



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PŘÍPRAVA LABORATORNÍCH CVIČENÍ Z OBLASTI EMC PŘI NÁVRHU PLOŠNÉHO SPOJE

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LABORATORY EXERCISES IN THE FIELD OF EMC IN PRINTED
CIRCUIT BOARD DESIGN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matěj Houdek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Matěj Houdek

ID: 245760

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Příprava laboratorních cvičení z oblasti EMC při návrhu plošného spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a sestavit pracoviště pro potřeby laboratorního vyučování z oblasti EMC při návrhu plošného spoje. Bude nutné sestavit desky plošného spoje tak, aby bylo možné ve výuce prezentovat např. vlivy: zemnění (jednobodové, vícebodové); vodivé plochy na velikost proudové smyčky; minimalizace proudových smyček délky spojů; vhodné rozmístění součástek; absenci blokovacích kondenzátorů; atd. Bude nutné laboratorně ověřit realizované desky plošného spoje a prezentovat správné postupy návrhy a srovnat s typickými chybami při návrhu DSP.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DŘÍNOVSKÝ, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: přednášky. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4202-3.

[2]https://www.emcstandards.co.uk/files/module_10a_v2_6_advanced_pcb_design_in_2022_taster.pdf

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 5.6.2025

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

předseda rady studijního programu

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 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá základními principy elektromagnetické kompatibility (EMC) se zaměřením na návrh desek plošných spojů (DPS). Vstupní část práce shrnuje přehled podstatných informací o EMC, včetně popisu zdrojů a typů rušivých signálů, způsobů jejich vazeb a příslušných norem. Hlavní důraz je kladen na pravidla návrhu DPS, která jsou dále prakticky uplatněna při návrhu DPS. V rámci práce byla navržena sada pěti DPS: tři z nich záměrně porušují jednu či více zásad návrhu, zatímco zbývající dvě desky představují kontrastní přístupy - jedna dodržuje všechna prezentovaná pravidla, druhá je naopak porušuje ve všech sledovaných oblastech. Tento přístup umožňuje experimentálně porovnat vliv dodržování návrhových pravidel na elektromagnetickou kompatibilitu. Součástí práce je rovněž návrh laboratorního měření, určeného pro výuku na Vysokém učení technickém v Brně.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetická kompatibilita, pravidla návrhu DPS, elektromagnetická susceptibilita, elektromagnetická interference, laboratorní cvičení

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the fundamental principles of electromagnetic compatibility (EMC), with a focus on printed circuit board (PCB) design. The introductory part of the thesis summarizes essential information about EMC, including descriptions of the sources and types of interference signals, coupling mechanisms, and relevant standards. The main emphasis is placed on PCB design rules, which are then practically applied during the PCB design process. As part of the work, a set of five PCBs was designed: three of them deliberately violate one or more design principles, while the remaining two boards represent contrasting approaches – one adheres to all the presented rules, whereas the other violates all of them in the monitored areas. This approach enables an experimental comparison of the impact of design rule compliance on electromagnetic compatibility. The thesis also includes the design of a laboratory measurement intended for teaching at Brno University of Technology.

KEYWORDS

Electromagnetic compatibility, PCB design rules, electromagnetic susceptibility, electromagnetic interference, laboratory exercises

HOUDEK, Matěj. *Příprava laboratorních cvičení z oblasti EMC při návrhu plošného spoje*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2025. Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Matěj Houdek
VUT ID autora: 245760
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Příprava laboratorních cvičení z oblasti EMC při návrhu plošného spoje

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 autorského 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.

Brno

.....

podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce panu prof. Ing. Janu Leuchterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
Cíle práce	13
1 Aspekty elektromagnetické kompatibility v elektrotechnických systémech a obvodech	14
1.1 Zdroje rušení	14
1.2 Typy rušivých signálů	15
1.3 Typy vzájemných vazeb	15
1.3.1 Induktivní vazba	16
1.3.2 Kapacitní vazba	16
1.3.3 Galvanická vazba	16
1.3.4 Elektromagnetická vazba (vazba vyzařováním)	17
2 EMC – normy, směrnice a doporučené postupy	18
3 Shrnutí zásad a návrh metodiky pro návrh desek plošných spojů z pohledu elektromagnetické kompatibility (EMC)	20
3.1 Vliv zemnění	20
3.1.1 Jednobodové zemnění	20
3.1.2 Vícebodové zemnění	22
3.2 Vedení spojů a rozlévání plochy mědi na DSP	22
3.2.1 Rozlévání plochy mědi na DSP	22
3.2.2 Vedení spojů	24
3.3 Rozmístění součástek vzhledem k EMC	27
3.3.1 Blokovací kondenzátory	27
3.3.2 Konektory a jejich vliv na EMC	28
3.4 Vliv vodivé plochy na velikost proudové smyčky	29
4 Zásady pro návrh DPS a srovnání s typickými chybami	31
4.1 Zásady pro zemnění DPS	31
4.2 Zásady vedení spojů	32
4.3 Zásady umístění součástek	33
4.4 Zásady minimalizace proudové smyčky	33
5 Návrh přípravků pro prezentaci pravidel pro návrh DPS	34
5.1 Návrh schématu a volba vhodných součástek	34
5.1.1 DPS dodržující pravidla návrhu	35

5.1.2	DPS určena pro demonstraci vlivu plochy vylité mědi a jednobodového zemnění	37
5.1.3	DPS určena pro demonstraci vlivu umístění součástek a vedení spojů	38
5.1.4	DPS určena pro demonstraci vlivu blokovacích kondenzátorů .	38
5.1.5	DPS nedodržující zásady návrhu	40
6	Měření a ověření funkčnosti desek z pohledu výuky pravidel pro návrh DPS	41
6.1	Měření elektrických parametrů	41
6.1.1	Překmity	41
6.1.2	Zvonění signálu (angl. ringing)	44
6.1.3	Doba náběhu	45
6.2	Měření vyzařování pomocí sond blízkého pole	46
6.2.1	Měření pomocí magnetických sond blízkého pole	47
6.2.2	Měření pomocí elektrických sond blízkého pole	50
6.3	Srovnání výsledků měření	51
6.3.1	Výsledky DPS-1	51
6.3.2	Výsledky DPS-2	52
6.3.3	Výsledky DPS-3	52
6.3.4	Výsledky DPS-4	53
6.3.5	Výsledky DPS-5	53
	Závěr	55
	Literatura	57
	Seznam symbolů a zkratek	61
	Seznam příloh	62
	A Návod na provedení měření pro studenty	63

Seznam obrázků

1.1	Zjednodušený model typů vazebních mechanismů (překresleno) [10]	15
3.1	Jednobodové sériové zemnění [17]	21
3.2	Jednobodové paralelní zemnění [17]	21
3.3	Vícebodové zemnění [17]	22
3.4	DPS vylitá mědí [32]	23
3.5	Ukázka thermal padu [32]	24
3.6	Druhy ohybů spojů (překresleno) [28]	24
3.7	Příklad správného a špatného vedení diferenciálního páru (překresleno) [23]	25
3.8	Paralelní vedení cest na horní a spodní straně DPS [34]	26
3.9	Kolmé vedení cest na horní a spodní straně DPS [34]	26
3.10	Vliv rozdělení zemnicí vrstvy na proudovou smyčku (překresleno) [33]	30
3.11	Nedoporučené a doporučené vedení zemnicích cest (překresleno) [33]	30
5.1	První testovací prototyp	35
5.2	Schéma DPS dodržující pravidla návrhu (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	36
5.3	Vizualizace referenční DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	36
5.4	Vizualizace 2. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	37
5.5	Vizualizace 3. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	38
5.6	Upravené schéma pro 4. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	39
5.7	Vizualizace 4. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	39
5.8	Vizualizace 5. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])	40
6.1	Graf vlivu frekvence na překmit u jednotlivých DPS	42
6.2	Překmit DPS-1 a DPS-4 při frekvenci 100Hz	43
6.3	Zvonění DPS-1 a DPS-4 při frekvenci 100Hz	44
6.4	Graf vlivu frekvence na dobu náběhu u jednotlivých DPS	46
6.5	Držák pro stabilní testování pomocí sond blízkého pole	47
6.6	Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 400-1 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz	48
6.7	Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 400-1 (FFT) při frekvenci spínání 500 Hz	48
6.8	Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 50-1 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz	49
6.9	Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 50-1 (FFT) při frekvenci spínání 500 Hz	49
6.10	Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou E 02 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz	50

6.11	Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou E 10 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz	51
6.12	Graf průměrných hodnot amplitudy pro sondy A) H 50-1, B) H 400-1, C) E 10, D) E 02	54
A.1	Schéma zapojení obvodu	63
A.2	Prvky demonstrační DPS	67
A.3	Příklad průběhu FFT	68
A.4	Ukázka správného uspořádání stanoviště pro měření sondami blízkého pole	69

Seznam tabulek

3.1	Dopad fyzikálních vlastností na impedanci [20]	27
3.2	Vlastní rezonanční kmitočet kondenzátorů [14]	28
A.1	Ukázka tabulky pro zpracování dat (např. TP-Gate $f=100\text{Hz}$)	66

Úvod

Při návrhu DPS (desky plošných spojů, v angličtině PCB (printed circuit board)) se musí hledět na celou řadu faktorů, jedním z nich je elektromagnetická kompatibilita EMC. Pod pojmem elektromagnetická kompatibilita je chápána disciplína zaměřená na schopnost správného fungování systémů a zařízení, a to jak elektrických, tak i biologických ve společném elektromagnetickém prostředí.

Oblast EMC rozdělujeme na dva základní aspekty, EMI (elektromagnetická interference) a EMS (elektromagnetická susceptibilita). Elektromagnetická interference nebo také elektromagnetické rušení je proces, kdy zdroj rušení přenáší svůj vliv přes přenosové prostředí (například vzduch, napájecí vedení nebo zemnění) a tím nepříznivě ovlivňuje jiné elektrické zařízení či jeho součásti. Elektromagnetická susceptibilita je spíše citlivost či imunita, s kterou dané zařízení odolává vlivům elektromagnetického rušení. Nezaměřuje se tedy na příčiny rušení, ale spíše na ochranu proti němu. Jsou zde rozlišovány čtyři základní typy vazeb: induktivní, kapacitní, galvanická a elektromagnetická.

V první kapitole této práce je představena problematika elektromagnetické kompatibility v elektrotechnice, její definice, zdroje a vazební mechanismy.

Poté je krátce vysvětlena problematika norem a doporučení, které budou v rámci této práce relevantní.

Třetí kapitola je zaměřena na návrh metodiky pro prezentaci pravidel pro návrh DPS. Je v ní objasněno několik pravidel, která je vhodné při návrhu dodržet, a proč je vhodné se nimi zabývat. Jmenovitě je vysvětlen vliv zemnění, vedení spojů, rozlévání plochy mědi, rozmístění součástek či vliv vodivé plochy na velikost proudové smyčky.

Ve čtvrté kapitole jsou shrnuty zásady pro návrh DPS a je zde uvedeno srovnání s typickými chybami.

Pátá kapitola je zaměřena na návrh přípravků pro prezentaci představených pravidel pro návrh DPS. Popisuje se zde jak návrh a volba součástek, tak i jednotlivé DPS navržené demonstrační sady.

V poslední kapitole je popsáno provedené měření a ověření funkčnosti desek z pohledu výuky pravidel pro návrh DPS v rámci EMC. Příloha obsahuje návod na provedení měření pro studenty.

Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a sestavit experimentální pracoviště pro laboratorní výuku zaměřenou na problematiku elektromagnetické kompatibility při návrhu desek plošných spojů.

Součástí cíle je v úvodní části práce přehledně uvést a shrnout pravidla pro návrh desek plošných spojů z pohledu elektromagnetického rušení (EMI) a elektromagnetické odolnosti (EMS), tak aby sloužila jako přehledný a užitečný studijní materiál pro výuku v této oblasti.

V rámci práce bylo cílem navrhnout a sestavit desky plošných spojů tak, aby bylo možné ve výuce názorně demonstrovat vybrané jevy ovlivňující elektromagnetickou kompatibilitu. Jedná se například o vliv způsobu zemnění (jednobodové vs. vícebodové), přítomnosti vodivých ploch na velikost proudových smyček, minimalizaci délky proudových smyček a spojů, vhodné rozmístění součástek či dopad absence blokovacích kondenzátorů.

Cílem je rovněž navržené desky nejen realizovat, ale také experimentálně ověřit. Na základě provedených měření mají být ověřeny správné návrhové postupy a jejich účinnost porovnána s projevy typických chyb při návrhu desek plošných spojů.

Mezi hlavní cíle a zaměření práce patří vytvoření laboratorního cvičení s metodickým návodem pro studenty bakalářského studijního programu, který je povede při realizaci měření a umožní jim lépe porozumět principům návrhu DPS z hlediska elektromagnetické kompatibility.

1 Aspekty elektromagnetické kompatibility v elektrotechnických systémech a obvodech

Elektromagnetická kompatibility je schopnost zařízení, systémů nebo přístrojů správně fungovat i v prostředí, kde působí další elektromagnetické signály - a to jak přirozené, tak umělé. Zároveň platí, že tato zařízení nesmí svými elektromagnetickými vlivy dále rušit zařízení, systémy či přístroje ve svém okolí. To znamená, že nemohou produkovat signály, které by nepříjemně narušovaly činnost jiných zařízení, technických nebo biologických. [7]

Termín elektromagnetická kompatibility pochází z anglického Electromagnetic Compatibility, odtud tedy pochází i mezinárodní zkratka EMC. Dříve jsme se mohli setkat i s pojmem elektromagnetická slučitelnost, tento pojem v současnosti již skoro plně nahradil právě pojem elektromagnetická kompatibility. [7]

Tuto práci vystihují slova prof. C. R. Paula, jednoho ze světově uznávaných „otců“ vzdělávacích koncepcí v oblasti EMC, že „elektromagnetická kompatibility není praktickou aplikací nějakých nových principů či postupů, ale je pouze specifickou aplikací obecných, základních a mnoha oblastem společných zákonů a principů“. [7]

1.1 Zdroje rušení

Obecně nemůžeme rozdělit všechna zařízení na zdroje a přijímače elektromagnetického rušení, protože každé zařízení je v určité míře zdrojem i přijímačem. Přesto můžeme obecně vyčlenit skupiny zařízení, u kterých převažuje jedna strana této problematiky.

Rušení může být přírodní nebo umělé. Přírodní rušení může pocházet z řady zdrojů jako jsou například blesky, sluneční aktivita, kosmické záření nebo také seismická aktivita. V naprosté většině nemůžeme zamezit výskytu tohoto rušení a spíše se zaměřujeme na ochranu proti němu. [7, 13]

Umělé zdroje jsou více komplexní, jelikož je potřeba hledět ne pouze na zamezení emise rušení, ale i na zachování funkčnosti takového zdroje. Některé takové zdroje rušení jsou považovány za užitečné nebo funkční. Mezi ně řadíme třeba vysílače, generátory, jističe a jiné pro nás přínosné zařízení. Poté jsou tu i neúčinné nebo parazitní zdroje elektromagnetického rušení, které svým provozem vytvářejí neúčinné rušivé pole. [7]

1.2 Typy rušivých signálů

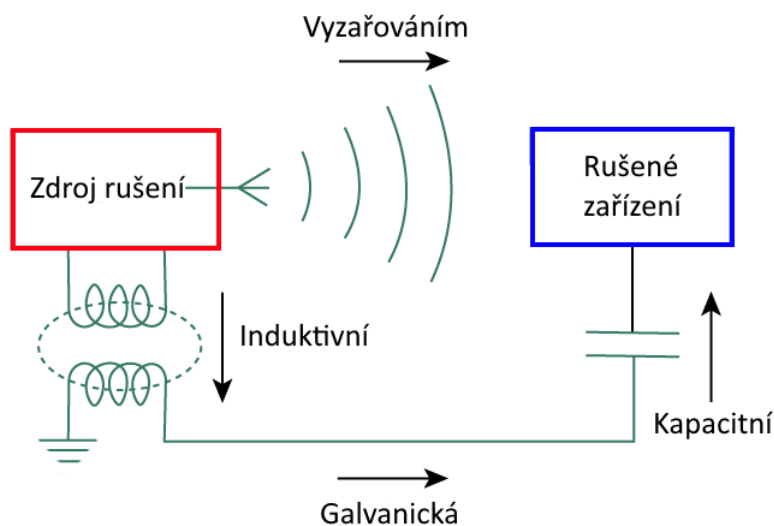
Rušivé signály lze dělit dle mnoha různých faktorů. Signály můžeme například dělit dle jejich výskytu na **spojité, impulzní a kvazi-impulzní**. Také můžeme rušení rozdělit na **širokopásmové** (velmi často rušení průmyslových strojů či přírodní rušení) a **úzkopásmové** (zde se zase často jedná o takzvané „užitečné signály“, jako je televizní a rozhlasové vysílání nebo také Wi-Fi signál či dokonce rušení mikrovlnné trouby) [7, 31]

Dle doby trvání, četnosti výskytu a doby trvání můžeme rušivé signály rozdělit na **šum, impulzy a přechodné jevy**. Díky jejich frekvenci signály zase dělíme na **nízkofrekvenční a vysokofrekvenční** (nebo taky radiové). [7]

1.3 Typy vzájemných vazeb

Vzájemná EMI (elektromagnetická interference) probíhá vždy přes určité přenosové prostředí (vzduch, napájecí vedení, zemnění, ...), ovšem její přenos je vždy realizován prostřednictvím jedné z následujících přenosových vazeb:

- Induktivní vazba
- Kapacitní vazba
- Galvanická vazba
- Elektromagnetická vazba (vazba vyzařováním)



Obr. 1.1: Zjednodušený model typů vazebních mechanismů (překresleno) [10]

1.3.1 Induktivní vazba

Induktivní magnetická vazba se vyskytuje v případě dvou galvanicky oddělených obvodů, přičemž alespoň v jednom z nich prochází časově proměnlivý proud. Tento střídavý nebo rychle se měnící proud vytváří v okolí vodiče proměnlivé magnetické pole, které se může šířit do prostoru a působit na ostatní vodiče či součásti v jeho blízkosti. Pokud se v blízkosti tohoto pole nachází druhý obvod, do jeho vodičů se začne v důsledku elektromagnetické indukce indukovat napětí. Míra rušení touto vazbou se odvíjí od řady faktorů, jako je frekvence, strmost nárůstu a poklesu proudu, magnetické vlastnosti prostředí a geometrické uspořádání obou obvodů. [7, 13]

Mezi základní opatření k omezení rušení přenášeného induktivní vazbou patří zkrácení délky paralelního vedení, zvětšení vzájemné vzdálenosti a minimalizace plochy proudových smyček. Dále se využívá kroucení vodičů, které napomáhá k vzájemnému rušení indukovaných napětí či aplikace elektromagnetického stínění. Kombinací těchto metod lze dosáhnout významného snížení vlivu induktivní vazby na funkci zařízení z hlediska elektromagnetické kompatibility. [7]

1.3.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba představuje jeden z nejběžnějších mechanismů přenosu elektromagnetického rušení mezi dvěma galvanicky oddělenými uzly. Typicky se s ní setkáváme v prostředí desek plošných spojů (DPS), ve svazcích vodičů, kabelech či mezi jednotlivými částmi obvodu. Je způsobena vzájemným působením elektrostatického pole, růstem impedancí obvodů, zvyšujícím se kmitočtem a také přítomností parazitních kapacit mezi jednotlivými vodiči. Na DPS může kapacitní vazba vznikat mezi sousedními signálovými cestami, zejména pokud vedou paralelně na delší vzdálenost bez dostatečného odstupu nebo stínění. [7, 13]

Přestože kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů je nejčastější, tak se můžeme setkat ještě s kapacitní vazbou mezi obvody se společným (vztažným) vodičem a kapacitní vazbou vůči zemi. [7]

Základní metodou omezení rušení přenášeného kapacitní vazbou je zmenšení vazební kapacity mezi rušícím a rušeným vodičem, například zkrácením paralelního vedení nebo jejich fyzickým oddálením. Velmi účinné je taktéž použití stínění či zkroucení vodičů, které snižuje rozdíly v parazitních kapacitách, a tím i přenos rušení. [7]

1.3.3 Galvanická vazba

O galvanickou vazbu se jedná v případě, že jednotlivé zařízení nebo jejich části jsou propojeny jedním nebo více společnými vodiči, prostřednictvím kterých dochází

k vzájemnému ovlivňování či rušení. Princip tohoto druhu vazby vychází z toho že elektronické komponenty, propojovací vodiče či vodivé cesty nejsou dokonalé a mohou obsahovat parazitní kapacity, indukčnost a mají vlastní rezistivitu. [13]

Často je touto vazbou přenášeno rušení tzv. **zemní smyčkou**, která vzniká v případě separátního zemnění ve dvou bodech. [7]

Jednou z nejčastěji využívaných metod blokování rušení přenášeného galvanickou vazbou je **oddělovací transformátor**, který zajišťuje galvanické oddělení mezi dvěma částmi systému. Tím je přerušena zemní smyčka, čímž se eliminuje cesta pro rušivý proud. [7]

Pro potlačení vysokofrekvenčního rušení (typicky nad 1 MHz) se ve velké míře využívají **feritové kroužky nebo feritové perličky**, které zvyšují impedanci vodiče a zároveň díky svému ztrátovému materiálu absorbují rušivé elektromagnetické složky. Podobně fungují i **vedení s útlumovým pláštěm**, kde je plášť tvořen ze silně ztrátového materiálu absorbujícího elektromagnetické rušení. [7]

Pro zajištění galvanického oddělení binárních signálů lze použít **elektromechanická relé**, jež sice poskytují elektrickou izolaci, ale jejich kapacita může dosahovat až několika pikofaradů, což může být problematické při vyšších frekvencích. Efektivnější alternativou jsou **optočleny**, které přenášejí číslicové signály pomocí světla, čímž zajišťují vysokou úroveň izolace. [7]

1.3.4 Elektromagnetická vazba (vazba vyzařováním)

Elektromagnetická vazba někdy označovaná také jako **vazba vyzařováním** je vazba typická pro galvanicky oddělené obvody, kde dochází k ovlivňování a rušení prostřednictvím elektromagnetických vln, které jsou vyzařovány do okolního prostoru. Tato energie se poté naindukuje třeba na vodičích „oběti“ jakožto rušivé napětí. Toto napětí se v jeho obvodech sečte s užitečným signálovým napětím nebo jej dokáže i překrýt. Rušivé zařízení dokáže pomocí elektromagnetické vazby ovlivnit a zasáhnout jiné zařízení na mnohem větší vzdálenost oproti induktivní a kapacitní vazbě, které jsou omezeny na krátké vzdálenosti a obvykle vyžadují těsné uspořádání vodičů nebo součástek. [7, 13]

K omezování účinků elektromagnetického rušení šířeného touto formou vazby je běžně využíváno stínění. Stínící kryt funguje na principu odrazivosti a pohlcování elektromagnetických vln, přičemž část vln je odražena zpět a část je pohlcena v materiálu krytu. Účinnost stínění, tedy schopnost potlačit šíření elektromagnetického rušení, závisí zejména na tloušťce přepážky, na její elektrické vodivosti, permeabilitě a kmitočtu signálu. [7]

2 EMC – normy, směrnice a doporučené postupy

V oblasti elektromagnetické kompatibility existuje řada norem a doporučení, které se zaměřují na zajištění toho, aby elektronická zařízení fungovala bez vzájemného rušení. Tyto normy definují požadavky na elektromagnetické vyzařování (emisní limity) i na odolnost zařízení vůči vnějším elektromagnetickým rušivým vlivům (imunitu).

