrně jednoduchý návrh pouze 5 součástek (20 vývodů) na dvoustrannou DPS, kde na horní straně (top; červená) budou součástky a spodní (bottom; modrá) strana se použije pouze na případné propojky. Propojky byly nutné nakonec 3. Výsledný návrh DPS je k vidění na obrázku 11.



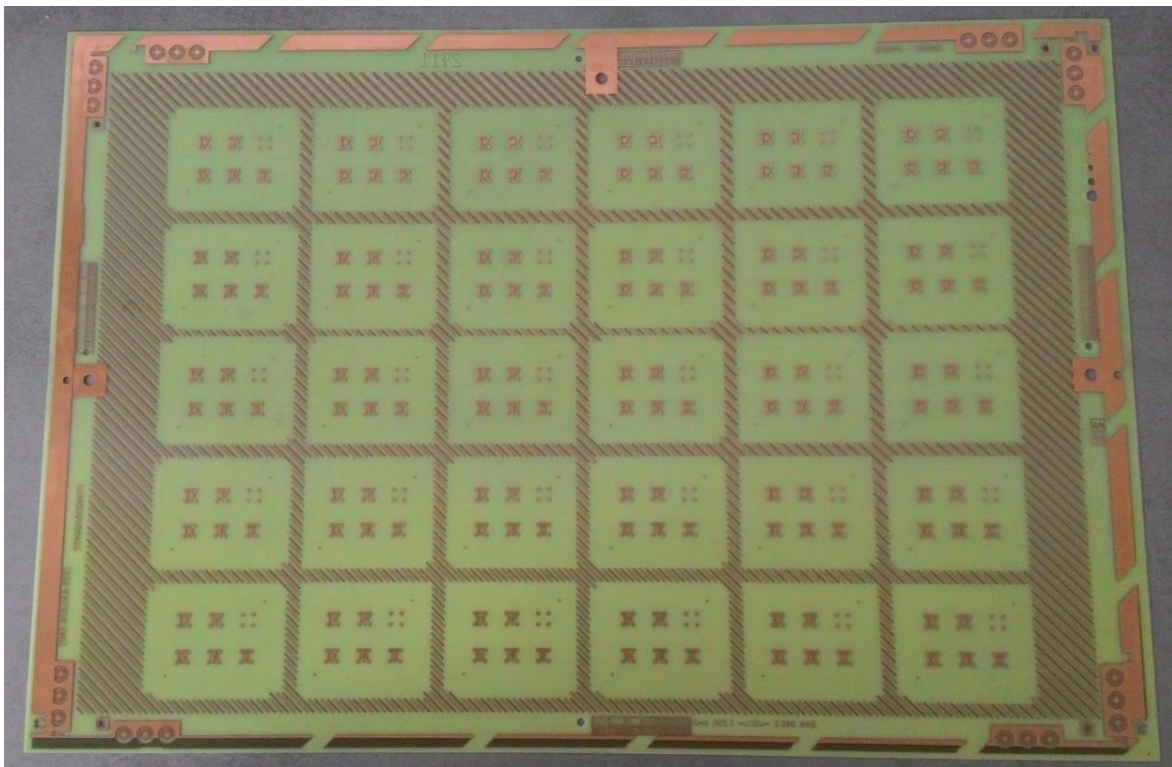
Obrázek 11 DPS EAGLE

9.2 Tvorba DPS

Celý Přířez neosazené multiDPS lze vidět na obrázku 12. Je na ní vytvořeno 30 obvodů, osazeno bude 10 vzorků. Rozměry jsou 533 x 285 x 0,36 mm. Jedná se o materiál FR-4. Z horní strany (top, na obrázku 12) je vytvořena vodivá síť dle návrhu z EAGLE. Na spodní (bottom) straně jsou propojky. Tloušťka měděné folie je 35 μm . Jako povrchovou úpravu byla aplikována OSP (kvůli dokonale rovnému povrchu - vzhledem kvůli malým rozměrům pájecích plošek by mohl HAL svou nerovinností povrchu vyvolat problémy s vycentrováním při osazování součástky). Multideska je bez nepájivé masky.

MultiDPS pro osazení součástek vytvořila firma ČEMEB0. Výrobní postup je složen těchto kroků:

- Paketování
- Vrtání
- Kartáčování
- Laminace suchého rezistu
- Expozice
- Vyvolání
- Leptání
- AOI (optické testování)
- OSP



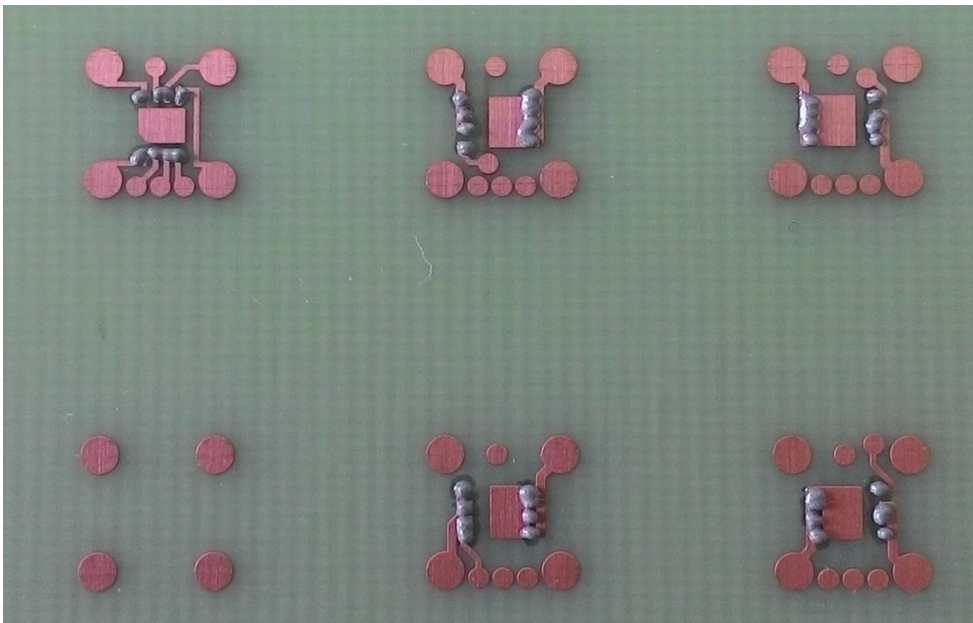
Obrázek 12 Přířez multiDPS

9.3 Nanesení pájecí pasty

Pájecí pasta byla nanesena dispenzerem (vnější průměr jehly 0,62 mm, tlakový ventil cca 3 kg/cm²). Byla použita „no clean“ bezolovnatá pájecí pasta NXG1 (Sn96,5Ag3Cu0,5) firmy Kester [12]. Tato pasta byla zvolena kvůli vyšší teplotě tavení, protože při lisování prepregu je nutné vyvinout teploty okolo 150 °C a to je teplota blízká se T_{LIQ} bezolovnaté pájky – což by mohlo ohrozit posunutí součástky. Pracoviště je zobrazeno na obrázku 13 a na obrázku 14 je k vidění průběh nanášení pájecí pasty. Fotografie byla pořízena během procesu nanášení, na chladicích ploškách ještě nebyla pájecí pasta nanesena.