Tyto normy a předpisy jsou vydávány mezinárodně, v rámci EU nebo vnitrostátně. V našem případě nás především zajímá **Nařízení vlády č. 117/2016 Sb.** (Nařízení vlády o posuzování shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při jejich dodávání na trh). Toto nařízení zapracovává příslušný předpis Evropské unie (Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/30/EU ze dne 26. února 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se elektromagnetické kompatibility) a upravuje technické požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility, které musí splňovat při uvedení na trh nebo do provozu, podmínky a postupy při jejich dodávání na trh a způsoby posuzování shody. [5]

Obecné požadavky udávají, že zařízení musí být navržena a vyrobena tak, aby se s přihlédnutím k dosaženému stavu techniky zajistilo, že elektromagnetické rušení, které způsobují, nepřesáhne úroveň, za níž rádiová a telekomunikační zařízení nebo jiná zařízení nejsou schopna fungovat v souladu s určeným použitím, a dosahují úrovně odolnosti vůči elektromagnetickému rušení očekávanému při jejich provozu v souladu s určeným použitím, která jim umožňuje fungovat bez nepřijatelného zhoršení provozu v souladu s určeným použitím. [5]

Výrobce provede posouzení elektromagnetické kompatibility přístroje na základě příslušných jevů s cílem splnit základní požadavky. Při posuzování elektromagnetické kompatibility se vezmou v úvahu všechny běžné provozní podmínky. Pokud může mít přístroj různé konfigurace, musí posouzení elektromagnetické kompatibility potvrdit, zda přístroj splňuje základní požadavky ve všech možných konfiguracích, které výrobce označí za reprezentativní pro určené použití přístroje. [5]

Dále musí výrobce umístit označení CE na každý jednotlivý přístroj, který splňuje příslušné požadavky tohoto nařízení. [5]

Při návrhu DPS potřebujeme znát i konkrétní normy. Zajímají nás především normy, týkající se požadavků na zkoušky vyzařování a odolnosti, a také normy upřesňující způsob měření. Z norem popisujících požadavky na zkoušky musíme nejprve zjistit meze pro vyzařování a odolnost navrhovaného výrobku. Meze se budou lišit podle prostředí, pro kterém jsou výrobky určeny. [35]

Nejčastěji rozlišuje prostředí na:

- obytné, obchodní, lehký průmysl
- průmyslové
- speciální [35]

V kontextu elektromagnetického vyzařování jsou relevantní zejména normy:

- **ČSN EN IEC 61000-6-3 ed. 3** (Norma stanovuje požadavky na emisní limity pro elektrická a elektronická zařízení, která jsou určena pro používání v obytných oblastech nebo v lehkých průmyslových prostředích). [19]
- **ČSN EN IEC 61000-6-4 ed. 3** (Norma stanovuje požadavky na emisní limity pro elektrická a elektronická zařízení, která jsou určena pro použití v průmyslových prostředích) [19]

Z hlediska **odolnosti** nás zajímají zejména normy řady ČSN EN 61000-4, které definují metody zkoušek a požadavky na elektromagnetickou imunitu.

- **ČSN EN IEC 61000-6-1 ed. 3** (Specifikuje požadavky na odolnost zařízení vůči elektromagnetickému rušení v obytných a lehkých průmyslových prostředích). [19]
- **ČSN EN IEC 61000-6-2 ed. 4** (Stanovuje požadavky na odolnost zařízení vůči elektromagnetickému rušení v průmyslových prostředích, kde jsou často přítomny vyšší úrovně elektromagnetického rušení). [19]

Při realizaci měření je nezbytné vycházet z platných norem, které specifikují požadavky a metodiku v oblasti elektromagnetické kompatibility.

- **ČSN EN 61000-4-x** (Sada norem zaměřených na zkušební a měřicí techniku EMC). [19]
 - **ČSN EN 61000-4-2** - Elektrostatický výboj
 - **ČSN EN 61000-4-4** - Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů
 - **ČSN EN 61000-4-5** - Rázový impulz
 - **ČSN EN 61000-4-6** - Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli
- **ČSN EN IEC 55016** (Sada norem uvádějící specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti). [19]
 - **ČSN EN IEC 55016-1-x** - Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti
 - **ČSN EN IEC 55016-2-x** - Metody měření rušení a odolnosti
 - **ČSN EN 55016-4-x** - Nejistoty, statistické hodnoty a stanovování mezí

3 Shrnutí zásad a návrh metodiky pro návrh desek plošných spojů z pohledu elektromagnetické kompatibility (EMC)

Jak bylo výše uvedeno, EMC představuje klíčový aspekt při návrhu desek plošných spojů (DPS), zejména v aplikacích, kde je nutné minimalizovat emise rušivých signálů a zároveň zajistit dostatečnou odolnost vůči vnějším elektromagnetickým vlivům. Tato část shrnuje základní konstrukční zásady pro návrh DPS z hlediska EMC. Na základě těchto zásad je dále navržena metodika, která slouží jako systematický postup pro návrháře.

Dodržením několika základních pravidel dokážeme násobně zlepšit funkčnost, spolehlivost nebo dokonce i bezpečnost finálního zařízení. Nekvalitní návrh může způsobit rušení mezi jednotlivými částmi obvodu nebo zvýšit náchylnost na vnější elektromagnetické rušení, což může vést k chybám či selhání daného zařízení. Dodržení pravidel již ve fázi návrhu taktéž dokáže ušetřit velké množství finančních nákladů, které by bylo nutné vynaložit na přepracování návrhu. Dále dodržením dokážeme zrychlit certifikační proces.

V následující části jsou uvedena vybraná základní pravidla pro eliminaci rušení, která mohou vzniknout v důsledku nedodržení doporučených postupů.

3.1 Vliv zemnění

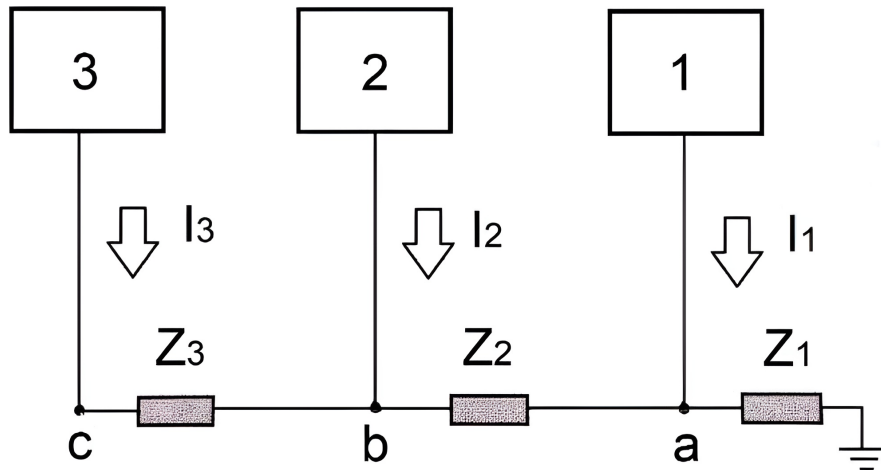
Správný návrh zemnění je jeden z klíčových aspektů pro dobrou EMC navrhované DPS. Uzemnění v plošném spoji slouží k mnoha účelům, od udržení stabilní referenční úrovně až po zajištění volné návratné cesty pro signály a proud. Jedním ze zásadních rozhodnutí při návrhu zemnění DPS je to, zda se rozhodneme realizovat **jednobodové** nebo **vícetbodové zemnění**. [3]

3.1.1 Jednobodové zemnění

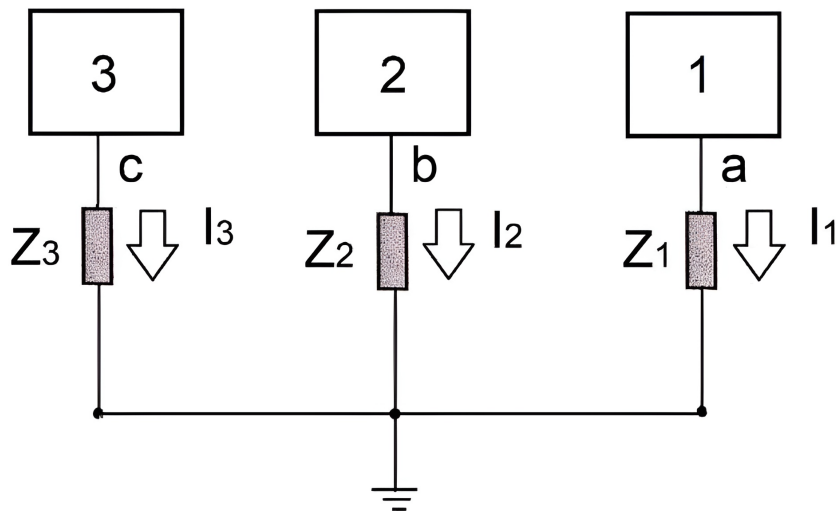
První možností pro kterou se můžeme rozhodnout je **jednobodové zemnění**. Tato varianta je vhodná především pro nízkofrekvenční aplikace. Vyskytuje se zde jeden referenční zemní bod, ke kterému jsou přivedeny všechny ostatní body, které je potřeba uzemnit. Tento způsob uzemnění lze realizovat jak **sériově** tak **paralelně**. Toto zapojení má své výhody i nevýhody. [3]

Mezi nevýhody patří například fakt, že v některém bodu se nejspíše spojí digitální a analogová zem. Dále může nastat problém při návratu všech proudů skrze jeden zemní bod, což může narušit správný průchod proudu, a tím vytvářet EMI. [3]

V některých případech může mít jednobodové zemnění své výhody, jeho použitím můžeme v určitých případech dosáhnout vyrovnání potenciálních rozdílů, a tím zamezit vzniku rušení. [3]



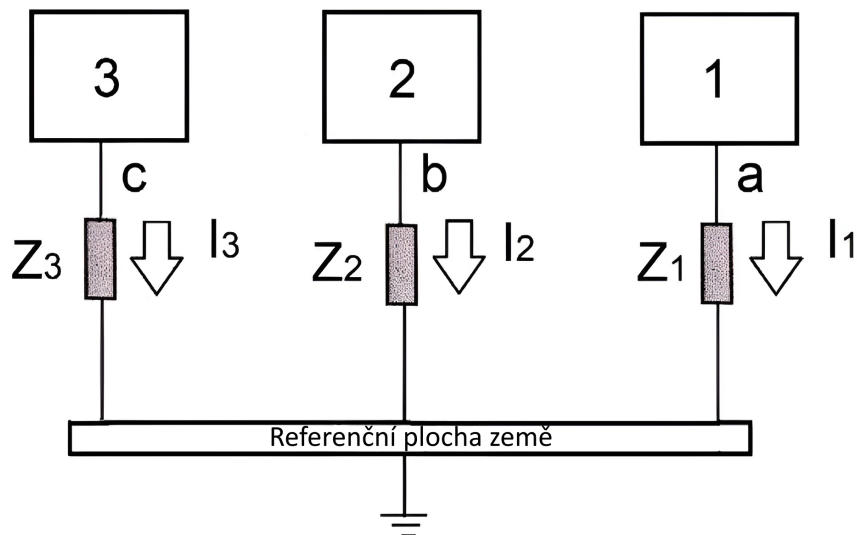
Obr. 3.1: Jednobodové sériové zemnění [17]



Obr. 3.2: Jednobodové paralelní zemnění [17]

3.1.2 Vícebodové zemnění

Vícebodové zemnění se používá u DPS, které pracují na vyšších frekvencích. Na rozdíl od jednobodového zemnění propojuje více obvodů se zemnicí rovinou. Zemnění se zde nachází v několika bodech rozložených na zemnicí rovině. Zemnicí cesty z každého obvodu k zemnicí rovině by měly být co nejkratší, aby se snížila impedance a předešlo se vzniku EMI. [3, 17]



Obr. 3.3: Vícebodové zemnění [17]

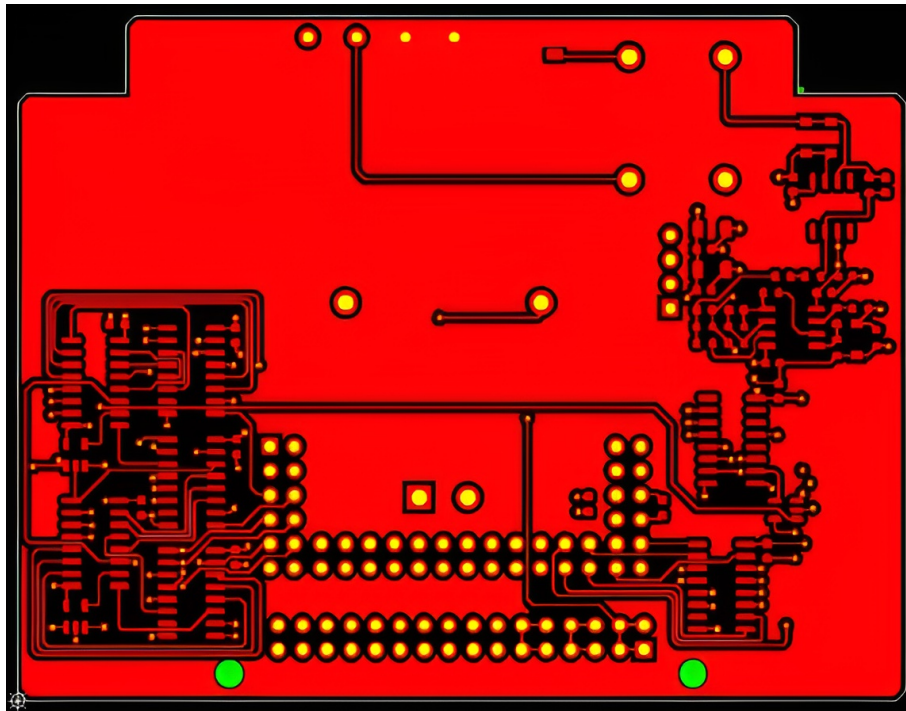
3.2 Vedení spojů a rozlévání plochy mědi na DSP

K dalším zásadám patří správné vedení spojů a vhodné rozlévání měděných ploch na desce plošných spojů (DPS). Tyto postupy představují základní a zároveň technicky snadno realizovatelná opatření pro zlepšení elektromagnetické kompatibility (EMC) navrhované DPS.

3.2.1 Rozlévání plochy mědi na DSP

Pokud máme větší plochu DPS prázdnou, přicházíme tím o řadu výhod. Mezi tyto výhody patří: snížení impedance zemnění, zvyšování energetické účinnosti snížením úbytků napětí, zmírnění EMI zmenšením ploch smyček. Dále, pokud bychom využívali pouze zemnicích cest, bude mít každá cesta jiný odpor a tudíž i jiný úbytek napětí. Na zaplnění těchto ploch se používá měď s vysokou čistotou. Mezi vylitou

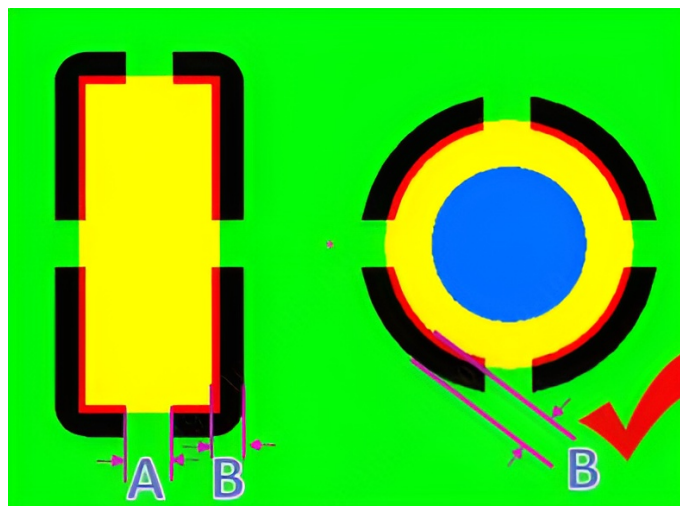
mědí a vodivými cestami se nechává mezera, šířka této mezery se může lišit, ale obecně se doporučuje okolo 0,5 mm. [32, 21]



Obr. 3.4: DPS vylitá mědí [32]

V případě pokud délka vodiče přesahuje $1/20$ vlnové délky rušivé frekvence, může dojít k tomu, že se vodič začne chovat jako anténa a bude vyzařovat toto rušení do okolního prostoru. Z tohoto důvodu jakýkoli špatně uzemněný měděný „ostrov“, může dále napomáhat šíření tohoto rušení. Správně navržené plochy mědi dokážou nejen zvýšit proudovou zatížitelnost, ale také snížit elektromagnetické rušení (EMI). [32]

Prakticky všechny moderní návrhové programy mají možnost zvolit vylití desky mědí. Jako vše má i vylévání mědi svá úskalí, měď je velmi tepelně vodivá, což na jednu stranu pomáhá s rozložením tepla na větší ploše, ale zároveň chceme zabránit přenosu tepla z například větších pájecích plošek. Přílišné zahřátí může způsobit deformaci vylité plochy, problémy při pájení či poškození citlivých součástek. V tomto případě se používají tzv. „tepelné mosty“ respektive thermal pady. Ty nejsou připojeny celou plochou, ale pouze menšími mosty, které zajistí menší přenos tepla z tepelně zatížené oblasti. [32, 21]

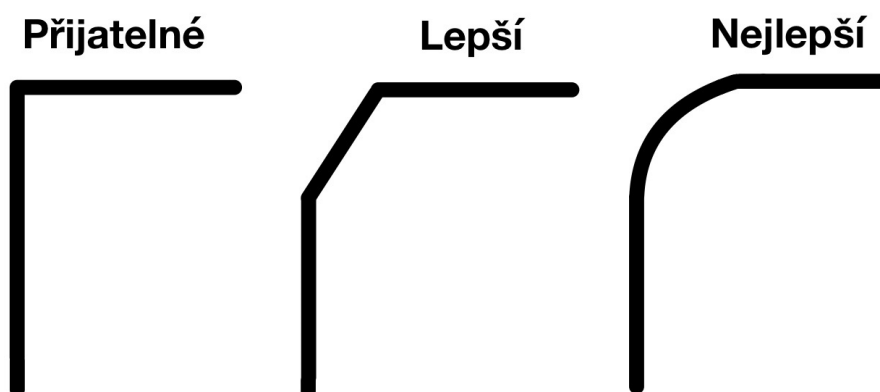


Obr. 3.5: Ukázka thermal padu [32]

3.2.2 Vedení spojů

Jako vše má i vedení spojů na desce své zásady, které pokud se jich budeme držet zajistí, že deska bude dosahovat co nejvyšší EMC. Důležitý faktor DPS je její impedance, jelikož její velikost má vliv na EMI citlivých obvodů. [20]