Obrázek 13 Osazovací pracoviště



Obrázek 14 Nanesení pájecí pasty

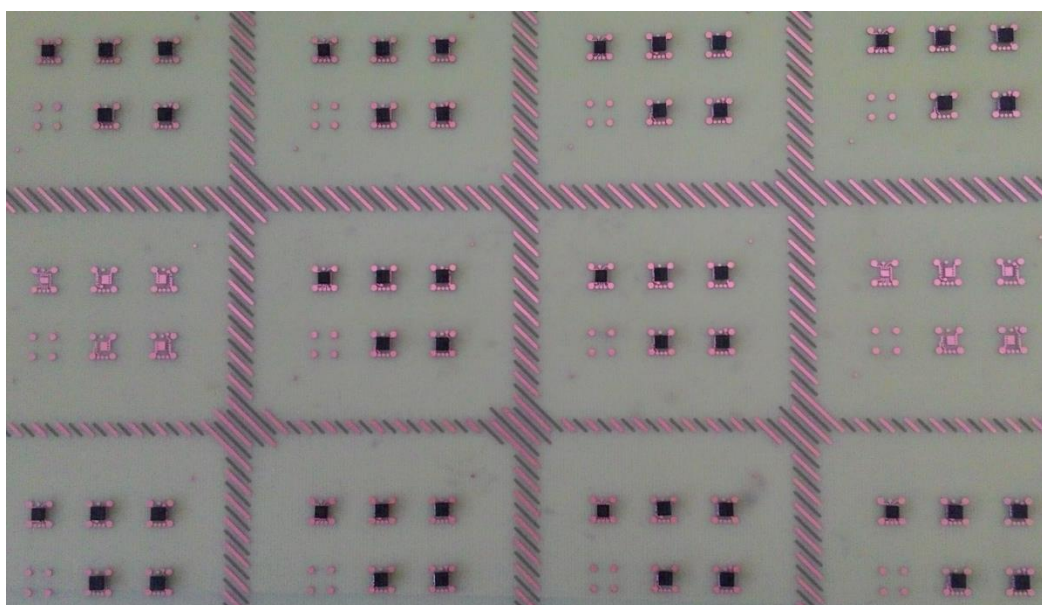
9.4 Přetavení pájecí pasty

Přetavení pájecí pasty proběhlo v reflow peci ESSEMTEC RO300FC (obrázek 15). Jedná se o čtyř zónovou pec s dopravníkem o maximální šířce 30 cm podporující bezolovnatý pájecí proces [13].



Obrázek 15 ESSEMTEC RO300FC

Na obrázku 16 je zobrazen celý přířez osazených součástek, nyní už po přetavení.



Obrázek 16 Přířez po přetavení

9.5 Statistika a vyhodnocení poruch po přetavení

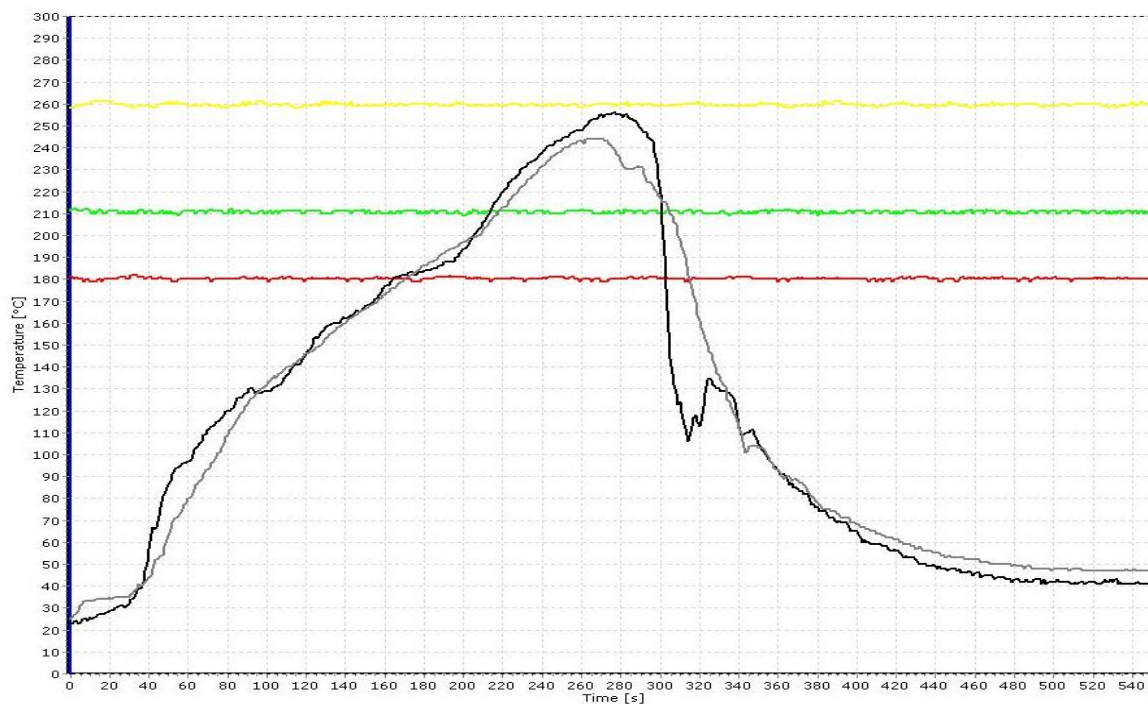
Na obrázcích 19 – 22 jsou zobrazeny poruchy spojů po přetavení. Při tomto zjištění je nutné vyhodnotit a upravit pájecí proces tak, aby byly poruchy omezeny (pokud možno eliminovány) a zvýšila se tak jakost a životnost spoje. Proto bude srovnán reálný teplotní profil pořízený během přetavení s teplotním profilem udaným výrobcem.