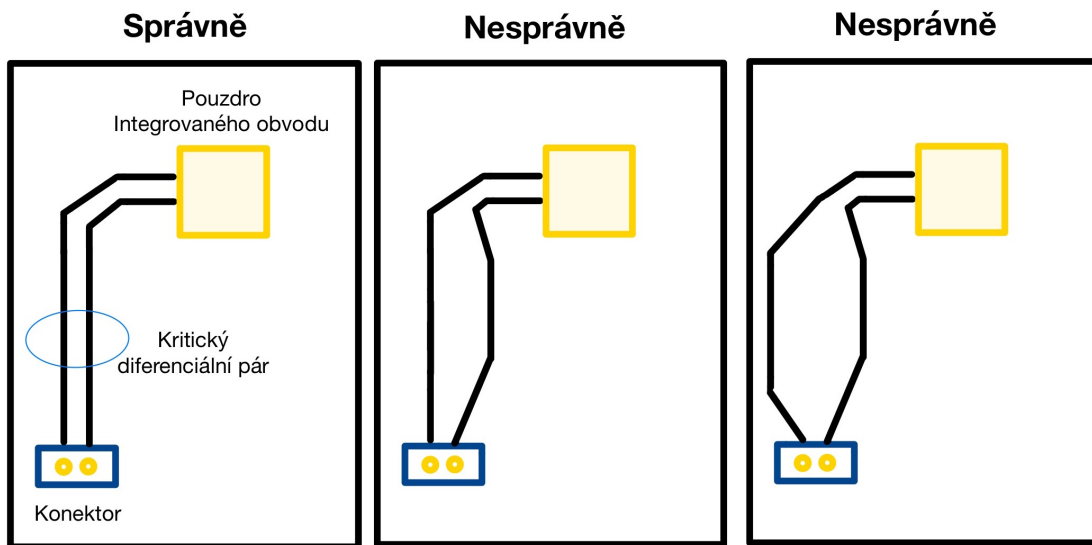
Vedení spojů by nemělo nikdy obsahovat pravoúhlé spoje. Nejen že mohou způsobit „nedoleptání spoje“, ale také mohou představovat problém z hlediska vf a výkonových signálů. Optimálně je tedy vhodné vést spoje pod úhlem 45° nebo ideálně obloukem. S rostoucí frekvencí a strmostí hran zavádějí pravé úhly nadměrnou kapacitu a způsobují drobné odchylky v charakteristické impedanci. [21, 20]



Obr. 3.6: Druhy ohybů spojů (překresleno) [28]

Citlivé signálové cesty by neměly být vedeny v blízkosti vstupních a výstupních konektorů. Může totiž dojít k přenosu šumu a narušení těchto signálů. V opačném případě může též dojít k přenosu EMI skrze konektory ven a ovlivnění jiných citlivých zařízení v síti. [23]

U diferenciálních páru mají signály stejnou velikost, ale opačnou polaritu což by mělo mít za následek vyrušení potenciální EMI. To ale platí pouze pokud mají stejnou délku trasy a jsou vedeny symetricky co nejbliže k sobě. Dodržení tohoto pravidla je nejdůležitější u vf DPS, kde je riziko EMI vysoké. [23]

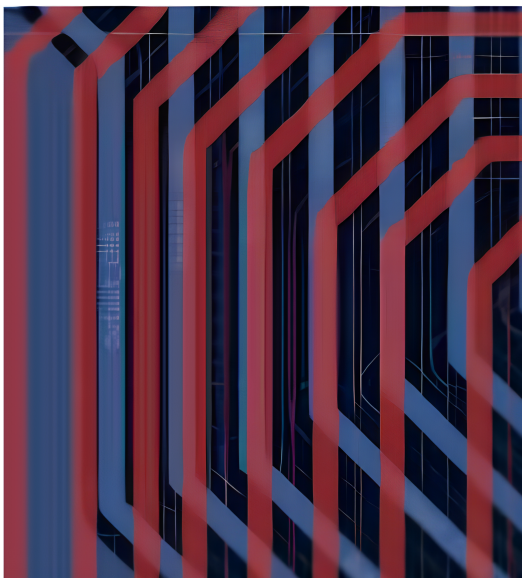


Obr. 3.7: Příklad správného a špatného vedení diferenciálního páru (překresleno) [23]

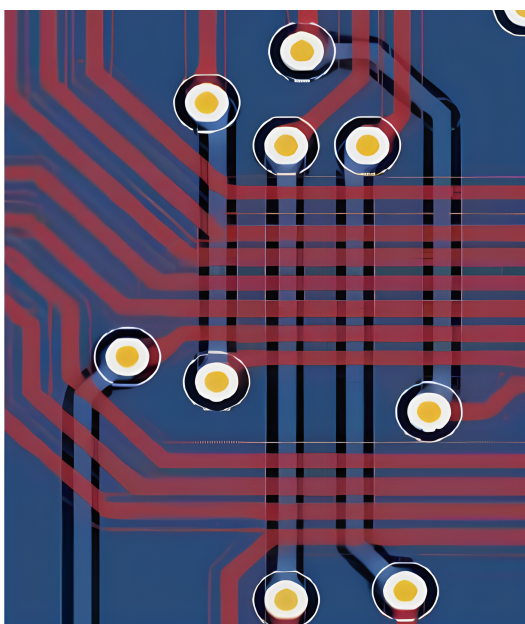
U jednovrstvých či dvouvrstevných desek, kde není přítomná referenční napájecí vrstva může nastávat vybíjení elektromagnetických polí do vedlejších spojů či vyzařování do prostoru, což negativně ovlivňuje EMC dané desky. Vícevrstvé DPS již mohou obsahovat rozvod napájení v podobě napájecí vrstvy desky. Použití napájecích vrstev tedy zajišťuje snížení impedance rozvodu napájení, což je potřebné pro správné blokování napájecího zdroje. [20]

Vložení signálových cest mezi zemnicí a napájecí vrstvou poskytuje stínění, které zajišťuje ochranu před příjmem i vyzařování rušení, a taktéž ochrání cesty před ESD výboji. Aby se minimalizovala velikost desky a zkrátila doba přenosu signálu, jsou na desce SMD součástky umístěny co nejhustěji. To však vede k tomu, že plošné spoje musí být vedeny velmi blízko sebe, což může způsobovat přeslechy. Přeslechy vznikají přenosem pulzu energie přes elektromagnetické pole ze zdrojového spoje na napadený spoj. [20]

Dále by vodivé cesty na vrchní a spodní straně DPS neměly být vedeny paralelně, takový návrh by měl za výsledek zvýšení rušení. Tyto spoje je proto lepší vést kolmo na sebe viz následující obrázky. [34]



Obr. 3.8: Paralelní vedení cest na horní a spodní straně DPS [34]



Obr. 3.9: Kolmé vedení cest na horní a spodní straně DPS [34]

Tab. 3.1: Dopad fyzikálních vlastností na impedanci [20]

Proměnná	Impedance
Zvětšení šířky spoje	Nižší
Zvětšení vzdálenosti mezi spoji	Vyšší
Zvětšení odstupů vrstev signal/plane	Vyšší
Zvětšení dielektrické konstanty	Nižší

3.3 Rozmístění součástek vzhledem k EMC

Umístění součástek na DPS má významnou roli na výslednou EMC. U rozmístění součástek musíme hledět na řadu faktorů jako: minimalizace proudových smyček respektive délek spojů, pozice blokovacích kondenzátorů, umístění citlivých součástek vůči konektorům či jiným druhům jak lokálního tak externího rušení. [30]

3.3.1 Blokovací kondenzátory

Kondenzátory používané v systému blokování napájení jsou určeny k izolaci lokálních obvodů od rušení a nepravidlostí v napájení způsobených jinými zařízeními, která sdílí napájení, zem nebo další síť. Jsou schopny zajistit místní zdroj stejnosměrného napětí pro aktivní součástky, dokáže omezit šum od rychlého spínání tak, že svede šum do země. [2, 14]

Využívání blokovacích kondenzátorů při návrhu DPS je jedna z nejdůležitějších zásad, které je potřeba dodržet pro správnou funkci navrhovaného zařízení. Jelikož napájení po dlouhých napájecích vodičích vytváří nežádoucí úbytky napětí a zároveň způsobuje zvýšený výskyt elektromagnetického záření způsobený velkými plochami smyček, což vede ke zhoršení EMC zařízení. [35]

Vhodné umístění pro tyto kondenzátory je přímo u vstupu napájení, což jim umožní odfiltrovat vysokofrekvenční šum. Pro co nejlepší EMC by měly být dále umístěny v blízkosti každého vstupu a výstupu, protože impedance plošného spoje může mít negativní vliv na blokovací funkce kondenzátoru. [14]

Absenci blokovacích kondenzátorů dále můžeme sledovat na zvlnění napájecího napětí, vzniku hazardních stavů číslicových obvodů, nadměrném výskytu šumu a na sklonu ke kmitání analogových obvodů způsobeným vyzařováním do napájecích vodičů. [35]

V základu rozlišujeme tyto kondenzátory do tří kategorií:

- Filtrační - Eliminuje vliv indukčnosti přívodu napájení a slouží jako širokopásmový filtr pro celou desku nebo její části
- Lokální - Slouží jako lokální zdroj energie pro jednotlivé součástky
- Skupinový - Slouží jako skupinový zdroj pro více kapacitních zátěží [35]

Pro blokovací účely používáme keramické kondenzátory v rozmezí kapacit od jednotek pikofaradů až do stovek mikrofaradů. Tato kapacita se určuje podle frekvence signálů, u hodinového signálu 33MHz se používá 4,7 až 100 nF, zatímco u 100MHz se může kapacita pohybovat okolo 10 nF. [14]

Kondenzátor zůstává kapacitní až do dosažení vlastního rezonančního kmitočtu. Potom se, kvůli délce svých vývodů a indukčnosti plošných spojů, změní na indukční součástku. Mezi běžnou praxi patří použití dvou blokovacích kondenzátorů paralelně, toto zapojení zajistí širší spektrální distribuci k potlačení spínacího šumu ze zdroje napájení a snížení indukčnosti vývodů. K zabezpečení účinného blokování by se hodnoty obou kondenzátorů měly lišit o dva řády. [14]

Tab. 3.2: Vlastní rezonanční kmitočet kondenzátorů [14]

Kapacita	Vývody (6,5 mm)	SMD (0805)
1,0 μ F	2,5 MHz	5 MHz
0,1 μ F	8 MHz	16 MHz
0,01 μ F	25 MHz	50 MHz
1 000 pF	80 MHz	160 MHz
100 pF	250 MHz	500 MHz
10 pF	800 MHz	1,6 GHz

3.3.2 Konektory a jejich vliv na EMC

I konektory a jejich umístění mohou výrazně ovlivnit celkovou EMC navrhované DPS. Jsou ovlivněny mnoha stejnými problémy s EMC jako kabely, jelikož jsou to v podstatě jen krátké úseky vodičů v pevném těle. Vhodné je rozdělit konektory na vnitřní, které se používají k propojení vnitřních částí zařízení (např. mezi dceřinou deskou a základní deskou) a na vnější konektory, které se používají k propojení DPS třeba k napájecí síti. U vnějších konektorů je častější výskyt přepětových nebo elektrostatických výbojů [1]

Při návrhu bychom se měli vyvarovat umístění citlivých součástek na EMI do blízkosti konektorů a to z několika důvodů. První důvod je, že v podstatě každý pin konektoru působí jako malá anténa, samozřejmě záleží na typu konektoru (u

některých konektorů je tento vliv minimální, ale u jiných je více výrazný). Tímto způsobem se může rušení dostat na nejcitlivější místa DPS, což negativně ovlivní EMC celé DPS. [1]

Druhým důvodem, proč se vyhnout umístění citlivých součástek na EMI do blízkosti konektorů je ten, že velká část konektorů (především ty, které se používají k externím propojením) se nachází na samotném kraji DPS. Kraje DPS jsou samy o sobě více vystaveny EMI oproti středu DPS. Rozdíl velikosti rušení na kraji a uvnitř DPS může u některých harmonických frekvencí dosahovat i 20 dB. [18]

Další důvod je výskyt ESD výbojů při zapojení některých konektorů.

Ačkoliv konektory samy o sobě nejsou přímým zdrojem ESD, představují zranitelný bod, kde může dojít k náhlému přenosu elektrostatického náboje, pokud se na jejich vodiče nebo okolní vodivé části dostane elektrický potenciál z vnějšího zdroje. Jakýkoliv statický náboj potenciálně ohrožuje citlivé součástky na DPS.

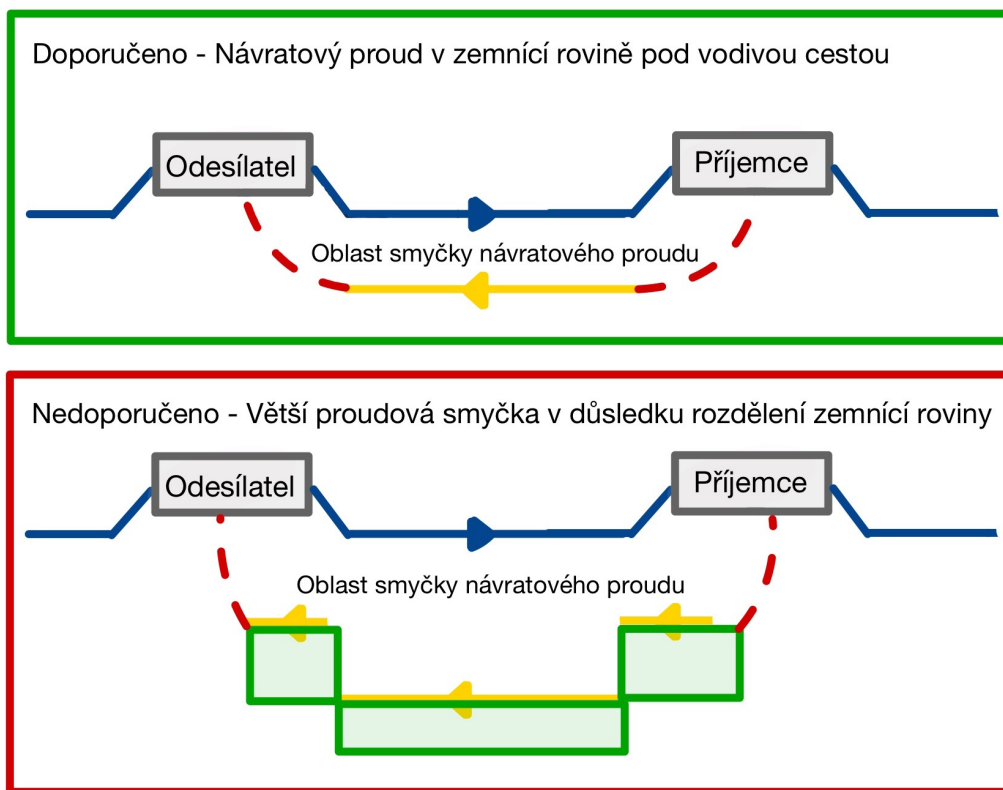
Při připojení externího zařízení, kabelu nebo dokonce pouhým dotyku vodivé části konektoru se zvyšuje riziko statického výboje na zařízení. ESD výboj může nastat i při zasunutí napájecího kabelu do konektoru, což dokáže někdy způsobit i viditelnou jiskru. [22]

3.4 Vliv vodivé plochy na velikost proudové smyčky

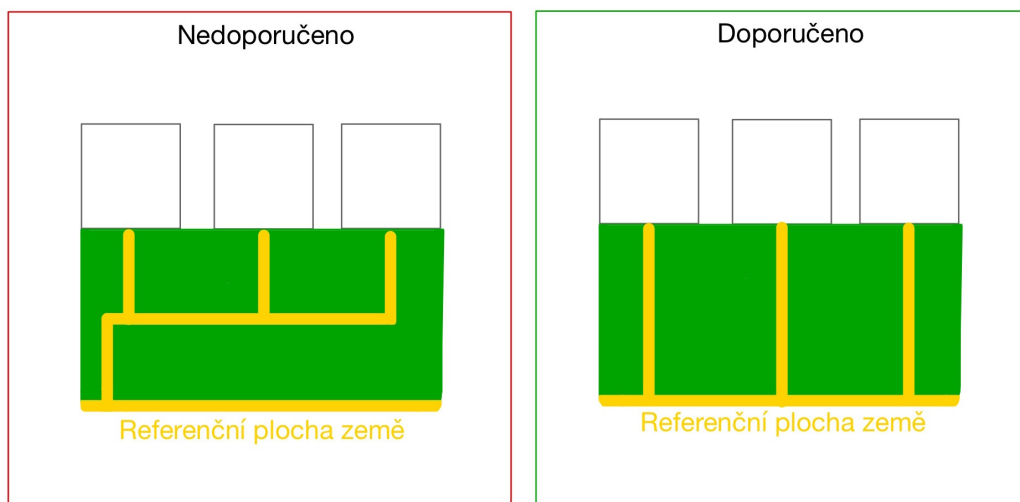
Při návrhu DPS je jedním z klíčových cílů minimalizace velikosti proudových smyček, a to hned z několika důvodů. Proudová smyčka vzniká tehdy, když signál prochází určitou cestou, zatímco jeho návratový proud se vrací zpět jinou, často méně přímou trasou. Tím vzniká uzavřený obvod, jehož plocha funguje jako elektrická smyčková anténa, schopná jak vyzařovat elektromagnetické rušení, tak jej i zachytávat z okolního prostředí. Zmenšením této plochy tedy dochází ke snížení citlivosti obvodu na rušení i ke snížení jeho rušivých emisí, což výrazně přispívá k celkové elektromagnetické kompatibilitě (EMC) daného zařízení. [33]

Způsobů jak zmenšit proudovou smyčku je hned několik. Můžeme lépe rozmístit součástky, aby cesty mezi nimi či zemnicími body byly kratší, ale nejčastěji pro zmenšení smyčky využíváme samotnou zemnicí vrstvu vně DPS. Pokud se nachází zemnicí vrstva pod danou signálovou cestou může se proud vracet přes tuto vrstvu. Tloušťka DPS je v zásadě velmi malá, tím že se bude signál vracet přes vnitřní zemnicí rovinu, a ne přes separátní cestu na vnější vrstvě DPS, výrazně snížíme vodivou plochu, přes kterou se signál musí vrátit do země. [33]

Vždy se tedy snažíme součástky vést co nejkratší cestou do země, abychom proudové smyčky minimalizovali. Také bychom se měli vyvarovat rozdělení zemnicí vrstvy, jelikož i toto rozdělení může vést ke zvětšení proudové smyčky. [33]



Obr. 3.10: Vliv rozdělení zemnicí vrstvy na proudovou smyčku (překresleno) [33]



Obr. 3.11: Nedoporučené a doporučené vedení zemnicích cest (překresleno) [33]

4 Zásady pro návrh DPS a srovnání s typickými chybami

Při návrhu DPS, zejména pokud nemáme předchozí zkušenosti, se snadno dopustíme návrhových chyb, které mohou negativně ovlivnit finální produkt. Pokud ovšem budeme dodržovat několik jednoduchých zásad můžeme tyto negativní vlivy minimalizovat.

4.1 Zásady pro zemnění DPS

Způsob, kterým budeme realizovat zemnění u navrhované desky výrazně ovlivňuje její finální EMC. Cílem je zajistit co nejnižší impedanci zemní cesty pro vysokofrekvenční signály a současně zabránit vzniku nežádoucích vazeb mezi jednotlivými částmi obvodu.

Jedním ze základních pravidel je použití souvislé zemní roviny, která poskytuje nízkoimpedanční cestu pro návratové proudy a minimalizuje elektromagnetické vyzařování i citlivost na rušení. Doporučuje se, aby zemní rovina nebyla zbytečně přerušena výřezy nebo vedením spojů. [17]

Důležitá je volba toho zda se rozhodneme realizovat jednobodové nebo vícebodové zemnění.

Jednobodové zemnění je vhodné především pro nízkofrekvenční aplikace. Vyskytuje se zde jeden referenční zemnicí bod, ke kterému jsou přivedeny všechny ostatní body, které je potřeba uzemnit. Jednobodové zemnění lze realizovat buďto sériově nebo paralelně. Tento způsob zemnění má nevýhodu v podobě pravděpodobného spojení analogové a digitální země. Naopak výhodou může být vyrovnání rozdílů v potenciálu, což může mít za vliv omezení vzniku rušení. [3]

Vícebodové zemnění se používá u DPS, které pracují na vyšších frekvencích. Zemnění zde probíhá v několika bodech co nejkratší cestou k zemnicí rovině. Snižuje se tak indukované napětí a šum, jelikož jsou zkráceny zemnicí smyčky. Rovněž lze dosáhnout rovnoměrnějšího rozložení potenciálu uzemnění po celé ploše. [3]

Pro účinné potlačení rušení je vhodné oddělit digitální a analogové země, přičemž jejich spojení by mělo být provedeno v kontrolovaném bodě. Tím se zabrání nechtěnému přenosu rušivých signálů mezi citlivými a spínacími částmi systému. [11]

Vylitá měď na DPS výrazně přispívá k elektromagnetické kompatibilitě tím, že poskytuje nízkoimpedanční návratové cesty, snižuje velikosti proudových smyček a působí jako stínění proti rušení. Správně navržená plocha mědi přispívá i tepelnému

managementu a stabilitě obvodu. K nejčastějším chybám patří přerušení zemní roviny a vznik neuzemněných „ostrovů“ mědi nebo jejich nedostatečné propojení s GND. [32, 21]

Nejčastější chyby v návrhu zemnění zahrnují:

- přerušení zemní roviny
- použití úzkých a dlouhých zemních spojů s vysokou impedancí
- nevhodné propojení digitální a analogové země
- nevyužití plochy vylité mědi

4.2 Zásady vedení spojů

Jednou ze základních zásad je minimalizace délky spojů, zejména u vysokofrekvenčních nebo rychlých signálů. Krátké spoje snižují vyzařování a omezují zachytávání rušení z okolního prostředí. [20]

Důležité je také udržovat spoj a jeho návratovou cestu co nejbližší u sebe. Tím se minimalizuje plocha proudové smyčky a potlačuje se induktivní vazba. [20]

Dalším opatřením je vyhnout se paralelnímu vedení signálů, které může vést ke kapacitnímu nebo induktivnímu přeslechu. Pokud je souběh nevyhnutelný, doporučuje se použití stínění nebo oddělení vrstev. [34]

Citlivé signálové cesty by neměly být vedeny v oblastech se zvýšeným výskytem elektromagnetického rušení. Měli bychom se tedy vyvarovat vedení citlivých signálových cest vedle napájecích či výkonových vodičů, spínaných signálů nebo rychlých digitálních tras. Tyto prvky mohou vytvářet elektromagnetické pole, které se může do citlivých signálových cest indukovat a způsobit rušení, chyby měření nebo nestabilitu obvodů. Ideální je vést citlivé signály odděleně, s dostatečným odstupem a případně je stínit nebo umístit nad souvislou zemní plochu pro minimalizaci rušení. [23]

Z hlediska vysokofrekvenční EMC je vhodné vyhýbat se pravoúhlým zalomením spojů, které mohou působit jako zářiče. Místo toho se doporučuje používat zaoblené nebo 45° zalomení. [21, 20]

Nejčastější chyby v návrhu při vedení spojů:

- dlouhé vedení signálů
- vedení citlivých signálů v částech DPS se zvýšeným výskytem rušení
- vedení napájecích a signálových cest v těsné blízkosti
- využívání pravoúhlých spojů

4.3 Zásady umístění součástek

Součástky by měly být rozmístěny dle funkčních bloků na analogové, digitální a výkonové části. Tyto části je vhodné oddělit, aby se minimalizovalo vzájemné rušení. U rozmístění součástek se snažíme o minimalizaci proudových smyček a délky spojů, správnou pozici blokovacích kondenzátorů a vhodné umístění citlivých součástek vůči konektorům či jiným druhům jak lokálního tak externího rušení. [30]

Využití blokovacích kondenzátorů při návrhu DPS je důležité pro správnou funkci navrhovaného zařízení. Měly být osazeny co nejbližně napájecích konektorů a napájecích vývodů integrovaných obvodů, aby účinně potlačily vysokofrekvenční šum. [14]

Mezi běžnou praxí patří použití dvou blokovacích kondenzátorů paralelně, toto zapojení zajistí efektivnější potlačení spínacího šumu a snížení indukčnosti vývodů. K zabezpečení účinného blokování by se hodnoty obou kondenzátorů měly lišit o dva řády. [14]

Nejčastější chyby v návrhu při umístění součástek:

- nesystematické rozložení součástek bez ohledu na signálové toky
- umístění citlivých součástek do oblasti se zvýšeným rizikem rušení
- nevhodné umístění blokovacích kondenzátorů
- přerušení zemní roviny díky nevhodnému umístění součástek

4.4 Zásady minimalizace proudové smyčky

Způsobů minimalizace proudové smyčky je hned několik. Spolu s optimalizací rozmístění součástek je také vhodné minimalizovat délku spojů. U vícevrstvých DPS je žádoucí pro zmenšení proudové smyčky využít samotnou zemnicí či napájecí vrstvu uvnitř DPS. Pokud se nachází zemnicí vrstva pod danou signálovou cestou, může se proud vracet přes tuto vrstvu. Tímto způsobem se zajistí krátká a nízkoimpedanční návratová cesta. [33]

Vhodným řešením pro některé aplikace je také použití diferenciálních párů, které přirozeně omezují plochu smyčky. [23]

Nejčastější chyby v návrhu při minimalizaci proudové smyčky:

- absence zemní roviny
- chaotické přechody mezi vrstvami bez odpovídajících návratových cest
- nevhodně zvolené umístění součástek a konektorů
- neadekvátní řešení geometrie vodivých cest

5 Návrh přípravků pro prezentaci pravidel pro návrh DPS

Na trhu existuje sice mnoho výrobců, kteří nabízejí technikům nástroje pro demonstraci EMC, nicméně nebyl nalezen žádný, který by do svých demonstračních sad systematicky začleňoval principy návrhu desek plošných spojů (DPS).

Proto bylo cílem v rámci této práce připravit pro výuku na VUT v Brně soubor DPS, který umožní efektivně předvádět návrhová pravidla tak, aby studenti oboru mikroelektronika tuto problematiku zvládli pochopit a dokázali ji aplikovat v praxi.

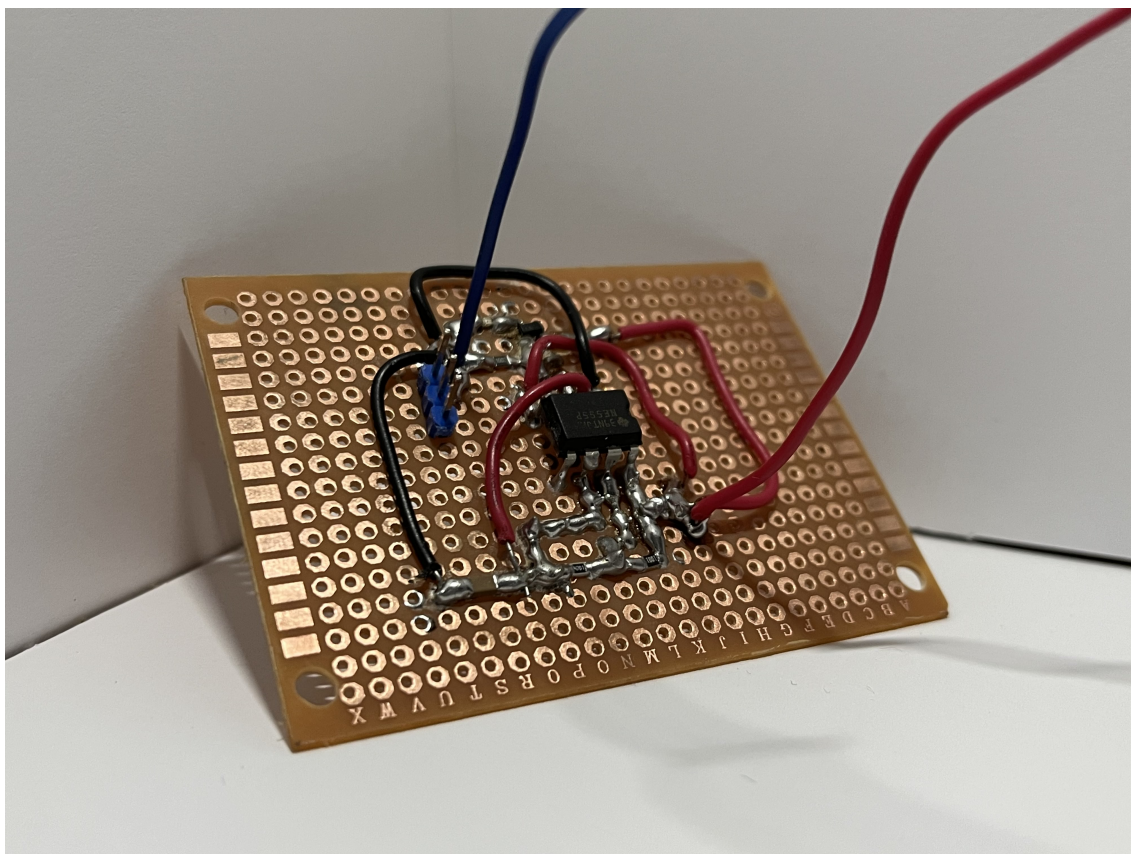
5.1 Návrh schématu a volba vhodných součástek

Při návrhu demonstračních přípravků určených pro výuku studentů je zcela zásadní klást důraz na přehlednost a srozumitelnost celého zapojení. Studenti se v rámci výuky často teprve seznamují s principy elektromagnetické kompatibility, návrhem DPS i chováním jednotlivých obvodových prvků, a proto je důležité, aby jim demonstrační přípravek umožnil těmto principům snadno porozumět. Příliš komplexní demonstrační přípravek by mohl být kontraproduktivní - místo aby výuku podporoval, mohl by studenty zbytečně mást a odvádět pozornost od klíčových principů. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl využít známého časovacího integrovaného obvodu NE555P od firmy Texas Instruments. Tento časovač bude použit v astabilním režimu jako zdroj obdélníkového signálu pro hradlo unipolárního tranzistoru. Toto zapojení zajistí rychlé přepínání tranzistoru a umožní provedení série měření při zachování přehlednosti a jednoduchosti. Na DPS je taktéž umístěn potenciometr, kterým je možné upravit frekvenci výstupu obdélníkového signálu z NE555P.

V obvodu je konkrétně použit MOSFET BSS138-7-F. Jedná se jednoduchý SMD N-kanálový tranzistor, který není určen k velkému proudovému zatížení, což ovšem v této aplikaci není problém.

Dalším krokem bylo vytvoření funkčního prototypu navrženého obvodu, který sloužil jako výchozí bod pro další návrh a případné úpravy. Tento prototyp měl především ověřit základní funkčnost celého zapojení.

Je důležité zdůraznit, že tento první prototyp nebyl navržen pro přesná měření elektromagnetických parametrů. Jeho hlavní účel spočíval pouze v rychlém ověření základního konceptu a identifikaci případných chyb v návrhu, které by mohly bránit jeho správné činnosti v dalších fázích návrhu.



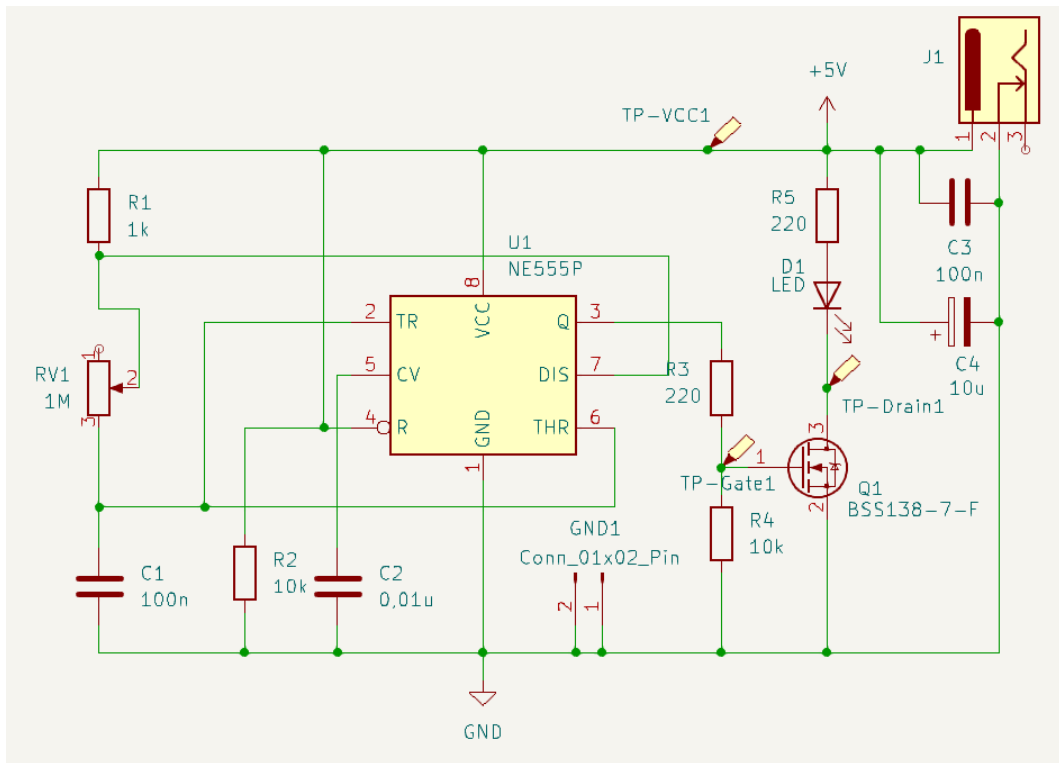
Obr. 5.1: První testovací prototyp

5.1.1 DPS dodržující pravidla návrhu

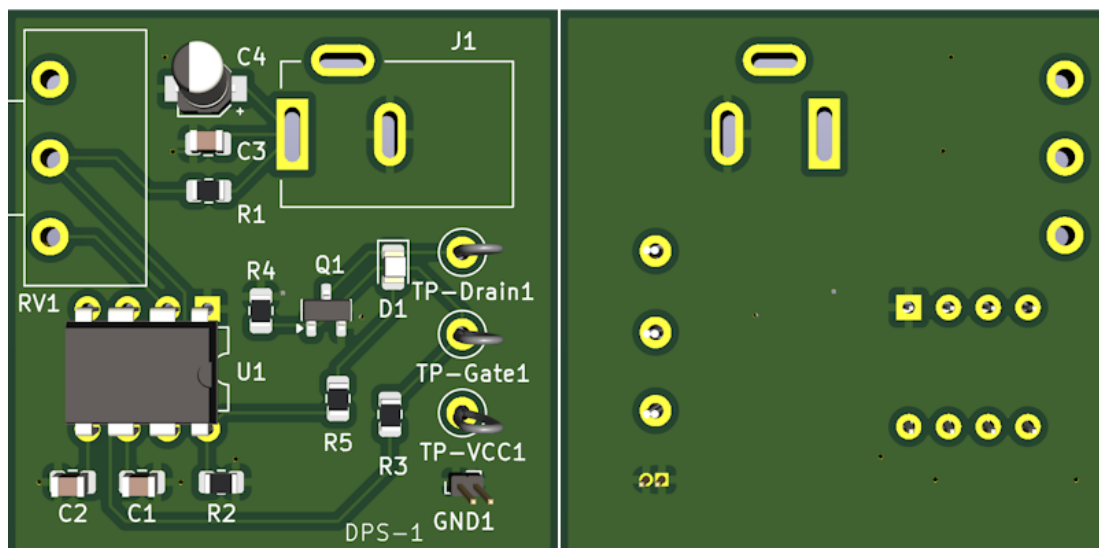
První DPS je navržena v souladu se všemi prezentovanými pravidly návrhu z hlediska elektromagnetické kompatibility (EMC). Její návrh zohledňuje správné vedení signálových cest, minimalizaci proudových smyček, vhodné rozvržení napájecích a zemních ploch i optimální umístění blokovacích kondenzátorů. Je určena pro referenční měření, které bude sloužit pro porovnání vlivu dodržení prezentovaných pravidel.

Důležitou součástí návrhu je trojice testovacích bodů umístěných na desce, které umožňují snadné připojení měřicích sond osciloskopu, spektrálního analyzátoru nebo jiných měřicích přístrojů.

U této desky bychom chtěli pozorovat nejlepší výsledky měření a to jak z hlediska elektrických parametrů, tak zejména z hlediska nízké úrovně elektromagnetického vyzařování a zvýšené odolnosti vůči rušení.



Obr. 5.2: Schéma DPS dodržující pravidla návrhu (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])



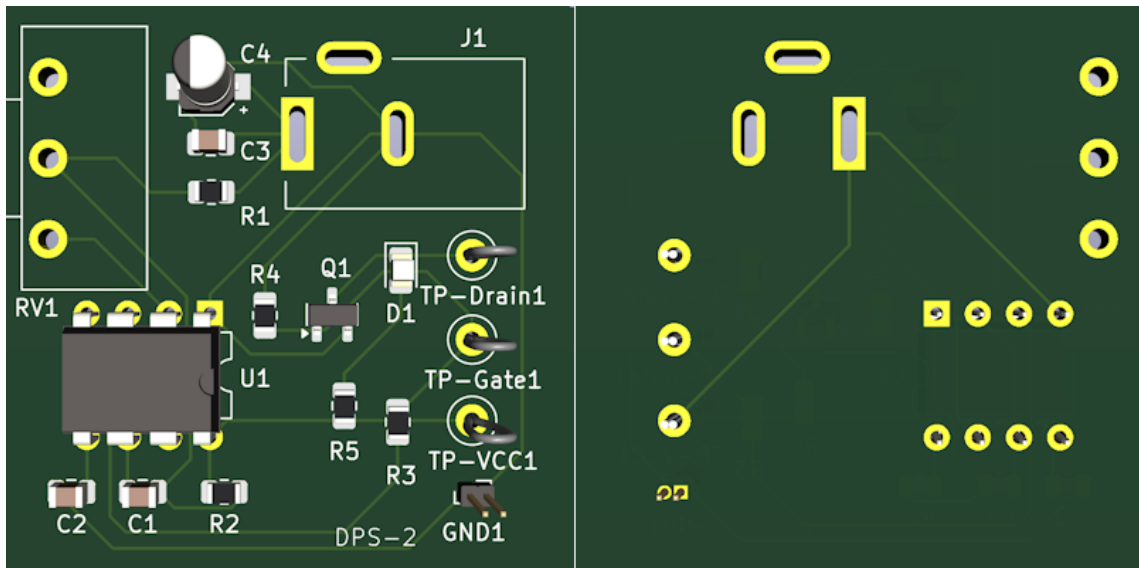
Obr. 5.3: Vizualizace referenční DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])

5.1.2 DPS určena pro demonstraci vlivu plochy vylité mědi a jednobodového zemnění

Druhá DPS ze sady je určena k demonstraci vlivu plochy vylité mědi. Díky absenci plochy vylité mědi a vnitřní vrstvy země využívá tato deska jednobodového paralelně zapojeného zemnění. Tyto rozdíly oproti první DPS by měly mít za následek zhoršení EMC, a to z několika důvodů. Absence plochy mědi může mít za následek zvýšení EMI zvětšením ploch proudových smyček, vznik rozdílných úbytků napětí na zemnicích cestách v důsledku rozdílného odporu a zvýšení impedance zemnění.

Bez souvislé zemní roviny je obvod hůře stíněný, což ho činí zranitelnějším vůči externí EMI. Absence zemní roviny taktéž vytváří zhoršené podmínky pro odrušovací prvky. Jelikož např. blokovací kondenzátory jsou nejvíce účinné, když mají krátkou a nízkoimpedanční cestu k zemi.

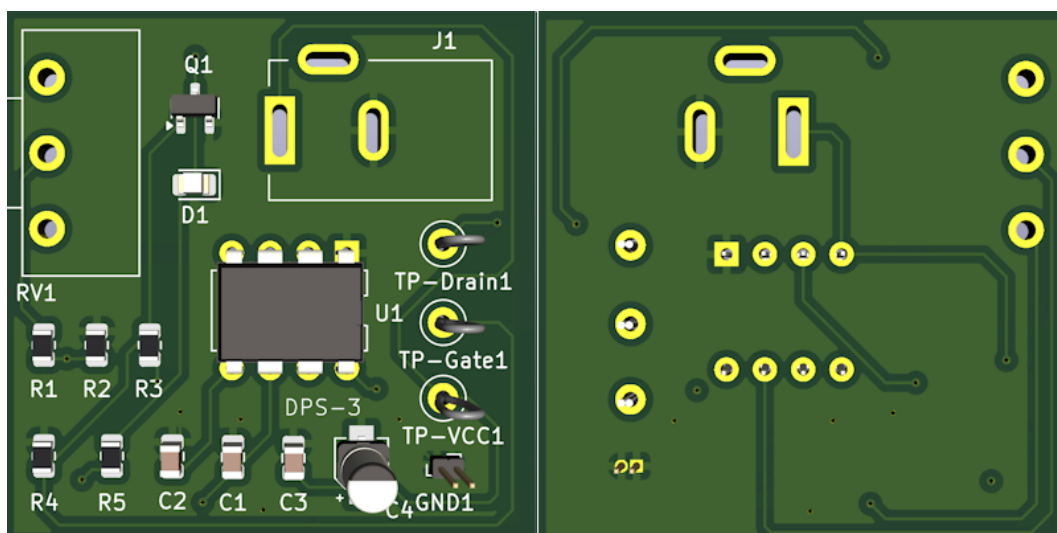
Přechod na jednobodové zemnění Přechod na jednobodové zemnění s sebou přináší určité změny v chování celého systému, zejména z pohledu elektromagnetické kompatibility (EMC). Přestože se signál z výstupu NE555P spínající tranzistor bude pohybovat převážně v nízkofrekvenční oblasti (typicky v řádech jednotek až desítek kilohertz), tak rychlé a strmé hrany mohou obsahovat vysokofrekvenční harmonické složky. V důsledku toho, že jednobodové zemnění je vhodné především pro nízkofrekvenční aplikace, můžeme předpokládat zhoršení EMC.



Obr. 5.4: Vizualizace 2. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])

5.1.3 DPS určena pro demonstraci vlivu umístění součástek a vedení spojů

U této **třetí DPS** je oproti DPS dodržující pravidla návrhu změněno umístění součástek. Tato změna by nejspíše pro člověka neznalého návrhových zásad dávala smysl, přeci jen jsou zde součástky „hezky“ seřazené dle jejich označení do přehledných řádků. Ve skutečnosti však takové uspořádání přináší řadu problémů. Tímto přeskupením jsme na několika místech přerušili plochu země a rozdělili tak její potenciál, zároveň jsme přesunuli NE555P a tranzistor blíže ke konektoru, což společně s vedením vodivých cest po krajích DPS, a ne tou nejkratší cestou, může způsobit problémy s EMC. Taktéž zde máme blokovací kondenzátory, ale jejich umístění daleko od konektoru není ideální, protože impedance plošného spoje může mít negativní vliv na blokovací funkce kondenzátoru.