Ideální RTS profil byl dohledán v datasheetu k pájecí pastě. [12] Reálný teplotní profil pořízený během přetavení teplotní profil lze vidět na obrázku 17. V tabulce 4, kde jsou srovnány oba profily, vidíme, že teplotní profil udaný výrobcem byl dodržen.

9.5.1 Teplotní profil

Tabulka 4 Teplotní profily

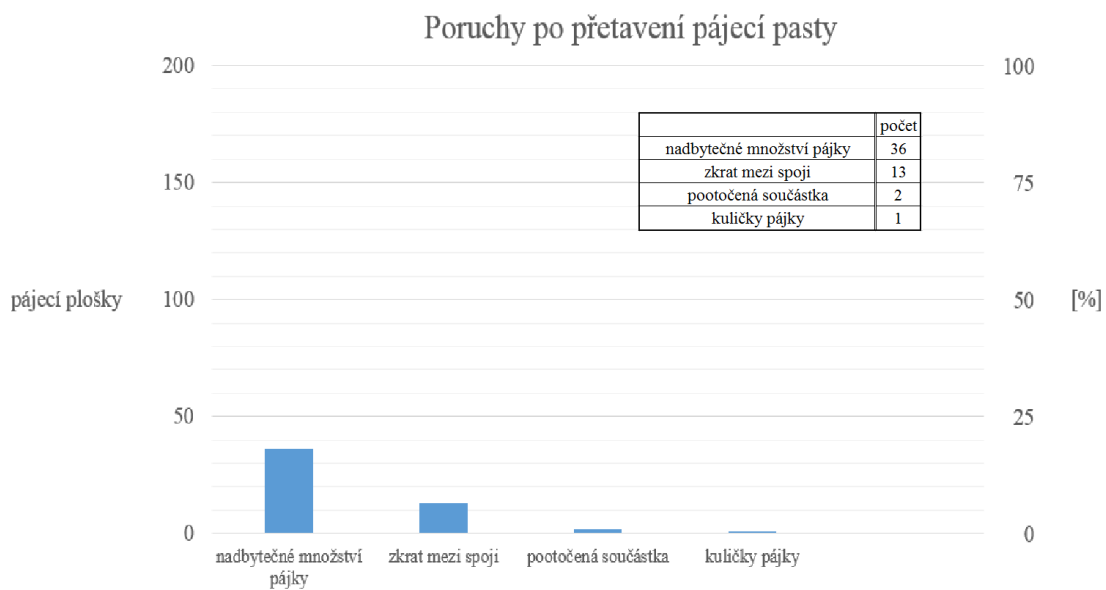
parametr	jednotka	KESTER	reálný
∇ přehřevu	[°C/s]	< 2,5	1,176
T _{MAX}	[°C]	235 - 250	245
T _{LIQ}	[°C]	45 - 90	85
∇ chlazení	[°C/s]	3,5	3,444
Celkový vyhřívací čas	[s]	180-300	270



Obrázek 17 Použitý teplotní profil

9.5.2 Poruchy po přetavení

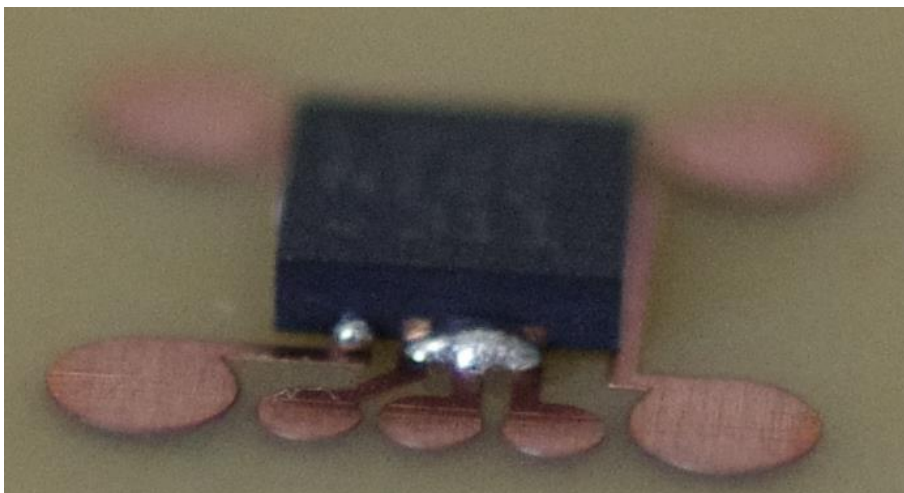
Pro přehlednost jsou výsledky zobrazeny v grafu na obrázku 18. Celkem jsou vyhodnoceny poruchy z 200 pájecích plošek (50 součástek). Z grafu je patrné, že největší množství poruch (18 %) tvoří nadbytečné množství pájecí pasty a 6,5 % poruch zkrat mezi vývody, které jsou způsobeny rovněž velkým množstvím pájecí pasty. Řešením těchto problémů bude použití jiné jehly (s menším průměrem) do disperzeru (nebo jiný způsob nanesení pasty tiskem přes šablonou nebo síto).



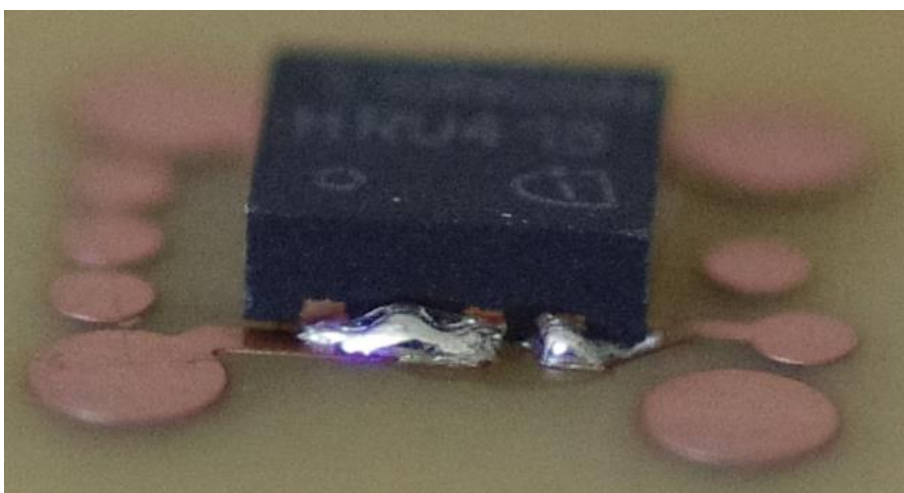
Obrázek 18 Poruchy po přetavení



Obrázek 19 Vhodně přetavené



Obrázek 20 Kulička pájky (vlevo), zkrat vývodů (vpravo)



Obrázek 21 Nadbytek pájky



Obrázek 22 Pootočená součástka

9.6 Tvorba embedded systému

Osazená multiDPS byla odeslána k dokončení procesů v ČEMEBO. Na osazenou FR-4 budou z obou stran nanесeny folie prepregů, jejich zalisováním dojde k vytvrzení a vznikne 4 vrstvý embedded systém.