Obr. 5.5: Vizualizace 3. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])

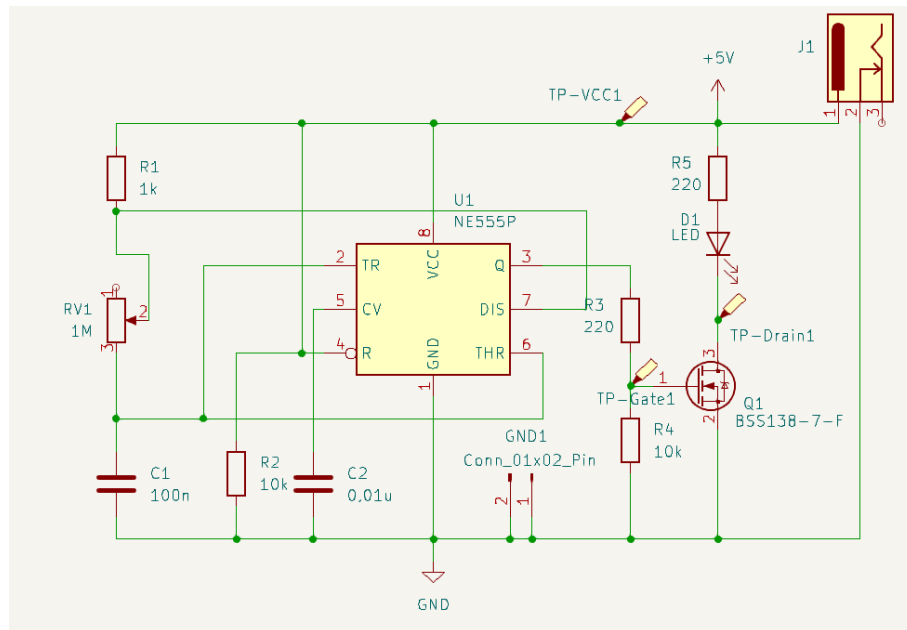
5.1.4 DPS určena pro demonstraci vlivu blokovacích kondenzátorů

Čtvrtá z řady demonstračních DPS je určena k demonstraci vlivu blokovacích kondenzátorů na elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) elektronických zařízení. Tato deska je navržena tak, aby umožnila prezentovat rozdíly v chování obvodu při jejich nepřítomnosti, a to zejména v oblasti potlačení rušení a elektromagnetického vyzařování.

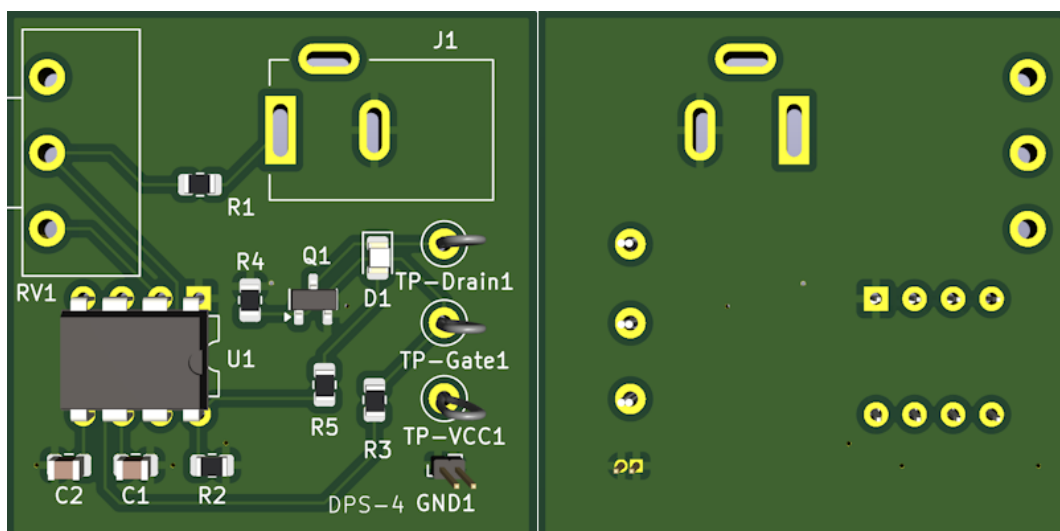
Absence blokovacích kondenzátorů má výrazný dopad jak na elektromagnetické vyzařování, tak na odolnost obvodu vůči vnějšímu rušení. Bez těchto kondenzátorů se zvyšuje pravděpodobnost výskytu vysokofrekvenčního šumu. Absence blokovacích

kondenzátorů se tedy může projevit například zvýšeným zvlněním napájecího napětí, které může vést k nestabilitě činnosti integrovaných obvodů a chybnému zpracování signálů. Dále může docházet k nestabilitě součástek citlivých na čistotu napájecího zdroje.

Tato demonstrační deska tak poskytuje názornou ukázkou důležitosti použití vhodných blokovacích kondenzátorů a dává prostor studentům lépe porozumět praktickým aspektům návrhu desek plošných spojů z pohledu EMC.



Obr. 5.6: Upravené schéma pro 4. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])



Obr. 5.7: Vizualizace 4. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])

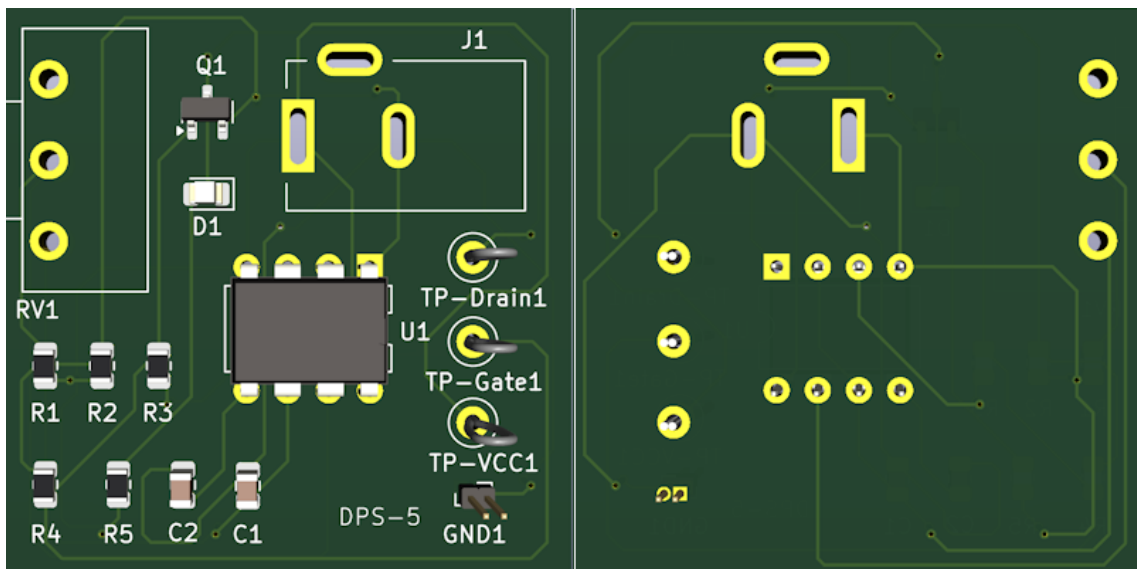
5.1.5 DPS nedodržující zásady návrhu

Poslední DPS kombinuje nedodržení všech námi probíraných zásad. Tedy vliv:

- nevhodné realizace zemnění
- vodivé plochy na velikost proudové smyčky
- proudových smyček, délky spojů a rozmístění součástek
- vedení spojů a rozlévání plochy mědi na DSP
- použití systémů blokování napájení, zejména blokovacích kondenzátorů
- umístění citlivých součástek na EMI vzhledem k poloze konektorů a jiných potenciálních zdrojů rušení

Při návrhu této desky došlo k záměrnému nedodržení všech prezentovaných pravidel návrhu z hlediska elektromagnetické kompatibility (EMC). Slouží jako ukázka vlivu nevhodného návrhu na výslednou elektromagnetickou kompatibilitu DPS.

V důsledku nedodržení těchto návrhových zásad je očekáváno zhoršení elektrických parametrů, nárůst elektromagnetického vyzařování a zhoršení odolnosti vůči EMI.



Obr. 5.8: Vizualizace 5. DPS (Vytvořeno pomocí programu KiCad [12])

Tato deska slouží k přímému srovnání s ostatními DPS ze sady a demonstraci dopadu systematického přístupu k návrhu DPS z hlediska EMC. Studenti tak mohou prakticky pozorovat důsledky zanedbaných návrhových pravidel a lépe pochopit, proč je důležité dodržovat zásady návrhu DPS.

6 Měření a ověření funkčnosti desek z pohledu výuky pravidel pro návrh DPS

Neosazené DPS byly pomocí dat z programu KiCad vyrobeny firmou JLCPCB, načež byly ručně osazeny a zapájeny. Následně byla otestována jejich funkčnost, naměřeny základní elektrické parametry a elektromagnetické vyzařování .

6.1 Měření elektrických parametrů

Pro snadné měření na osciloskopu jsou na každé DPS umístěny tři očka pro připojení osciloskopu v daném testovacím bodě. Konkrétně je zde TP-Gate, TP-Drain a TP-VCC.

Na TP-Gate lze sledovat obdélníkový signál generovaný NE555P, který je využíván ke spínání tranzistoru. Lze zde pozorovat a měřit rychlost náběžné a sestupné hrany, přítomnost vysokofrekvenčního šumu, překmity, podkmity. Tyto jevy mohou ovlivnit spínací vlastnosti tranzistoru a generovat EMI.

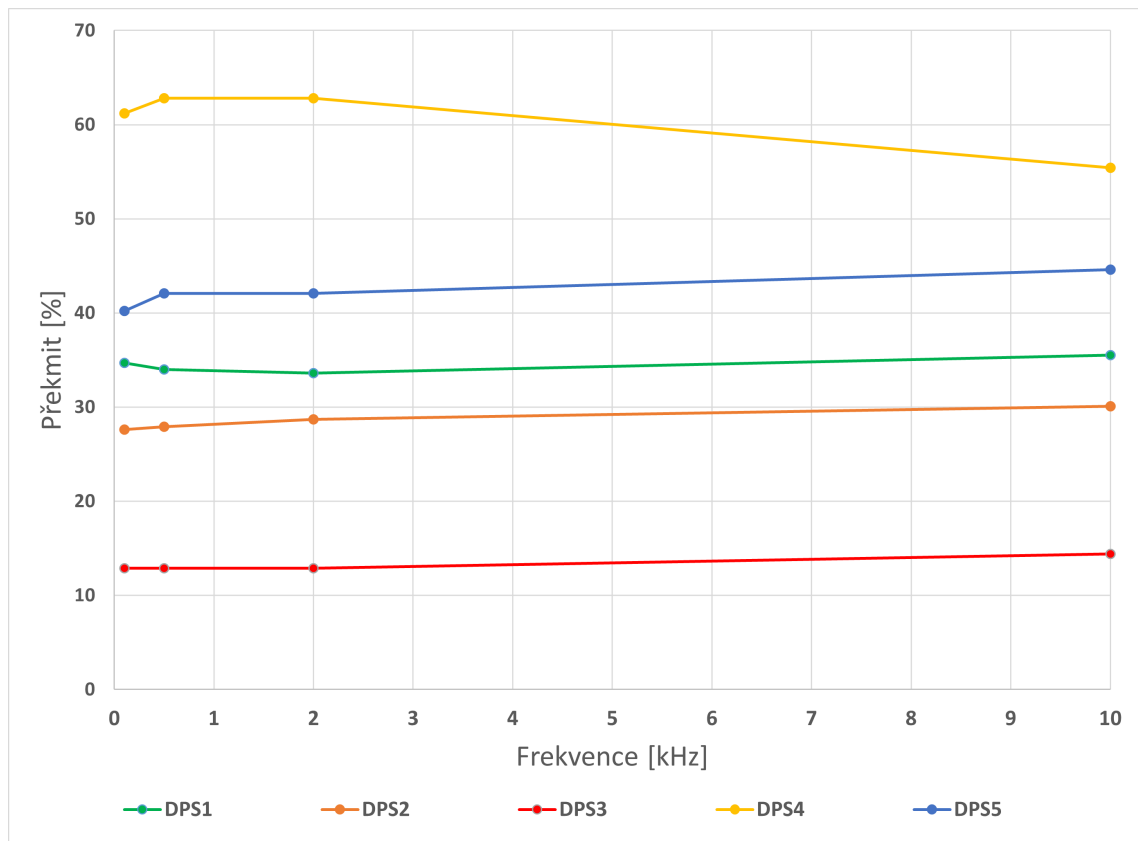
TP-Drain je zase využíván k sledování a měření spínání tranzistoru. I na tomto bodu bude měření zaměřeno na parazitní jevy ovlivňující EMC.

Stabilitu napájení, napěťové špičky, vysokofrekvenční šum, možné poklesy napětí při zátěži, přítomnost harmonických složek nebo také celkovou kvalitu napájecí větve z hlediska EMC můžeme sledovat na TP-VCC.

6.1.1 Překmity

V elektronice je překmit projevem funkce nebo signálu, který překročí svůj cílový (ustálený) stav. Překmit je často následován tzv. zvoněním (kmitáním), což je kmitání signálu okolo ustálené hodnoty před jeho stabilizací. Překmity jsou nežádoucí zejména v citlivých analogových a rychlých digitálních obvodech, protože mohou způsobit chybnou detekci logických stavů nebo vznik nadměrného elektromagnetického vyzařování. [4]

Největší překmity naměřené na TP-Gate byly pozorovány na DPS-4 a DPS-5, které neobsahují blokovací kondenzátory. Tento jev je způsoben absencí lokální filtrace napájecího napětí, kterou běžně zajišťují právě blokovací kondenzátory. Bez nich dochází při přechodových jevech k prudkým změnám proudu, které způsobují kolísání napájecího napětí a rušení signálů. Tyto výkyvy se mohou projevit jako výrazný překmit a často i jako následné zvonění signálu.

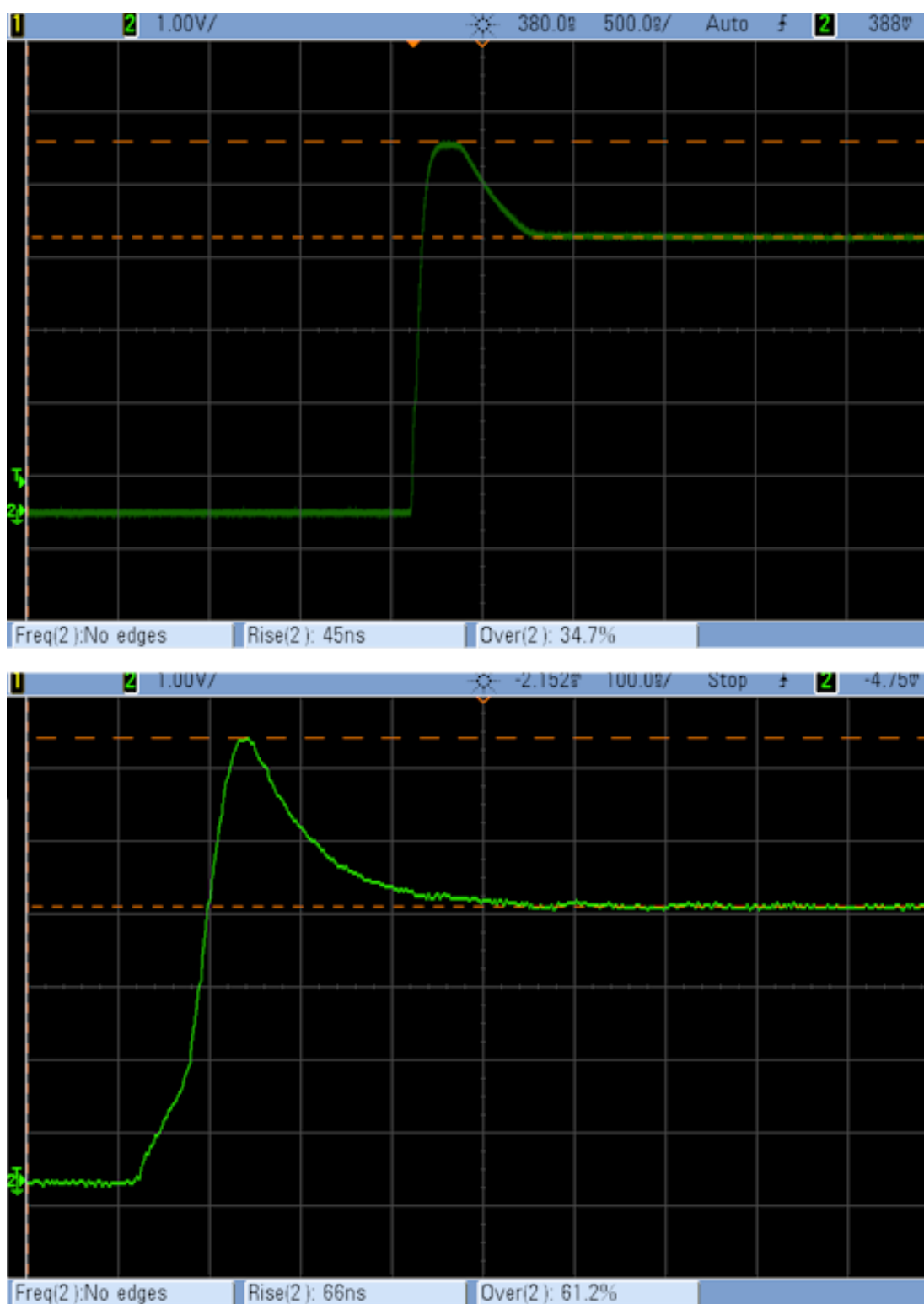


Obr. 6.1: Graf vlivu frekvence na překmit u jednotlivých DPS

Při měření na frekvenci spínání tranzistoru 100Hz byl naměřen na DPS-1 (DPS dodržující pravidla návrhu) překmit o velikosti 34,7 %. Pro porovnání nejvyšší překmit byl naměřen na DPS-4, která je konstrukčně shodná s DPS-1, avšak záměrně neosazena blokovacími kondenzátory, byl při stejném měření naměřen překmit výrazně vyšší konkrétně 61,2 %.

Vzhledem k tomu, že jediným konstrukčním rozdílem mezi těmito dvěma deskami je právě absence blokovacích kondenzátorů na DPS-4, lze tento nárůst překmitu s vysokou mírou pravděpodobnosti přičíst právě chybějícím blokovacím prvkům. Tyto kondenzátory za běžných okolností slouží k lokální stabilizaci napájecího napětí a k filtraci vysokofrekvenčních složek vznikajících zejména při rychlých spínacích dějích. Jejich absence vede ke zhoršení dynamické odezvy napájecího systému, což se projevuje právě zvýšením hodnoty překmitu signálu v okamžiku spínání.

Tato měření jednoznačně potvrzují význam správného použití blokovacích kondenzátorů v návrhu desek plošných spojů, a to nejen z hlediska funkčnosti, ale i z pohledu elektromagnetické kompatibility.

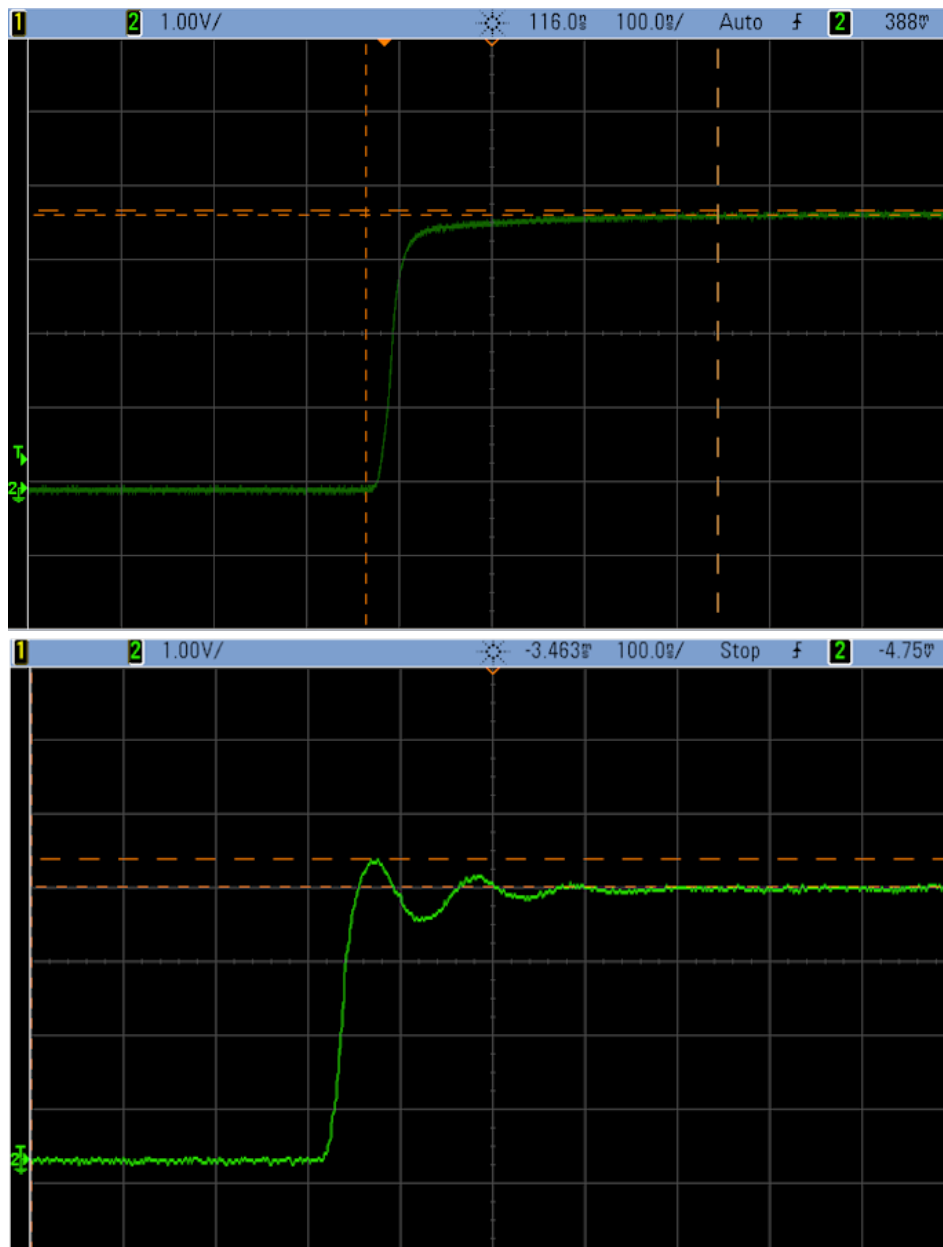


Obr. 6.2: Překmit DPS-1 a DPS-4 při frekvenci 100Hz

6.1.2 Zvonění signálu (angl. ringing)

Zvonění (nazývané taktéž ringing) na desce plošných spojů je nežádoucí oscilace napětí nebo proudu v obvodu. Tedy nedochází k okamžitému ustálení na požadované hodnotě. Místo toho signál krátce osciluje, než se ustálí. Tato oscilace vytváří sérii napěťových špiček, které připomínají zvonění. [9]

Největší rozdíl zvonění mezi jednotlivými deskami lze pozorovat na testovacím bodě TP-Drain, kde u desek s absencí blokovacích kondenzátorů (DPS-4 a DPS-5) je počet oscilací zvýšený oproti zbytku sady.



Obr. 6.3: Zvonění DPS-1 a DPS-4 při frekvenci 100Hz

Jelikož hlavním rozdílem mezi těmito deskami je absence blokovacích kondenzátorů u DPS-4, můžeme podobně jako při překmitu tento rozdíl přisoudit této absenci. Tyto kondenzátory slouží k potlačení vysokofrekvenčního rušení a ke stabilizaci napájecího napětí při náhlých změnách odběru proudu, které nastávají například při spínání tranzistoru.

Bez blokovacích kondenzátorů dochází k nestabilitám v napájecí síti, které se mohou projevit právě oscilací napětí.

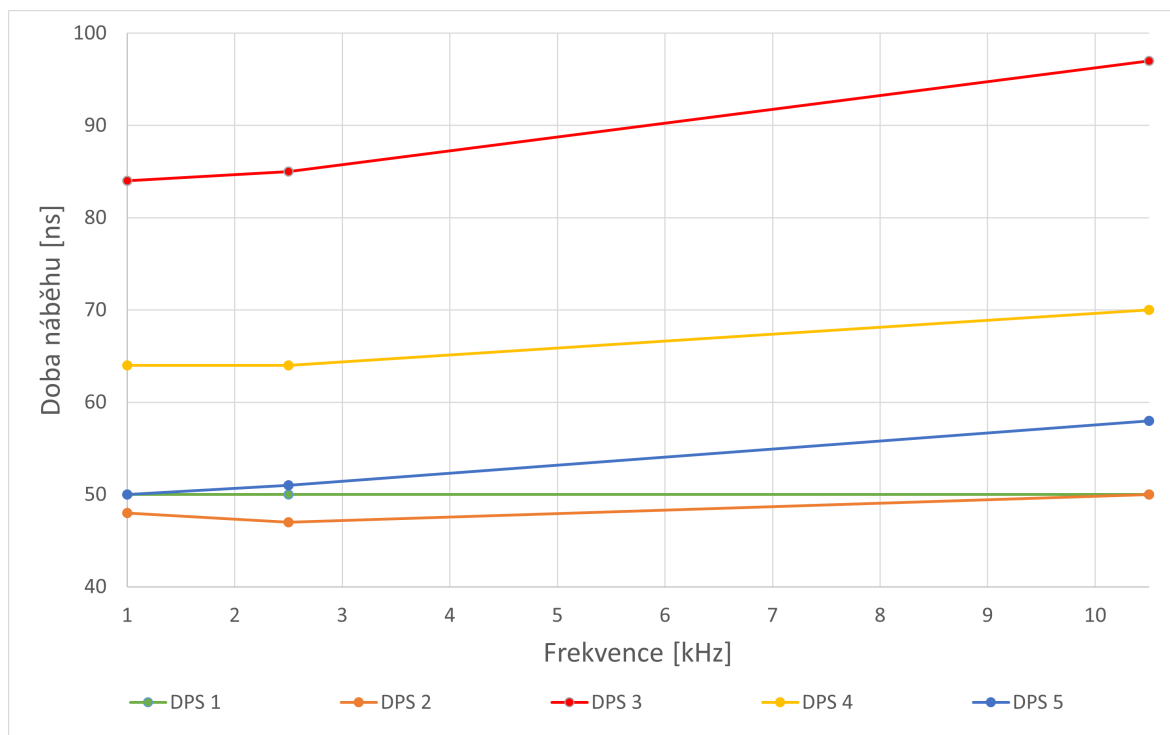
6.1.3 Doba náběhu

Doba náběhu (angl. rise time) je definována jako časový interval, během kterého signál vzroste z 10 % na 90 % své konečné hodnoty. [8]

Krátká doba náběhu znamená prudké změny napětí v čase, což vede k vysokému spektrálnímu obsahu signálu, včetně složek o velmi vysokých frekvencích. Tyto vysokofrekvenční složky mohou způsobovat nežádoucí vyzařování, přeslechy a další formy elektromagnetického rušení (EMI). Naopak příliš pomalá doba náběhu může způsobovat problémy při spínání, zejména u rychlých digitálních zařízení, kde nemusí být signál rozpoznán jako logická úroveň v požadovaném čase. [8]

V našem případě se doba náběhu signálu pohybuje v řádu desítek nanosekund. Nejvyšší dobu náběhu na TP-Gate můžeme bez pochyb sledovat na DPS-3, tedy variantě demonstrující vliv umístění součástek a vedení spojů. Tento rozdíl v době náběhu oproti například referenční DPS může být způsoben kombinací následujících faktorů:

- **Parazitní kapacita a indukčnost** - Nevhodně navržené signálové cesty, které jsou například příliš dlouhé nebo vedené blízko krajů či jiných vodičů, zvyšují parazitní kapacitu a indukčnost, které mají za následek zpomalení náběhu signálu. [6]
- **Nevhodné vedení návratových proudů** - Absence či přerušení souvislé zemnicí vrstvy může vést k neoptimálním návratovým cestám pro signálové proudy. To způsobuje zvýšení EMI a oscilace signálu, což negativně ovlivňuje dobu náběhu. [33]
- **Neúčinné umístění blokovacích kondenzátorů** - Jelikož vhodné umístění blokovacích kondenzátorů je co nejbližší vstupu napájení, jejich nevhodné umístění může mít za následek zhoršení blokovacích funkcí kondenzátorů a jejich schopnost filtrovat vysokofrekvenční šum. [14]



Obr. 6.4: Graf vlivu frekvence na dobu náběhu u jednotlivých DPS

6.2 Měření vyzařování pomocí sond blízkého pole

Měření blízkého pole je metoda, při které měříme elektromagnetické pole vyzařované zařízením nebo obvodem z takové blízkosti, ze které dokážeme přesně identifikovat jeho zdroje. [29]

Magnetická sonda využívá smyčkovou anténu (nejčastěji ve tvaru kruhu nebo oválu) s nízkou impedancí, která zachytává magnetickou složku elektromagnetického pole v okolí vodičů, součástek a spojů. [29]

Elektrická sonda se skládá z malé vodivé desky s otevřeným obvodem, která může být použita k identifikaci zdrojů elektrického pole. [29]

Jeden z faktorů, na které si je potřeba při měření dávat pozor, je směrová citlivost sond. Magnetická sonda je vysoce citlivá na orientaci vůči zdroji. Funguje na principu indukce, takže magnetické pole musí procházet plochou smyčky kolmo, aby vyvolalo napětí. Naopak u elektrické sondy je vliv natočení prakticky nulový, jelikož reaguje na rozdíly napětí mezi měřicím hrotem a referencí.

K měření byla využita sada **HZ-15** od výrobce ROHDE & SCHWARZ, která obsahuje dvě sondy pro elektrické pole a tři sondy pro magnetické pole.



Obr. 6.5: Držák pro stabilní testování pomocí sond blízkého pole

Všechna měření byla provedena za co nejvíce identických a reprodukovatelných podmínek s cílem minimalizovat vnější vlivy, které by mohly negativně ovlivnit přesnost a spolehlivost výsledků. Každá měřená DPS byla pečlivě zafixována do plastového držáku, který zajistil její stabilní a neměnnou polohu po celou dobu měření, kde nad ní v definované výšce 1 centimetru byla vždy umístěna měřící sonda.

6.2.1 Měření pomocí magnetických sond blízkého pole

První sonda, která byla pro měření použita byla sonda **H 400-1**. Díky svému velkému průměru, který činí 25 mm, je sonda H 400-1 velmi citlivá, což ji činí vhodnou pro detekci i slabších signálů. Je určena pro měření ve vzdálenostech až do 10 cm okolo sestav a zařízení. Má tlumicí plášť pro proud, a je proto elektricky stíněná. Díky této konstrukci je možné dosáhnout přesných a spolehlivých výsledků. Lze ji připojit ke spektrálnímu analyzátoru nebo osciloskopu. [26]

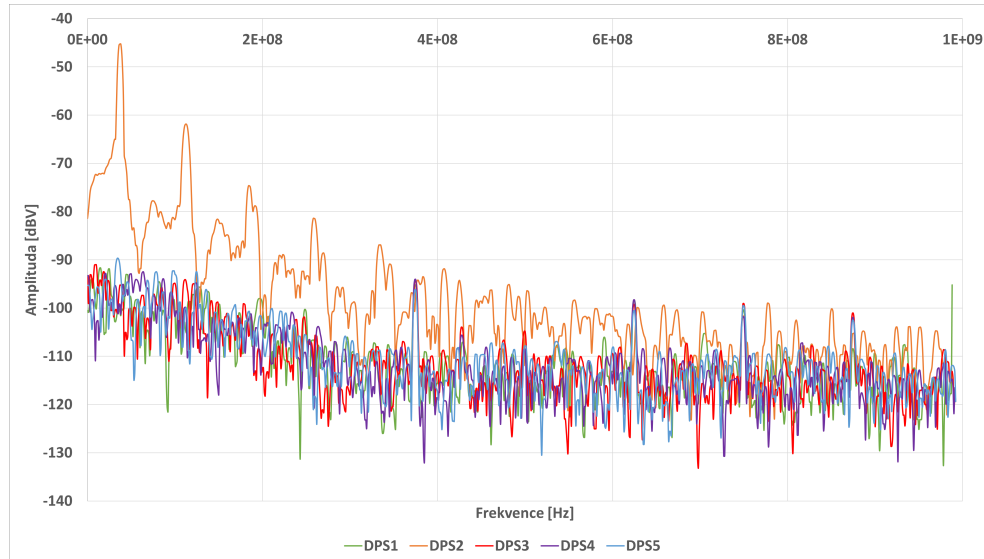


Obr. 6.6: Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 400-1 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz

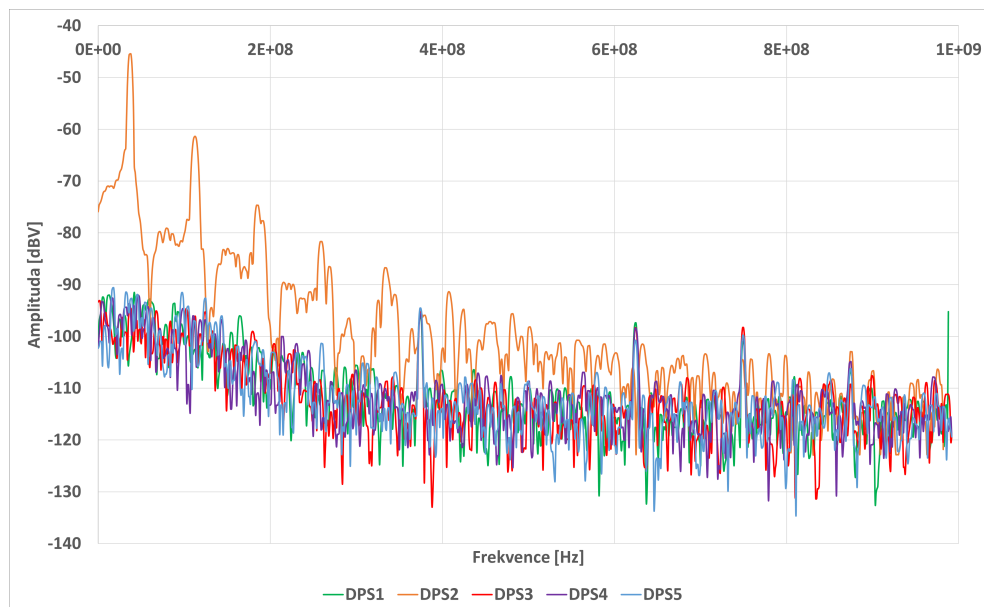


Obr. 6.7: Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 400-1 (FFT) při frekvenci spínání 500 Hz

Druhou magnetickou sondou použitou při měření je model **H 50-1**. Je konstrukčně podobná sondě H 400-1, avšak určena pro měření ve vzdálenostech do přibližně 3 cm. Díky svému středně velkému průměru 10 mm pokrývá menší oblast magnetického pole, což ji činí méně citlivou ve srovnání se sondou H 400-1. Na druhou stranu však nabízí vyšší rozlišení než model H 400-1. [27]



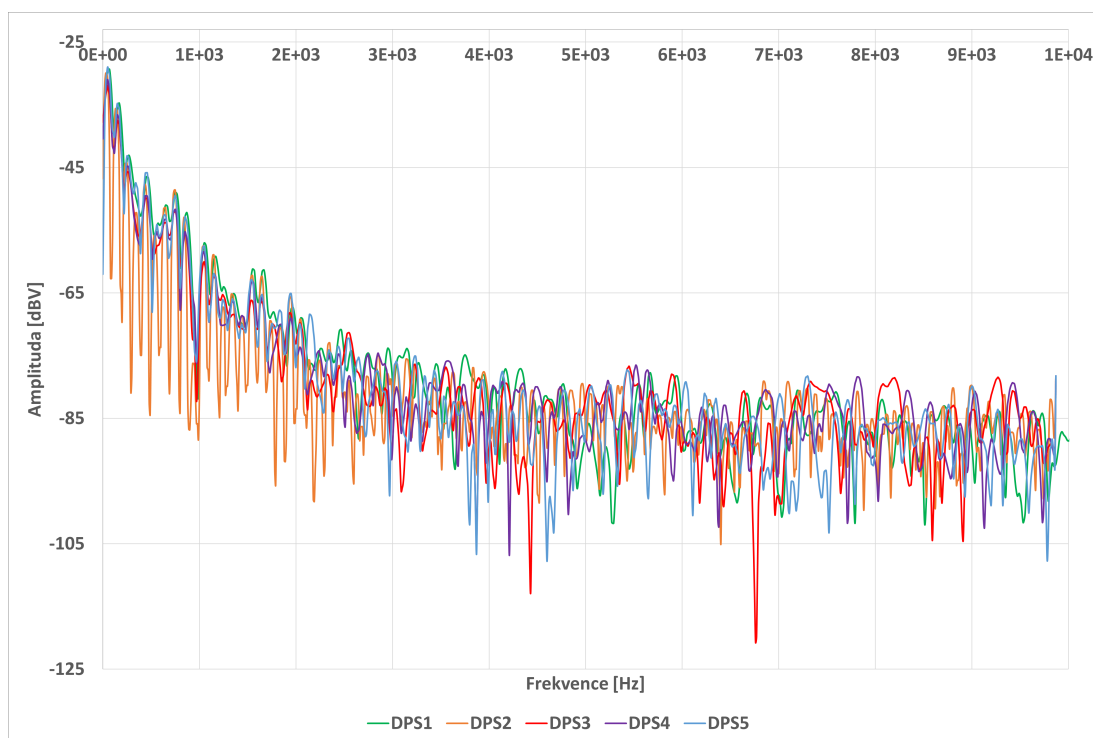
Obr. 6.8: Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 50-1 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz



Obr. 6.9: Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou H 50-1 (FFT) při frekvenci spínání 500 Hz

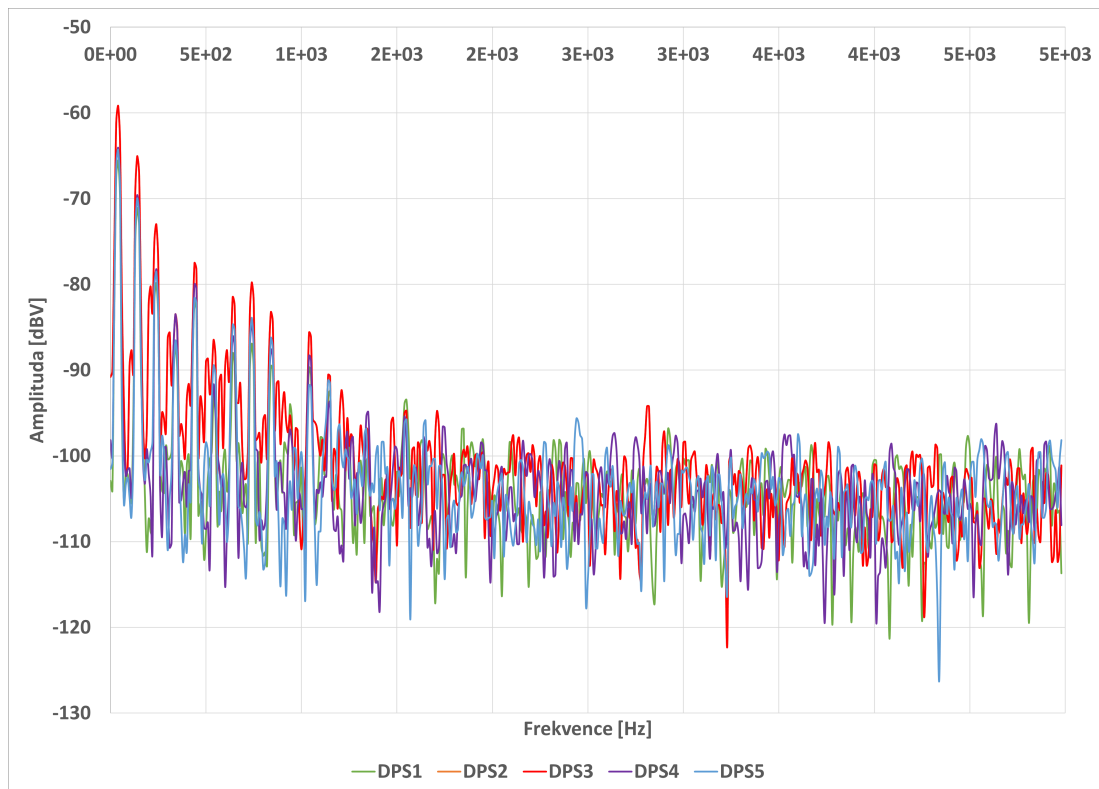
6.2.2 Měření pomocí elektrických sond blízkého pole

První elektrickou sondou použitou k měření vyzařovaného elektrického pole byla sonda **E 02**. Elektrodová plocha na spodní straně hrotu sondy má rozměry přibližně 2 cm × 5 cm. Sonda pracuje nejlépe ve vzdálenostech 1 cm až 2 cm od měřeného komponentu. Při měření se spodní plocha hlavy sondy přiloží co nejbližší k objektu, což umožňuje detekovat elektrické pole vyzařované obvodem. Pro dosažení vyššího rozlišení je vhodné přiblížit k měřenému objektu pouze hrot sondy. Sonda je vybavena pláštěm s útlumem proudů, který zajišťuje elektrické stínění. [24]



Obr. 6.10: Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou E 02 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz

Poslední sonda použita při měření je **E 10**, taktéž od Langer EMV-Technik. Elektroda na dolním okraji sondy má šířku přibližně 0,2 mm, což umožňuje detekci i velmi malých zdrojů elektrického pole, například vodivých cest o šířce 0,1 mm nebo jednotlivých pinů integrovaných obvodů s vysokým počtem vývodů. V našem případě bylo měření provedeno na hradle tranzistoru. Má vyšší rozlišení než sonda E 02. Jelikož by měla být hlava sondy umístěna přímo na měřený objekt (vysoká intenzita elektrického pole), není vhodná pro měření ve větších vzdálenostech. [25]



Obr. 6.11: Porovnání spekter EMI z DPS1-DPS5 měřených sondou E 10 (FFT) při frekvenci spínání 100 Hz

6.3 Srovnání výsledků měření

Sada navržená v této práci byla navržena za účelem demonstrace vlivu návrhu DPS na EMC tak, aby tento vliv šlo přehledně prezentovat studentům. Tato sada, skládající se z 5 DPS, obsahuje jednu desku dodržující pravidla návrhu. Zbytek DPS obsahuje jednu či více návrhových chyb tak, aby vliv těchto chyb bylo možné naměřit a posoudit. Porovnání výsledků naměřených na jednotlivých DPS přináší možnost přehledného porovnání vlivů jednotlivých chyb návrhu na EMC.