Výhodou je ochrana pouzdra a spojů před vnikem vlhkosti, prachu nebo jiných nečistot, nehrozí mechanické poškození. Nevýhodou je nemožnost opravy při poruše nebo zničení součástky (přepětím, nadproudy).

Tento proces měl v ČEMEBO následující výrobní operace:

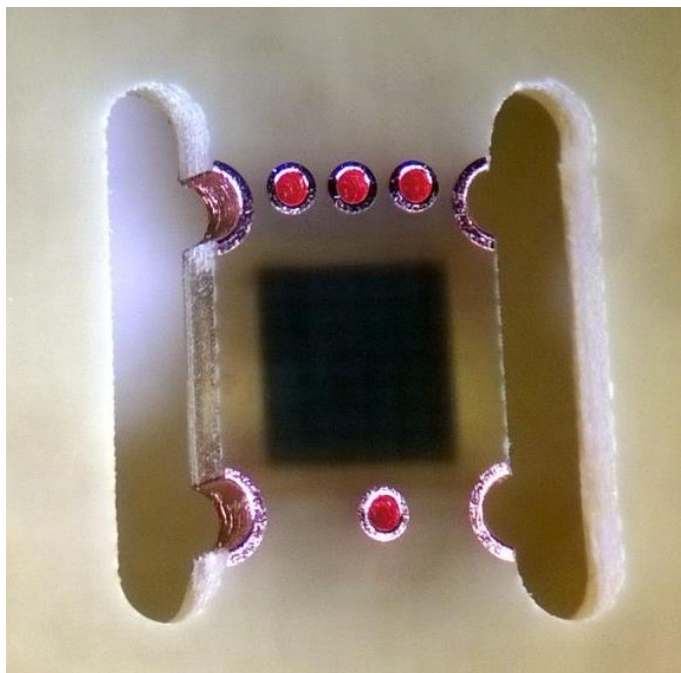
- Černění
- Sušení
- Lisování (know-how)
- Frézování jádra
- Vrtání slisovaného multilayeru
- Manganistan
- Prokovení otvorů
- Laminace suchého rezistu
- Expozice
- Vyvolání
- Prokovení (galvanické)
- Leptání
- Mezioperační kontrola
- HAL (bezolovnatý)
- Finální frézování
- Výstupní kontrola

Na obrázku 23 je zobrazen galvanicky prokovený přířez desky z ČEMEBO.



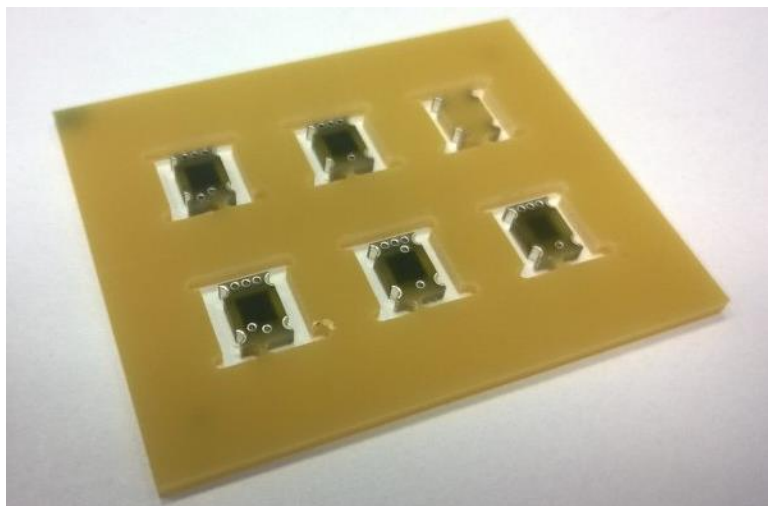
Obrázek 23 Slisovaný přířez 4V DPS galvanicky prokovené (ČEMEBO)

Obrázek 24 zachycuje detail po frézování embedded systému v ČEMEBO. Je na něm dobře viditelný už zalisovaný I O. V řezu jsou vidět jednotlivé vrstvy prepregu. Pro představu miniaturizace – šířka vyfrézované plochy je 1,5 mm. Tloušťka desky je 1,8 mm.



Obrázek 24 Detail frézování

Obrázek 25 zachycuje přířez už vyfrézovaný s prokovenými otvory metodou HAL (bezolovnatý). Rozměry desky jsou 55,12 x 44,07 x 1,8 mm. Těchto 5 embedded systémů bude navrstveno na sebe a propojeno. Vznikne tak funkční řízený usměrňovací můstek.



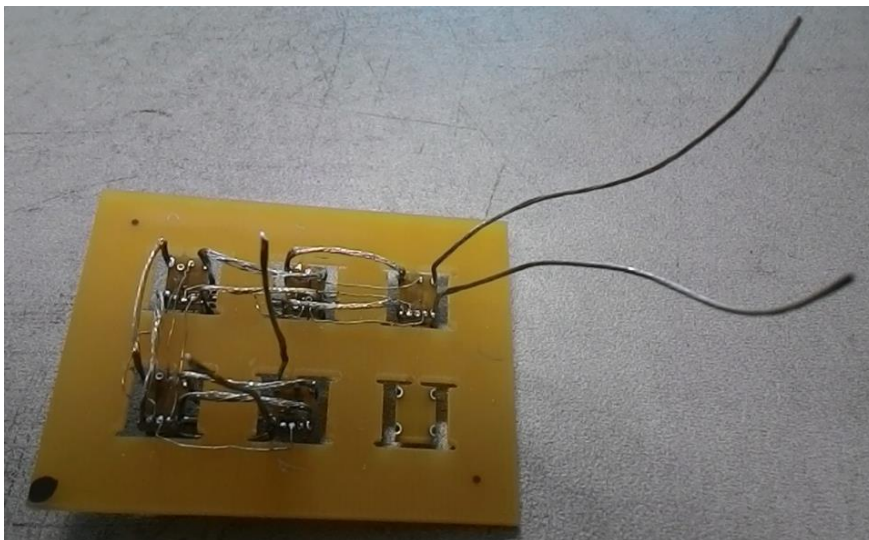
Obrázek 25 Výstupní DPS z ČEMEBO

9.7 Měření a testování

Před konečným složením embedded systémů do celku bylo provedeno měření případných zkratů. Všechny desky byly vpořádku.