6.3.1 Výsledky DPS-1

V rámci všech měření vykazovala DPS-1 stabilní a očekávané parametry.

Překmitý signál (overshoot) naměřené na testovacím bodu TP-Gate se pohybovaly v rozmezí 33,6-35,5 %. U TP-Drain byly tyto hodnoty konstantní o hodnotě 1,7 %, bez výskytu zvonění (ringing). Doba náběhu (rise-time) se pohybovala mezi 25-50 ns v závislosti na frekvenci. Čas za který se signál ustálil byl mezi 83 a 710 ns v závislosti na frekvenci.

Průměrná hodnota amplitudy naměřená pomocí H sond (magnetické sondy blízkého pole) se stabilně udržovala okolo hodnoty -111,5 dBV. Sondou E 10 byla naměřena průměrná hodnota amplitudy -103,7 dBV a sondou E 02 -84,2 dBV.

DPS díky dodržení prezentovaných pravidel vykazuje stabilní a předvídatelné chování z hlediska signálových parametrů a elektromagnetické kompatibility.

6.3.2 Výsledky DPS-2

DPS-2 představuje variantu demonstrující vliv absence plochy vylité mědi a jednobodového zemnění. Na TP-Gate dosahovaly překmity mírně nižších hodnot než u DPS-1 (např. 27,6 % při 100 Hz oproti 34,7 % u DPS-1), ale zároveň byla patrná delší doba ustálení a prodloužená doba náběhu. Doba ustálení na TP-Gate dosahovala až 534 ns při 10 kHz, zatímco doba náběhu (rise-time) zůstala relativně konzistentní.

U TP-Drain však nebyly pozorovány významné rozdíly v překmitech nebo zvonění. To může být způsobeno tím, že samotná funkce tranzistoru nebyla změnami přímo ovlivněna. Výsledky naznačují, že nevhodné zemnění se výrazněji projevuje právě ve výkonových částech, kde dochází k přenosu vyšších proudů.

Měření sondami blízkého pole odhalilo výrazné navýšení průměrné amplitudy elektromagnetického vyzařování. Sondou H 50-1 byla naměřena průměrná hodnota amplitudy -99,19 dBV a sondou H 400-1 dokonce -88,23 dBV. Pomocí elektrické sondy E 10 i E 02 byla taktéž naměřena zvýšená průměrná hodnota amplitudy -100,98 dBV (E 10) a -81,59 dBV (E 02).

Z výsledků je zřejmé, že návrhové rozdíly DPS 2 mají výrazný vliv na elektromagnetické vyzařování, zejména v oblasti magnetické složky pole. Nevyužití vnitřní GND vrstvy a horní plochy mědi, spolu s jednobodovým zemněním, způsobuje nárůst proudových smyček a tím i intenzivnější vyzařování, jak potvrzují výrazně vyšší hodnoty amplitudy u sond H. Ostatní desky využívající vnitřní vrstvu GND se spojitou zemní plochou, vykazují výrazně nižší úroveň vyzařování.

6.3.3 Výsledky DPS-3

Třetí DPS ze sady byla navržena s cílem demonstrovat negativní vliv nesprávného uspořádání součástek a vedení signálových cest. Tato změna vedla k výraznému prodloužení doby ustálení, jak bylo patrné především z hodnot naměřených na TP-Gate. Hodnoty dosahovaly například 26,17 μ s při 500 Hz a 32,6 μ s při 10 kHz, což je několikanásobně více než u DPS-1.

Hodnoty překmitů a zvonění nevykazovaly zhoršení oproti DPS dodržující návrhová pravidla. Oproti tomu doba signálové odezvy se značně prodloužila, což naznačuje přítomnost parazitních indukčností, kapacit a přechodových jevů vzniklých

neoptimálním umístěním prvků. Doba náběhu, zde dosahovala nejvyšších hodnot oproti ostatním DPS ze sady, a to až 97 ns.

Měření magnetickými sondami blízkého pole neukázalo značné rozdíly v průměrné amplitudě vůči DPS-1, jelikož průměrná hodnota amplitudy byla přibližně -111,6 dBV. Oproti tomu hodnoty naměřeny pomocí elektrických sond dosahovaly průměrné amplitudy -103,24 dBV (E 10) a -80,38 dBV (E 02), což je zlepšení oproti DPS-2, avšak je to zhoršení v porovnání s DPS-1.

6.3.4 Výsledky DPS-4

DPS-4 byla navržena s absencí blokovacích kondenzátorů. Vykazovala nejvyšší hodnoty překmitu na TP-Gate i TP-Drain napříč všemi měřenými frekvencemi. Konkrétně 61,2 % při 100 Hz a 62,8 % při 2 kHz. Měření taktéž ukázalo zvýšený výskyt zvonění signálu, konkrétně až 3 oscilace na TP-Drain.

Doba náběhu byla vyšší než u referenční desky (např. 70 ns při 10 kHz) a ustalovací doba se rovněž prodlužovala. Docházelo tak k nárůstu vysokofrekvenčního šumu a nestabilitě výstupních signálů, což potvrzuje důležitost využití blokovacích prvků.

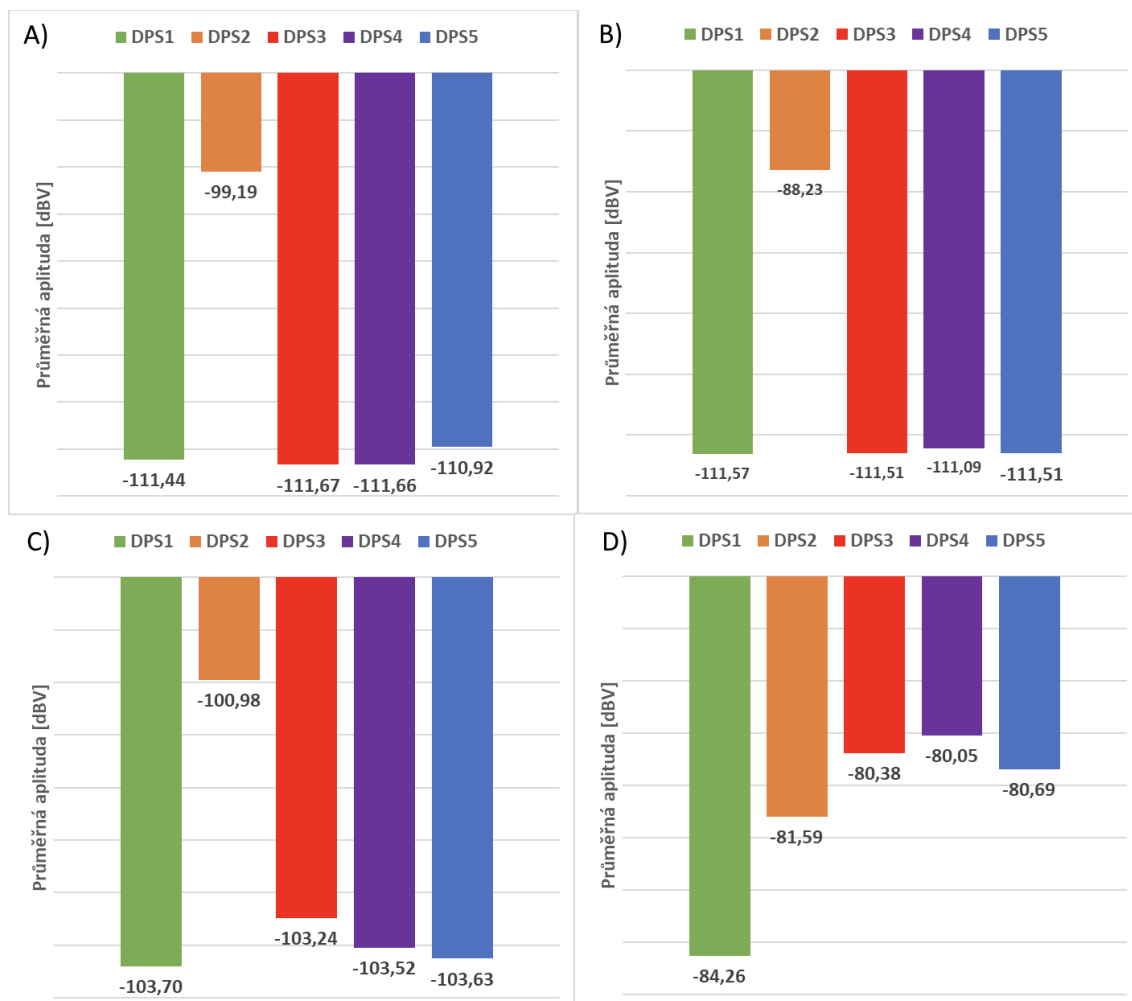
Co se týče měření za pomoci magnetických sond blízkého pole, tak nedošlo k výraznému nárůstu průměrné amplitudy, ta se držela na hodnotě -111,6 dBV (H 50-1) a -111,09 dBV (H 400-1). Průměrné hodnoty amplitudy naměřeny pomocí elektrické sondy E 10 dosahovaly 103,52 dBV a -80,05 dBV u sondy E 02. Došlo tedy k mírnému zhoršení výsledků oproti DPS-1.

6.3.5 Výsledky DPS-5

DPS-5 nedodrží všechny probrané zásady. Výsledky měření ukazují, že tato deska vykazovala opakovaně zhoršené parametry ve všech měřených oblastech. Překmity na TP-Gate se pohybovaly kolem 40-45 % napříč frekvencemi (např. 44,6 % při 10 kHz). Došlo taktéž k zvonění (ringing) signálu, které bylo pozorováno na TP-Drain.

Doba ustálení sice nedosahovala hodnot DPS-3, ale byla znatelně vyšší než u DPS-1. Doba náběhu byla taktéž zvýšená (např. 58 ns při 10 kHz), což spolu s ostatními parametry potvrzuje celkové zhoršení parametrů DPS.

Měření sondami blízkého pole taktéž dokázalo zhoršení oproti DPS dodržující pravidla návrhu. Výsledky získané magnetickými sondami ukazují pouze mírné zhoršení, konkrétně -110,92 dBV (H 50-1) a -111,51 dBV (H 400-1). Výsledky získané pomocí elektrických sond, především E 02 dokazují nárůst EMI oproti DPS-1.



Obr. 6.12: Graf průměrných hodnot amplitudy pro sondy A) H 50-1, B) H 400-1, C) E 10, D) E 02

Z grafu je patrné, že návrhové rozdíly DPS 2 mají výrazný vliv na elektromagnetické vyzařování, zejména v oblasti magnetické složky pole.

Výsledky měření potvrzují, že dodržení představených pravidel návrhu vede k dosažení stabilních výsledků, které v porovnání s nedodržением jedno či více pravidel dosahují obecně lepších hodnot, a to jak z hlediska elektrických parametrů, tak elektromagnetického vyzařování.

Jednotlivé návrhové zásady mají různý vliv na parametry DPS. Míra ovlivnění výsledků v závislosti na dodržení jednotlivých zásad se může lišit v závislosti na konkrétní aplikaci. Nelze proto jednoznačně určit, která zásada je obecně nejdůležitější, jelikož každý návrh má své specifické požadavky a kritéria, na která je třeba brát zřetel.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a sestavit pracoviště pro potřeby laboratorního vyučování z oblasti EMC při návrhu plošného spoje.

Nejprve byla krátce představena problematika elektromagnetické kompatibility v elektrotechnice. Zejména zdroje a typy rušení, ale také typy vzájemných vazeb.

Poté následovala kapitola se zaměřením na normy a doporučení v oblasti EMC, které jsou v kontextu elektromagnetického vyzařování pro tuto práci relevantní.

První větší kapitola se zabírala teorií, konkrétně návrhem metodiky prezentace pravidel při návrhu DPS. Je zde probrána řada vlivů a pravidel, které je při návrhu DPS optimální dodržet pro dosažení nejlepších výsledků v oblasti EMC. Kromě těchto pravidel je v kapitole probráno, jaký vliv bude mít absence dodržení konkrétního pravidla.

V rámci čtvrté kapitoly byly shrnuty zásady návrhu DPS a jejich srovnání vzhledem k typickým návrhovým chybám.

V páté kapitole byl proveden návrh přípravků pro prezentaci pravidel návrhu DPS. Nejdříve byl zvolen vhodný obvod a součástky tak, aby byla výuka s těmito přípravky dostatečně přínosná, ale zároveň nebyla příliš komplikovaná. Byla navržena sada o celkovém počtu pěti DPS. Z toho jedna DPS dodržuje prezentovaná pravidla návrhu (udává referenci toho, jaké budou výsledky měření, pokud dodržíme všechna prezentovaná pravidla), dále sada obsahuje trojici DPS, kde každá reprezentuje nedodržení jednoho či více pravidel návrhu. Návrh poslední DPS postrádá dodržení všech prezentovaných pravidel. Tato sada dává prostor studentům k pochopení a praktickému odzkoušení toho, jak moc velký vliv má dodržení základních návrhových zásady na celkovou EMC navrhované DPS.

Poslední část práce obsahuje laboratorní ověření funkčnosti desek z pohledu výuky pravidel při návrhu DPS v oblasti EMC a srovnání výsledků daných měření. Z výsledků je patrné, že kvalita návrhu DPS má přímý vliv na výslednou elektromagnetickou kompatibilitu desek plošných spojů. Deska dodržující pravidla návrhu vykazovala stabilní chování bez výrazných odchylek. Návrhové rozdíly DPS 2 měly výrazný vliv na elektromagnetické vyzařování, zejména v oblasti magnetické složky pole. Třetí DPS, navržena s neoptimálním rozmístěním součástek a vedením spojů, trpěla zpomalenou odezvou. Absence blokovacích kondenzátorů u DPS-4 měla za následek nejvyšší hodnotu překmitů a zvonění signálu, což potvrzuje jejich klíčovou roli v napájecím systému. Kombinace nedodržení všech prezentovaných návrhových zásad u DPS-5 vyústilo v celkové zhoršení všech měřených parametrů.

Práce tedy dokázala vliv dodržení jednotlivých návrhových pravidel na výslednou elektromagnetickou kompatibilitu navrhované DPS. Jednotlivé zásady jsou zde popsány a vysvětleny tak, aby byl student schopen pochopit v čem spočívají a jak mo-

hou ovlivnit výsledný charakter navrhované DPS. Jsou zde popsány i typické chyby, kterých se při návrhu lze dopustit a v jakém rozsahu mohou poškodit elektrické parametry i elektromagnetické vlastnosti DPS. Tato práce poskytuje dostatečnou znalostní základnu pro základní porozumění problematiky i v případě, že student nemá předchozí zkušenosti s návrhem DPS nebo zásadami elektromagnetické kompatibility. Kombinací teoretických informací a praktických ukázek umožňuje čtenáři lépe pochopit souvislosti mezi návrhovými zásadami a výslednými vlastnostmi navrhované DPS.

Měření byla provedena pomocí osciloskopu, avšak použití spektrálního analyzátoru by mohlo v budoucnu přinést detailnější výsledky.

V příloze práce se nachází praktický návod na měření s vytvořenou sadou DPS určen k výuce v rámci laboratorních cvičení. Za pomoci tohoto návodu dokáže student bakalářského oboru samostatně pracovat se sadou DPS navrženou v této práci a prakticky ověřit měřením vliv jednotlivých návrhových zásad na elektromagnetickou kompatibilitu.

V budoucnu by bylo vhodné navázat na tuto práci vytvořením komplexnějšího řešení pracujícího s vyšším elektrickým výkonem. Takový přístup by umožnil detailnější a hlubší analýzu specifických zásad a faktorů, které významně ovlivňují elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) v praktických aplikacích. Dále by bylo možné rozšířit oblast výzkumu o nové metody měření a simulace, které by přispěly ke zvýšení přesnosti vyhodnocení EMC parametrů. Toto by rovněž umožnilo lepší integraci návrhových pravidel do reálných průmyslových procesů a usnadnilo by transfer znalostí do výuky a praxe.

Literatura

- [1] ARMSTRONG, Keith. Design Techniques for EMC - Part 2 Cables and Connectors. Online. *Nutwooduk*. Dostupné z: https://www.nutwooduk.co.uk/archive/keitharmstrong/design_techniques2.html#_Getting_the_best_1. [cit. 2024-11-12].
- [2] ARROW. Why decoupling capacitors matter. Online. *Arrow*. 2023. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/why-decoupling-capacitors-matter>. [cit. 2024-11-03].
- [3] CADENCE PCB SOLUTIONS. *Single-Point vs. Multipoint Grounding in PCB Layouts*. Online. Cadence. 2021, s. 1. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2021-single-point-vs-multipoint-grounding-in-pcb-layouts>. [cit. 2024-10-27].
- [4] CADENCE PCB SOLUTIONS. What is the Significance of Signal Overshoot and How is it Reduced? Online. *Cadence PCB Design & Analysis*. 2020. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-the-significance-of-signal-overshoot-and-how-is-it-reduced>. [cit. 2025-04-18].
- [5] ČESKO. Nařízení vlády č. 117/2016 Sb., o posuzování shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při jejich dodávání na trh. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 26. 11. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-117>
- [6] DOWNS. Parasitic capacitance of PCB circuit board vias. Online. *IPCB*. 2021. Dostupné z: <https://www.ipcb.com/technical/7109.html>. [cit. 2025-04-24].
- [7] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibility: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [8] ELECTRICAL4U. Rise Time: What is it? (Equation And How To Calculate It). Online. *Electrical 4 U*. 2024. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/rise-time/>. [cit. 2025-04-23].
- [9] GHOSH, Poulomi. How to Reduce Ringing in Your PCB Designs. Online. *Protoexpress*. 2023. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/how-to-reduce-ringing-in-pcb-designs/>. [cit. 2025-04-19].

- [10] GEEKSFORGEEEKS. Electromagnetic Interference. Online. *Geeksforgeeks*. 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/electromagnetic-interference/>. [cit. 2025-05-28].
- [11] JLCPCB. Understanding Analog and Digital Ground in PCB Design. Online. *JLCPCB*. 2024. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/blog/understanding-analog-and-digital-ground-in-pcb-design>. [cit. 2025-05-27].
- [12] KICAD DEVELOPMENT TEAM. *KiCad EDA*. 8.0.6. KiCad Project, c1992—2024. Dostupné také z: <https://www.kicad.org>.
- [13] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7.
- [14] LUN, T. C. Výběr součástek při návrhu desky s ohledem na EMC. Online. *DPS Elektronika od A do Z*. 2015, roč. 2015, č. 4. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:27484/vyber-soucastek-pri-navrhu-desky-s-ohledem-na-emc>. [cit. 2024-11-03].
- [15] LANGER EMV-TECHNIK GMBH. *Langer EMV-Technik*. Online. Dostupné z: <https://www.langer-emv.de/en/index>. [cit. 2024-12-05].
- [16] LANGER EMV-TECHNIK GMBH. *Langer EMV-Technik*. Online. [2021]. Dostupné z: <https://www.langer-emv.de/en/product/equipment-for-teaching-and-training/11/d10-set-emc-demonstration-board/523#Short%20description>. [cit. 2024-12-05].
- [17] MARI, Lorenzo. Single-Point and Multi-Point Signal Grounding. Online. *Eepower*. 2021. Dostupné z: <https://eepower.com/technical-articles/single-point-and-multi-point-signal-grounding/#>. [cit. 2024-10-28].
- [18] MEDIANO, Arturo. Avoid Critical Signals in Edges of the PCB. Online. *Incompliance*. 2018. Dostupné z: <https://incompliancemag.com/avoid-critical-signals-in-edges-of-the-pcb/>. [cit. 2024-11-13].
- [19] *NORMY.biz*. Online. C2003 - 2024. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/>. [cit. 2024-11-27].
- [20] OLNEY, Barry. Návrh DPS s rychlými obvody s ohledem na EMC. Online. *DPS Elektronika od A do Z*. 2011, roč. 2011, č. 1. Dostupné

- z: In-Circuit Design Pty Ltd, <https://www.dps-az.cz/clanky/id:9995/navrh-dps-s-rychlymi-obvody-s-ohledem-na-emc>. [cit. 2024-10-30].
- [21] OTÁHAL, Alexandr. Mikroelektronické praktikum 2, Návrh plošného spoje - Přednáška. Online. In: . S. 46. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/845487/mod_resource/content/1/2_Návrh%20plošného%20spoje_2024.pdf. [cit. 2024-10-28].
- [22] PETERSON, Zachariah. What is ESD and How Does it Affect My PCB Design? Online. *Altium*. 2017. Dostupné z: <https://resources.altium.com/p/what-is-esd-and-how-does-it-affect-my-pcb-design>. [cit. 2024-11-21].
- [23] PLEŠINGER, Jaroslav. Pravidla návrhu desek plošných spojů: Vedení a přeslechy. Online. *TechSoft*. [2022]. Dostupné z: <https://www.techsoft-eng.cz/blog/pravidla-navrhu-desek-plosnych-spoju-vedeni-a-preslechy>. [cit. 2024-10-30].
- [24] *RF-E 02 E-Field Probe*. Online. Langer EMV-Technik. Dostupné z: <https://www.langer-emv.de/en/product/rf-passive-30-mhz-up-to-3-ghz/35/rf-e-02-e-field-probe-30-mhz-up-to-1-5-ghz/19>. [cit. 2025-05-23].
- [25] *RF-E 10 E-Field Probe*. Online. Langer EMV-Technik. Dostupné z: <https://www.langer-emv.de/en/product/rf-passive-30-mhz-up-to-3-ghz/35/rf-e-10-e-field-probe-30-mhz-up-to-3-ghz/10>. [cit. 2025-05-23].
- [26] *RF-R 400-1 H-Field Probe*. Online. Langer EMV-Technik. Dostupné z: <https://www.langer-emv.de/en/product/rf-passive-30-mhz-up-to-3-ghz/35/rf-r-400-1-h-field-probe-30-mhz-up-to-3-ghz/13>. [cit. 2025-05-22].
- [27] *RF-R 50-1 H-Field Probe*. Online. Langer EMV-Technik. Dostupné z: <https://www.langer-emv.de/en/product/rf-passive-30-mhz-up-to-3-ghz/35/rf-r-50-1-h-field-probe-30-mhz-up-to-3-ghz/14>. [cit. 2025-05-23].
- [28] SATTEL, Sam. The Top 10 PCB Routing Tips for Beginners. Online. *Autodesk*. 2017. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/top-10-pcb-routing-tips-beginners/>. [cit. 2024-10-30].
- [29] SCANLON, James. EMC Testing with Near Field Probes, Magnetic and Electric. Online. *ADI EngineerZone*. 2024. Dostupné z: <https://ez.analog.com/ez-blogs/b/engineerzonestoplight/posts/emc-testing-with-near-field-probes-magnetic-and-electric>. [cit. 2025-04-26].