Jako vzorek z 10 ti desek byla jedna vybrána a propojena vodiči pro potřeby měření. Fotografie propojené DPS je na obrázku 26. Nejdříve bylo nutné změřit, jestli se tranzistory při změně polarity U_{VST} správně otevírají a zavírají. Po srovnání hodnot z tabulky 5 a principiální funkce z teoretického úvodu (kapitola 3) lze konstatovat, že řízený usměrňovač funguje správně.

Testování se zátěží proběhlo s použitím laboratorního zdroje PSM3/3A [14] a dvou multimetrů UNI-T UT805A [15], se kterými bylo měřeno U_{VST} a U_Z . Měřeno s U_{VST} 10 – 30 V se zatěžovacím proudem 0,1 – 3 A. Jako zátěž byly použity výkonové odpory 100 Ω / 10 W, 39 Ω / 20 W, 20 Ω / 20 W a 10 Ω / 20 W. Naměřené hodnoty pro obě polarity U_{VST} jsou uvedeny v tabulkách 6 a 7.



Obrázek 26 Propojení jednoho vzorku pro měření a testování

Tabulka 5 Měření otevřených a zavřených tranzistorů při změně polarity vstupu

	IN1 + IN2 -		IN1 - IN2 +	
	$U_{VST} = 9,99 \text{ V}$		$U_{VST} = 10,04 \text{ V}$	
	$U_Z = 9,92 \text{ V}$		$U_Z = 9,98 \text{ V}$	
	UGS	UDS	UGS	UDS
	[V]	[V]	[V]	[V]
TG1	3,17	-0,07	0	9,94
BG1	8,71	0	0	10
TG2	0	9,93	3,32	-0,06
BG2	0	9,93	8,72	0

Z tabulky 6, měřené při polaritě vstupů IN1 + a IN2 - je zřejmé, že usměrňovač má ztrátové napětí U_{ZTR} okolo 70 mV na I_Z 0,1 A (se zvyšujícím se proudem roste U_{ZTR} až 185 mV na 3,08 A). Ztrátový výkon usměrňovače P_{ZU} je od 7,2 mW (při U_{VST} 9,99V a I_Z 0,1 A) do 566,72 W (při U_{VST} 30 V a I_Z 3,08 A). P_{ZZ} značí ztrátový výkon na zátěži.

Tabulka 6 Měření se zátěží vstup IN1 + a IN2 -

Vstup: IN1 + a IN2 -						
R_Z	U_{VST}	U_Z	U_{ZTR}	I_Z	P_{ZU}	P_{ZZ}
[Ω]	[V]	[V]	[mV]	[A]	[mW]	[W]
100	9,990	9,918	72	0,100	7,200	1,000
	15,030	14,985	45	0,150	6,750	2,250
	19,980	19,936	44	0,200	8,800	4,000
	25,035	24,988	47	0,250	11,750	6,250
	29,976	29,926	50	0,300	15,000	9,000
39	10,023	9,951	72	0,260	18,720	2,636
	15,084	15,027	57	0,390	22,230	5,932
	19,950	19,890	60	0,510	30,600	10,144
	25,060	24,990	70	0,640	44,800	15,974
	30,009	29,937	72	0,770	55,440	23,123
20	10,034	9,970	64	0,510	32,640	5,202
	14,991	14,916	75	0,760	57,000	11,552
	19,952	19,866	86	1,010	86,860	20,402
	24,988	24,893	95	1,260	119,700	31,752
	29,950	29,840	110	1,510	166,100	45,602
10	10,035	9,950	85	1,030	87,550	10,609
	15,006	14,902	104	1,540	160,160	23,716
	20,030	19,907	123	2,060	253,380	42,436
	25,031	24,882	149	2,570	382,930	66,049
	29,985	29,801	184	3,080	566,720	94,864

Příklad výpočtu pro 1. řádek pro vstupy: IN1 + a IN2 -

$$U_{ZTR} = U_{VST} - U_Z = 9,990 - 9,918 = 0,072 \text{ V}$$

$$P_{ZU} = U_{ZTR} * I_Z = 0,072 * 0,1 = 0,0072 \text{ W}$$

$$P_{ZZ} = I_Z^2 * R_Z = 0,1^2 * 100 = 1 \text{ W}$$

Obdobně Tabulka 7 popisuje při polaritě vstupů IN1 – a IN2 +, že U_{ZTR} je pouze 61 mV (při U_{VST} 10 V a I_Z 0,1 A). Ztrátový výkon usměrňovače P_{ZU} je 6,1 mW. Při U_{VST} 30 V a zatěžovacím proudu I_Z 3,08 A je úbytek U_{ZTR} 185 mV a P_{ZU} 569,8 mW.

Tabulka 7 Měření se zátěží, vstup IN1 – a vstup IN2 +

Vstup: IN1 - IN2 +						
R_Z	U_{VST}	U_Z	U_{ZTR}	I_Z	P_{ZU}	P_{ZZ}
[Ω]	[V]	[V]	[mV]	[A]	[mW]	[W]
100	10,039	9,978	61	0,100	6,100	1,000
	15,078	15,039	39	0,150	5,850	2,250
	19,967	19,927	40	0,200	8,000	4,000
	24,962	24,922	40	0,250	10,000	6,250
	30,009	29,968	41	0,300	12,300	9,000
39	10,056	9,991	65	0,260	16,900	2,636
	15,012	14,929	83	0,380	31,540	5,632
	20,015	19,938	77	0,510	39,270	10,144
	25,024	24,912	112	0,640	71,680	15,974
	29,994	29,898	96	0,760	72,960	22,526
20	10,020	9,963	57	0,510	29,070	5,202
	14,994	14,926	68	0,760	51,680	11,552
	19,984	19,909	75	1,010	75,750	20,402
	24,986	24,899	87	1,260	109,620	31,752
	30,010	29,913	97	1,520	147,440	46,208
10	9,990	9,919	71	1,020	72,420	10,404
	15,002	14,917	85	1,540	130,900	23,716
	20,015	19,904	111	2,060	228,660	42,436
	25,055	24,914	141	2,570	362,370	66,049
	30,003	29,818	185	3,080	569,800	94,864

Příklad výpočtu pro 1. řádek pro vstupy: IN1 + a IN2 –

$$U_{ZTR} = U_{VST} - U_Z = 10,039 - 9,978 = 0,061 \text{ V}$$

$$P_{ZU} = U_{ZTR} * I_Z = 0,061 * 0,1 = 0,0061 \text{ W}$$

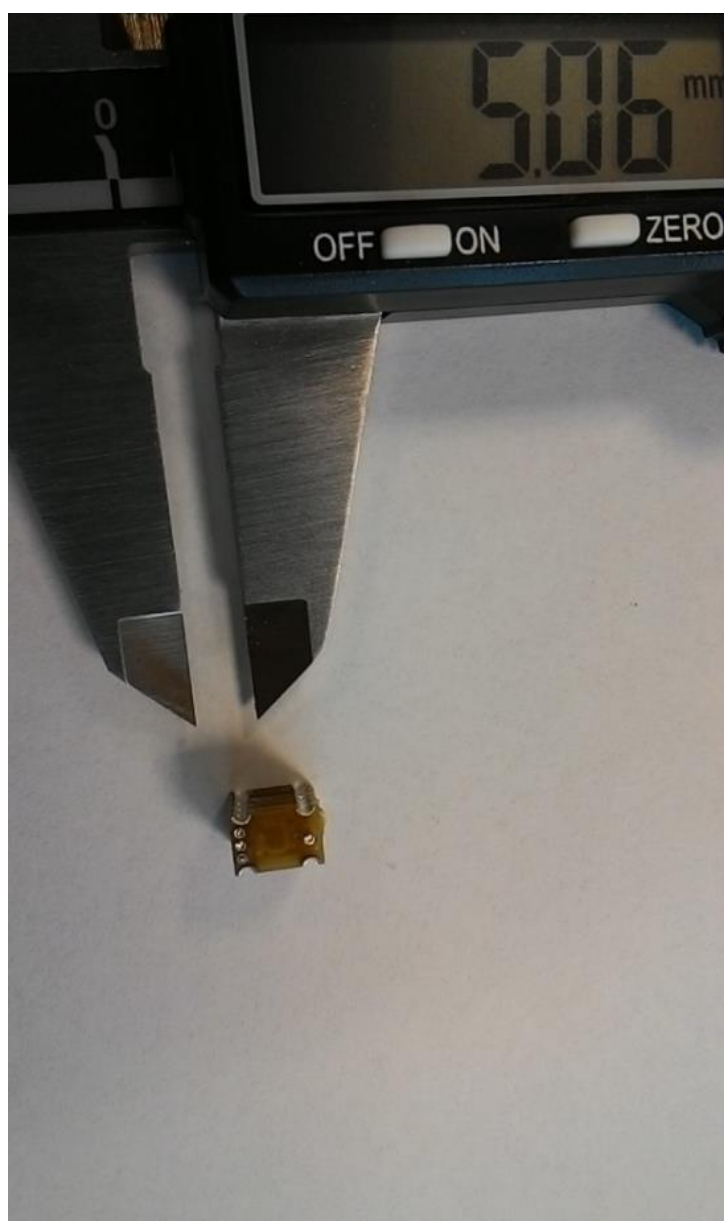
$$P_{ZZ} = I_Z^2 * R_Z = 0,1^2 * 100 = 1 \text{ W}$$

Z dalšího vzorku byl složen druhý řízený usměrňovací můstek, viz obrázek 27, jenž je konečným výrobkem. Jeho rozměry jsou 4,9 x 7 x 9 mm. V sériové výrobě může být výška (jeden embedded systém má 1,8 mm) výrobku snížena o několik desetin mm, neboť výška pouzdra čipu je 1 mm (u použitých tranzistorů, pro LT4320 je výška pouzdra 0,8 mm) a tloušťka nosné podložky 0,35 mm. Embedded systém může být snížen až o 0,3 – 0,4 mm, což při navrstvení sestavení funkčního celku (složeného

z 5 ti embedded systémů) tvoří snížení o 1,5 – 2 mm (výsledný celek po úpravě by mohl mít rozměry až 4,9 x 7 x 7 mm).

Uvedený laboratorní postup byl použit kvůli možnosti měření všech součástí po zalisování (zda-li během laminace nevznikly zkratky nebo jiné případné poruchy ovlivňující správnou funkčnost a bylo možné seskládat ze všech součástí alepoň jeden funkční usměrňovač).

U sériové výroby proběhne laminace, frézování, sesouhlasení otvorů všech pěti embedded systémů. Poté dojde k provrtání a prokovení celého přířezu, kdy budou automaticky propojeny všechny součástky. Vznikne tak 20 ti vrstvá DPS o rozměrech 9 x 7 x 4,9 mm (uváženo před případným zmenšením výšky), která může být osazena už jako funkční blok do nadřazeného systému.



Obrázek 27 Konečný výrobek – Řízený můstkový usměrňovač

10 Srovnání vyrobený řízený vs. neřízený usměřňovací můstek

Na závěr práce je v tabulce 8 uvedeno konkrétní srovnání základních parametrů vyrobeného řízeného můstku s komerčním neřízeným podobných parametrů. Ke srovnání a výběru byl použit katalog Farnell [14], platný k 2. 6. 2015, a pro srovnání byl vybrán jednofázový dvojcestný usměřňovač MULTICOMP CP1000[15].

Tabulka 8 Srovnání parametrů MULTICOMP CP1000 a řízeného usměřňovacího můstku

		MULTICOMP CP1000	řízený usměřňovací můstek	<i>MULTICOMP CP1000</i> řízený usměřňovací můstek
rozměry	[mm]	19,1 x 19,1 x 7,6	4,9 x 7 x 9	
V _O	[mm ³]	2772,6	309	9
I _{MAX}	[A]	10	10	
U _{MAX}	[V]	50	72	
U _{f/ZTR} (při U _{VST} = 30 V, I _Z = 3 A)	[V]	1,1	0,185	6
P _Z (při U _{VST} = 30 V, I _Z = 3 A)	[W]	3,3	0,567	6
provozní teplota	[°C]	125		
cena 1 kusu	[Kč]	138,903	301	0,5
cena 1 kusu (při objednání 100 kusů)	[Kč]	82,062	171	0,5

Výpočty:

Objem MULTICOMP CP1000:

$$V_1 = 19,1 * 19,1 * 7,6 = 2772,6 \text{ mm}^3$$

Objem řízeného usměřňovacího můstku:

$$V_2 = 4,9 * 7 * 9 = 308,7 \text{ mm}^3$$

Poměr V_K:

$$V_K = \frac{V_1}{V_2} = \frac{2772,6}{308,7} \approx 9$$

Poměr ztrátových napětí U_K :

$$U_K = \frac{U_f}{U_{ZTR}} = \frac{1,1}{0,185} \approx 6$$

Ztrátový výkon na MULTICOMP CP1000 při $I_Z = 3A$:

$$P_{Z1} \approx U_f * I_Z \approx 1,1 * 3 \approx 3,3 \text{ W}$$

Poměr ztrátových výkonů P_K :

$$P_K = \frac{P_{Z1}}{P_{ZU}} = \frac{3,3}{0,567} \approx 6$$

Cena součástek usměrňovacího můstku:

I O LT4320IDD = 223,223 Kč (1 ks); 111, 8 Kč (100 ks)

MOSFET BSZ110N06NS3 G = 19,311 (1 ks); 14,681 (400 ks)

Výpočet ceny pro 1 funkční kus: $1 * I O + 4 * MOSFET = 223,223 + 4 * 19,311 = 300, 5 \text{ Kč}$

Poměr ceny pro 1 ks:

$$C_{K1} = \frac{\text{cena MULTICOMP CP1000}}{\text{řízený usměrňovací můstek}} = \frac{138,903}{300,5} \approx 0,5$$

Výpočet ceny pro 100 funkčních kusů: $1 * I O + 4 * MOSFET = 111,8 + 4 * 14,681 = 170,5 \text{ Kč}$

Poměr ceny pro 100ks :

$$C_{K100} = \frac{\text{cena MULTICOMP CP1000}}{\text{řízený usměrňovací můstek}} = \frac{82,062}{170,5} \approx 0,5$$

Srovnání z tabulky 8 v konkrétních hodnotách je jasné a přehledné. Řízený můstkový usměrňovač má mnohem menší rozměry (9x menší objem). Při zatížení $I_Z = 3 \text{ A}$ má 6x menší ztrátové napětí (a tedy i 6x menší ztrátový výkon), ale je 2x dražší než MULTICOMP CP1000.

Závěr

Bakalářská práce v teoretické části stručně popisuje hlavní parametry usměrňovací diody, MOSFET tranzistoru, integrovaného obvodu LT4320, substrátů, pájek a myšlenku výrobního postupu DPS formou embedded systému - embedded systém je vícevrstvá struktura, jejíž základem je substrát jednostranně nebo oboustranně plátovaný. Jako mezioperační krok je na něm vytvořen vodivý motiv, nanese na pájecí pasta, osazena součástka a přetavena pájecí pasta. Dále dochází k laminaci vrstev prepregu, což způsobí zalisování celé součástky do struktury vícevrstvé desky. Takto zhotovená struktura (v bakalářské práci se jedná o 4 vrstvou strukturu) je embedded systém. Navrstvením všech 5 ti embedded systémů a jejich propojením vzniká funkční celek, který už může být osazen do nadřazeného systému. Součástka uvnitř desky má několik výhod - ochrana pouzdra a spojů před vnikem vlhkosti, prachu nebo jiných nečistot, dále ochrana součástky před mechanickým poškozením nebo chemickými vlivy a přispívá k miniaturizaci. Nevýhodou je náročný technologický postup a nemožnost opravy při případné poruše nebo zničení součástky.

Dále se v teoretické části přibližuje teorie a problematika jednofázových dvoupulzních usměrňovačů a to jak řízených, tak i neřízených.

Mezi výhody neřízeného můstkového usměrňovače se řadí výrazně nižší cena, nevýhodami jsou větší energetické ztráty, které jsou způsobeny vlastnostmi PN přechodu diody. Na diodě vzniká průchodem proudu úbytek $0,8 \approx 2 \text{ V}$ (simulací neřízeného usměrňovače byly ověřeny teoretické předpoklady o úbytku napětí na diodě). V důsledku toho pak dioda vytváří velký ztrátový výkon, který způsobuje lokální zahřívání okolí (DPS a součástek). Zvýšená teplota urychluje stárnutí materiálů a vede ke snížení životnosti, omezení funkce nebo i zničení celé DPS. U vyšších výkonů je nutné použití chladiče. Chladič zvýší rozměry, hmotnost a cenu DPS.

Výhod řízeného můstkového usměrňovače je několik. Generace ztrátového výkonu je způsobena pouze malým odporem kanálu v řádu jednotek až desítek $\text{m}\Omega$ a nízkým ztrátovým napětím U_{DS} v řádu desítek mV . Tento výkon neovlivňuje tolik okolní teplotu DPS a okolních součástek. Vyzařování malého ztrátového výkonu spolu s rozměry pouzder $3 \times 3 \times 1 \text{ mm}$ umožňuje výrobu formou embedded systému. Výsledkem je miniaturizace funkčního bloku (jednofázový dvojcestný usměrňovač) a úspora energie. Nevýhodou je v současné době několikanásobně vyšší cena.

Návrh, výroba a oživení řízeného můstkového usměrňovače je popsáno v praktické části. Simulace funkce byla provedena v programu OrCAD PSpice, návrh schéma prostřednictvím programu EAGLE, mezioperační kroky byly provedeny firmou ČEMEBO. Osazení DPS, pájení, komplementace a měření bylo provedeno na UMEL.

Výsledkem bakalářské je funkční prototyp řízeného můstkového usměrňovače vytvořeného formou embedded systému. Jeho rozměry jsou 4,9 x 7 x 9 mm. Další úpravou je možné výšku 9 mm ještě o 2 mm snížit. Při napájení 10 V se zatížením 0,1 A byl naměřen úbytek napětí 61 mV a ztrátový výkon 6,1 mW. U napájení 30 V se zatížením 3 A byl změřen úbytek napětí 185 mV a ztrátový výkon 0,567 W.

Řízený usměrňovací můstek je využitelný pro leteckou techniku, kamerové systémy, automobilové systémy, zdravotnictví či jiné speciální aplikace, kde je kladen důraz na vysokou jakost nebo snížení generace ztrátového výkonu.

Literatura

- [1] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika: [učebnice]*. 1. vyd.. České Budějovice: Kopp, 2005, 286 s. ISBN 80-723-2171-4.
- [2] VOBECKÝ, Jan. *Elektronika: Součástky, obvody, principy a příklady*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2000, 176 s. ISBN 80-247-9062-9.
- [3] BSZ110N06NS3 G: OptiMOS 3 Power-Transistor. *Infineon* [online]. 2009 [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSZ110N06NS3-DS-v02_04-en.pdf?fileId=db3a30431ddc9372011ebb15d4e8001a
- [4] LT4320: Ideal diode bridge controller. *LINEAR TECHNOLOGY* [online]. 2013 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4320fb.pdf>
- [5] *Neřízené diodové usměrňovače: stejnosměrné síťové napaječe*. VUT Brno, 2014. Návody do laboratorních cvičení. VUT Brno.
- [6] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [7] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. Brno, 2003. Elektronická skripta. VUT Brno. Vedoucí práce Petr Bača.
- [8] *Pájení, optická kontrola a měření teplotního profilu*: Laboratorní cvičení. VUT Brno, 2014.
- [9] *Pájení v elektrotechnice* [online]. VUT Brno, 2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>. Multimediální učebnice. VUT Brno.
- [10] SZENDIUCH, Ivan a Edita HEJÁTKOVÁ. *Moderní elektrotechnické technologie*. VUT Brno, 2014. Přednášky předmětu BMTS. VUT Brno. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [11] Gunthard Kraus. *Gunthard Kraus* [online]. 2010 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.gunthard-kraus.de/Spice_Model_CD/Vendor%20List/Diodes%20Incorporated/Spice/spicemodels_schottky_rectifiers.txt
- [12] NXG1 SOLDER PASTE. *KESTER* [online]. 2015 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.kester.com/products/product/NXG1-Solder-Paste/>

[13] ESSEMTEC RO300FC: Full Convection Reflow Oven. *ESSEMTEC* [online]. 2015 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.essemtec.com/product.aspx/SMT-Reflow-Soldering/Full-Convection-Reflow-Oven/?ArtNr=RO300FC>

[14] PSM3/3A: laboratorní zdroj. *GES: ELECTRONICS* [online]. 2015 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/psm-3-3a-GES07507320.html>

[15] UNI-T UT805A: digitální stolní multimetr. *UNI-T* [online]. 2013 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.uni-t.cz/p/stolni-multimetr-uni-t-ut805a>

[16] *FARNELL* [online]. 2015 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/>

[17] MULTICOMP CP1000: datasheet. *FARNELL* [online]. 2012 [cit. 2015-06-01]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1662105.pdf>

Seznam zkratek a symbolů

zkratka	význam	jednotka
A	Amper	
Ag	stříbro	
Al ₂ O ₃	korundová keramika	
AOI	automatická optická kontrola	
As	Arsen	
atd.	a tak dále	
BeO	beriliová keramika	
C	kapacita	F
C _K	poměr cen	
Cu	měď	
D	dioda	
DFN	Dual Flat No leads	
DPS	deska plošného spoje	
EMC	elektromagnetická kompatibilita	
EU	Evropská Unie	
f	frekvence	Hz
FR-2	substrát	
FR-4	sklolaminát	
G	gate	
Ga	Galium	
GaAs	galium-arsen	
GaP	galium-fosfor	
Ge	Germánium	
HAL	Hot Air Levelling	
I	proud	A
I O	integrováný obvod	
I _D	proud tekoucí drain	A
I _{EF}	efektivní proud	A
I _{imax}	maximální proud v propustném směru	A
I _{MAX}	Maximální přípustná hodnota proudu	A
I _{STŘ}	střední hodnota proudu	A
i _x	střídavý vstupní proud	A
I _Z	proud tekoucí zátěží	A
Kč	Koruna česká	
ks	kus	
LC	filtr skládající se z cívky a kondenzátoru	
LT4320	integrováný obvod	
MOSFET	Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor	
MSOP	Mini Small Outline Package	
n	elektron	
N	vodivost typu N	

NMOS	MOSFET s N kanálem	
OPN	oblast prostorového náboje	
OSP	Organic Solder Preservatives	
p	díra	
P	vodivost typu P	
Pb	olovo	
P _D	výkon na diodě	W
PDIP	Plastic Dual In-line Package	
P _K	Poměr výkonů	
P _M	ztrátový výkon mosfetu	W
PN	metalurgický přechod	
P _O	příkon	W
pozn.	poznámka	
P _Z	výkon	W
P _{ZU}	ztrátový výkon usměřovacího můstku	W
P _{ZZ}	ztrátový výkon na zátěži	W
R	odpor	Ω
R _D	diferenciální odpor diody	Ω
R _{DSON}	odpor kanálu DS v sepnutém stavu	Ω
RSS	Ramp Soak Spike	
RTS	Ramp To Spike	
R _Z	odpor zátěže	Ω
S	Source	
s	střída	
SAC	bezolovnatá pájka (SnAgCu)	
Si	křemík	
SMD	Surface Mounted Devices	
Sn	cín	
ss	stejnoseměrné napětí	V
stř	střídavé napětí	V
T	tranzistor	
TCE	teplotní koeficient roztažnosti	ppm K ⁻¹
T _g	teplota skelného přechodu	
tg δ	ztrátové číslo	
T _{LIQ}	teplota liquidu	°C
T _{MAX}	maximální teplota	°C
U	napětí	V
U _{AC}	střídavé napětí	V
U _d	difuzní napětí	V
U _{DS}	napětí mezi elektrodami Drain a Source	V
U _f	ztrátový úbytek napětí na diodě	V
U _{GS}	napětí mezi elektrodami G a S	V
U _K	poměr ztrátových napětí	
U _{MAX}	maximální hodnota napětí	V
U _p	prahové napětí	V

$U_{\text{šP}}$	špičkové napětí	V
U_{VST}	vstupní napětí	V
u_x	střídavé napájecí napětí	V
U_Z	napětí zátěže	V
U_{zmax}	maximální přípustné ztrátové napětí	V
U_{ZTR}	ztrátové napětí na mosfetu	V
U_{ZVL}	zvlněné napětí	V
V	Volt	
VA	Volt-amperová (charakteristika)	
V_K	poměr objemů	
V_O	objem	m^3
VV	vícevrstvá deska plošného spoje	
W	Watt	
Δt	časová změna	s
ΔU	napěťová změna	V
ε	permitivita	

Seznam příloh

Příloha 1 – Textový zápis pro simulaci neřízeného můstkového usměrňovače v programu PSpice

Příloha 2 – Datasheet tranzistoru NMOSBSZ110N06NS3 G

Příloha 3 – Datasheet integrovaného obvodu LT4320