- [30] SOS ELECTRONIC. Design desky plošných spojů - Jak správně rozmístit součástky na DPS (2. část). Online. *Vyvoj.hw*. 2017. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/design-desky-plosnych-spoju-jak-spravne-rozmistit-soucastky-na-dps-2-cast.html>. [cit. 2024-11-03].
- [31] TARANOVICH, Steve. The Impact of EMI on Wi-Fi. Online. *Electronic Design*. 2021, s. 1. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/technologies/analog/article/21180942/electronic-design-the-impact-of-emi-on-wi-fi>. [cit. 2024-10-26].
- [32] The Importance of Copper Pour in Empty Areas on PCBs. Online. *Jlpcb*. 2024. Dostupné z: <https://jlpcb.com/blog/the-importance-of-copper-pour-in-empty-areas>. [cit. 2024-10-28].
- [33] V, Sushmitha. 7 Tips and PCB Design Guidelines for EMI and EMC. Online. *Proto Express*. 2022. Dostupné z: <https://www.protoexpress.com/blog/7-pcb-design-tips-solve-emi-emc-issues/>. [cit. 2024-11-17].
- [34] YILDIZ, Sena a COSKUN, Ozlem. Electromagnetic Interference in Printed Circuit Board Design. Online. *International Journal of Circuits and Electronics*. 2023, s. 10. ISSN 2367-8879. Dostupné z: [https://www.iiaras.org/iiaras/filedownloads/ijce/2023/004-0001\(2023\).pdf](https://www.iiaras.org/iiaras/filedownloads/ijce/2023/004-0001(2023).pdf). [cit. 2024-11-16].
- [35] ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů - DCE FEL ČVUT v Praze*. Online, Skriptum. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Elektrotechnická fakulta, 2000. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/17974634/metodika-navrhu-plosnych-spoju-dce-fel-cvut-v-praze>. [cit. 2024-11-14].

Seznam symbolů a zkratek

ČSN Česká státní norma

DPS desky plošných spojů, v angličtině PCB (printed circuit board)

EMC elektromagnetická kompatibilita

EMI elektromagnetická interference

EMS elektromagnetická susceptibilita

EN Evropská norma

ESD elektrostatický výboj (electrostatic discharge)

IEC Mezinárodní elektrotechnická komise (International Electrotechnical Commission)

MOSFET Tranzistor s řízeným elektrickým polem na bázi kov-oxid-polovodič (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

vf vysoká frekvence

Seznam příloh

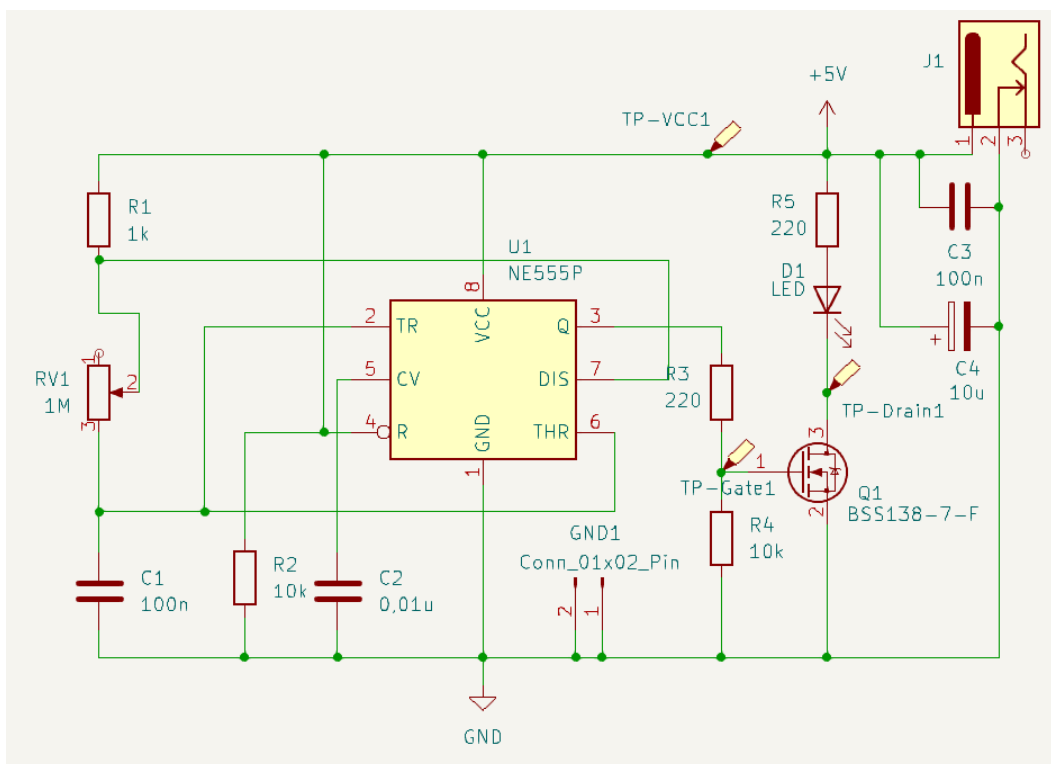
A Návod na provedení měření pro studenty

63

A Návod na provedení měření pro studenty

Cíl úlohy

- Ověřte funkci jednotlivých DPS za pomoci osciloskopu
- Změřte základní elektrické parametry DPS a porovnejte navzájem jejich hodnoty
- Využijte sondy blízkého pole pro měření elektromagnetického vyzařování
- Proveďte analýzu výsledků a zdůvodněte příčiny jejich rozdílů



Obr. A.1: Schéma zapojení obvodu

Teoretický úvod

- Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení, systémů nebo přístrojů správně fungovat i v prostředí, kde působí další elektromagnetické signály - a to jak přirozené, tak umělé.

Při návrhu je naším cílem vytvořit DPS, která svými elektromagnetickými vlivy nebude rušit zařízení, systémy či přístroje ve svém okolí. Samotná DPS by měla být taktéž co nejvíce odolná proti rušení.

- Vzájemná EMI (elektromagnetická interference) probíhá vždy přes určité přenosové prostředí (vzduch, napájecí vedení, zemnění, ...), ovšem její přenos je vždy realizován prostřednictvím induktivní, kapacitní, galvanické nebo elektromagnetické vazby.

- Dodržením několika základních návrhových pravidel dokážeme násobně zlepšit funkčnost, spolehlivost nebo dokonce i bezpečnost finálního zařízení. Nekvalitní návrh může způsobit rušení mezi jednotlivými částmi obvodu nebo zvýšit náchylnost na vnější elektromagnetické rušení, což může vést k chybám či selhání daného zařízení.
- Jedním ze základních zásad pro zemnění DPS je použití souvislé zemní roviny, která poskytuje nízkoimpedanční cestu pro návratové proudy a minimalizuje elektromagnetické vyzařování i citlivost na rušení. Doporučuje se, aby zemní rovina nebyla zbytečně přerušena výřezy nebo vedením spojů. Pro účinné potlačení rušení je rovněž vhodné oddělit digitální a analogové země. Vylitá měď na DPS taktéž výrazně přispívá k elektromagnetické kompatibilitě tím, že snižuje plochy proudové smyčky a působí jako stínění proti rušení. Chceme především zamezit vzniku neuzemněných „ostrovů“ mědi.
- Při vedení spojů je zásadní minimalizace jejich délky, zejména u vysokofrekvenčních nebo rychlých signálů. Krátké spoje snižují vyzařování a omezují zachytávání rušení z okolního prostředí. Důležité je také udržovat spoj a jeho návratovou cestu co nejbližší u sebe. Tím se minimalizuje plocha proudové smyčky a potlačuje se indukivní vazba. Vedení spojů by nemělo nikdy obsahovat pravoúhlé spoje. Nejen že mohou způsobit nedoleptání spoje, ale také mohou představovat problém z hlediska vf a výkonových signálů. Optimálně je tedy vhodné vést spoje pod úhlem 45° nebo ideálně obloukem. S rostoucí frekvencí a strmostí hran zavádějí pravé úhly nadměrnou kapacitu a způsobují drobné odchylky v charakteristické impedanci.
- U rozmístění součástek se snažíme o minimalizaci proudových smyček a délky spojů, správnou pozici blokovacích kondenzátorů a vhodné umístění citlivých součástek vůči konektorům či jiným druhům jak lokálního tak externího rušení. Blokovací kondenzátory by měly být osazeny co nejbližší napájecích konektorů a napájecích vývodů integrovaných obvodů, aby účinně potlačily vysokofrekvenční šum.
- U vícevrstvých DPS je žádoucí pro zmenšení proudové smyčky využít samotnou zemnicí či napájecí vrstvu uvnitř DPS. Pokud se nachází zemnicí vrstva pod danou signálovou cestou, může se proud vracet přes tuto vrstvu. Tímto způsobem se zajistí krátká a nízkoimpedanční návratová cesta.
- MOSFET tranzistory (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) jsou polovodičové součástky, které se používají pro spínání a zesilování elektrických signálů. Vyznačují se vysokou rychlostí spínání, nízkou spotřebou energie a velkou vstupní impedancí. Díky těmto vlastnostem jsou široce využívány v napájecích zdrojích, zesilovačích a digitálních obvodech. NE555P je integrovaný časovač, který se používá v mnoha elektronických ob-

vodech jako oscilátor, monostabilní nebo astabilní klopný obvod. Je známý svou jednoduchostí, spolehlivostí a univerzálností, což z něj činí jednu z nej-používanějších součástí v oblasti analogové elektroniky.

- Obvod použit na demonstračních deskách je velmi jednoduchý pro zajištění co největší přehlednosti v rámci výuky. Funguje tak, že NE555P v astabilním režimu spíná danou frekvencí (nastavitelnou skrze potenciometr) MOSFET, který připojuje LED do obvodu.

Seznam pomůcek a vybavení

- Laboratorní zdroj
- Osciloskop
- Měřicí sonda k osciloskopu
- Sada demonstračních DPS s napájecím kabelem
- Sada sond blízkého pole HZ-15
- Držák pro fixaci DPS a sond blízkého pole

Bezpečnostní pokyny

- Student musí vždy dbát na pokyny vyučujícího, řídit se platnými bezpečnostními předpisy a pravidly laboratoře
- Měření smí provádět pouze osoby s platnou elektrotechnickou kvalifikací podle vyhlášky NV 194/2022 Sb. po příslušném prokazatelném poučení, proškolení a přezkoušení jako osoby poučené (§4) nebo osoby znalé pro samostatnou činnost (ve smyslu §6)
- Před připojením DPS k laboratornímu zdroji zkontrolujte, zda nastavená hodnota napětí nepřesahuje 5 V
- Bezodůvodně se nedotýkejte DPS ani sond blízkého pole při zapnutém napájení
- Udržujte pracoviště čisté a přehledné
- Po ukončení měření odpoj napájení a uložte veškeré vybavení zpět na určené místo

Zadání úlohy

- Nastavte laboratorní zdroj na hodnotu napětí 5 V a připojte k němu měřenou DPS
- Připojte osciloskop k TP-Gate první měřené DPS a nastavte na první měřenou frekvenci (100 Hz, 500 Hz, 2 kHz, ...)
- Proveďte měření překmitů, zvonění a doby náběhu.
- Připojte sondy blízkého pole k osciloskopu a pomocí FFT analýzy naměřte vyzářované elektromagnetické spektrum DPS
- Tento postup opakujte pro všechny DPS a jednotlivé frekvence spínání tranzistoru
- V závěru uveďte jaká návrhová pravidla mají největší vliv na finální EMC obvodu a jak co nejvíce zabránit vzniku EMI

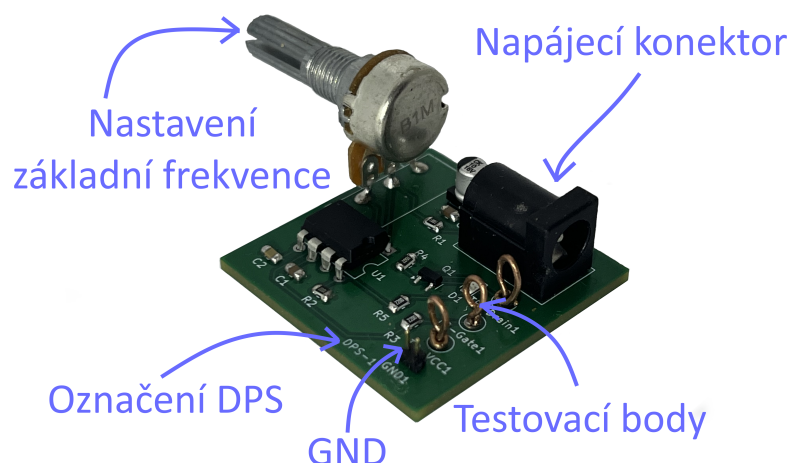
Postup měření

1. Měření základních elektrických parametrů

- Připravte měřicí pracoviště: ověřte funkčnost laboratorního zdroje, osciloskopu a měřicích sond
- Nastavte laboratorní zdroj napětí na hodnotu 5 V
- Připojte pomocí napájecího kabelu laboratorní zdroj do napájecího konektoru DPS
- Zkontrolujte, zda pro připojení napájení bliká LED
- Na testovací bod TP-Gate připojte osciloskop a nastavte první požadovanou frekvenci spínání tranzistoru (100 Hz)
- Ujistěte se, že časová základna a citlivost osciloskopu jsou vhodně nastaveny tak, aby bylo možné odečíst požadované parametry
- Pomocí kurzorů nebo měřicích funkcí osciloskopu odečtěte velikost překmitu signálu, dobu náběhu a počet oscilací (zvonění). Tyto hodnoty si zaznamenejte do tabulky
- Tento postup opakujte jak pro TP-Drain, tak i pro další požadované frekvence (100 Hz, 500 Hz, 2 kHz, 10 kHz)
- Po dokončení všech měření vypněte napájecí zdroj, odpojte DPS a uložte ji zpět do sady
- Vytvořte tabulku porovnávající výsledky měření jednotlivých DPS a do grafů vynesete frekvenční závislost doby náběhu a překmitů pro jednotlivé DPS

Tab. A.1: Ukázka tabulky pro zpracování dat (např. TP-Gate $f=100\text{Hz}$)

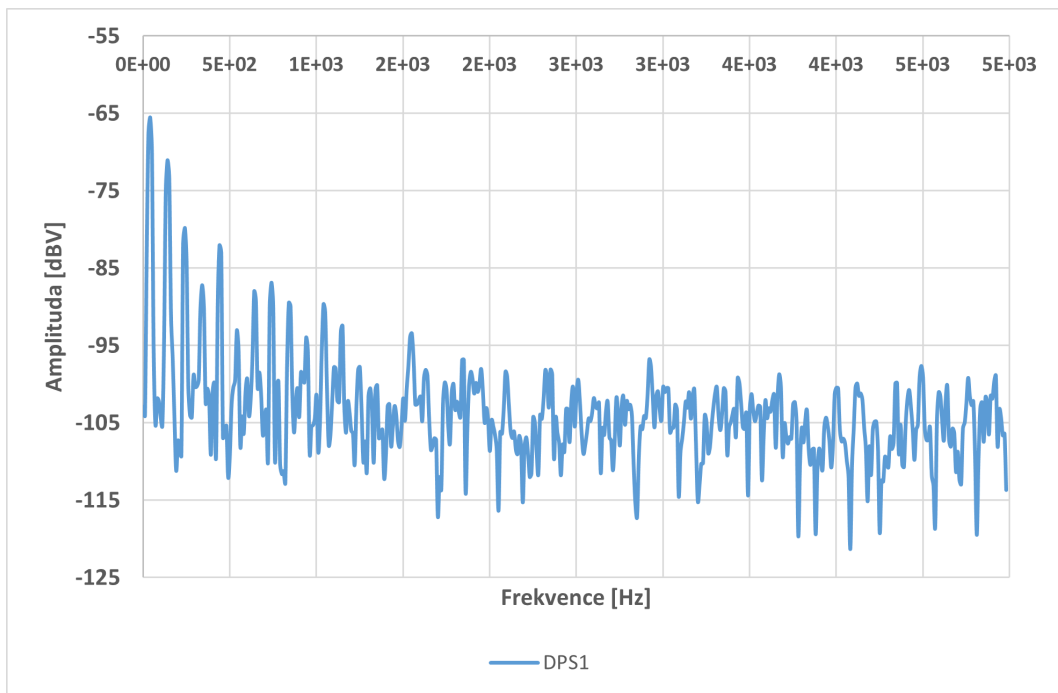
DPS varianta	Overshoot [%]	Ringings [počet oscilací]	Doba ustálení [ns]	Rise-time [ns]
DPS-1 (dodržení pravidel)				
DPS-2 (špatné zemnění)				
DPS-3 (nevhodné uspořádání)				
DPS-4 (bez blokovacích kondenzátorů)				
DPS-5 (nedodržení pravidel)				



Obr. A.2: Prvky demonstrační DPS

2. Měření pomocí sond blízkého pole

- Umístěte měřenou DPS do plastového držáku a zafixujte ji
- Připojte napájení DPS a ověřte její základní funkčnost (např. pomocí LED indikátoru)
- Připojte osciloskop k TP-Gate (nebo TP-Drain), sledujte frekvenci signálu a pomocí potenciometru nastavte požadovanou hodnotu
- První sondu blízkého pole připojte k osciloskopu a umístěte ji do druhého držáku, tak aby její střed byl umístěn nad tranzistorem a zafixujte ji v definované výšce 1 cm nad DPS (dejte si pozor i na její natočení, udržujte ji vodorovně)
- Ujistěte se že je správně nastavená časová základna a napěťový rozsah, tak aby byl signál čitelný
- Na osciloskopu nastavte funkci FFT. Tento postup se může mírně lišit v závislosti na výrobci osciloskopu, ale následující pokyny jsou obecně platné pro většinu moderních digitálních osciloskopů
- Stiskněte tlačítko MATH (nebo také ANALYZE) a vyberte funkci FFT. Zvolte kanál osciloskopu, kam máte připojenou sondu blízkého pole (např. CH1)
- Nastavte šířku pásma (Span), středovou frekvenci (Center), nastavení okna na hanning (vhodné pro většinu neperiodických nebo obecných signálů), vertikální škálu (Scale) a posun svislé osy (Offset), tak aby byl signál co nejlépe rozeznatelný. Tyto parametry udržujte stejné mezi měřeními



Obr. A.3: Příklad průběhu FFT

- Zaznamenejte si (nejlépe však uložte na USB, pro zpracování dat na pc je doporučené uložit data ve formátu .csv) výsledné naměřené spektrum
- Tento postup opakujte pro všechny další sondy v sadě. Postup opakujte i pro další požadované frekvence (100 Hz, 500 Hz, 2 kHz, 10 kHz)
- Po každé změně frekvence nebo sondy zkontrolujte umístění a stabilitu DPS i měřící sondy
- Z naměřených dat vytvořte grafy frekvenční charakteristiky elektromagnetického vyzařování jednotlivých DPS a vyhodnoťte vliv dodržení jednotlivých zásad na EMI



Obr. A.4: Ukázka správného uspořádání stanoviště pro měření sondami blízkého pole

Otázky a úkoly k zamyšlení

- Jak ovlivňuje délka a vedení spojů výsledky EMC měření?
- Které konstrukční prvky DPS mají podle měření největší vliv na velikost překmitů a zvonění signálu? Proč?
- Proč je důležité používat souvislou zemní rovinu a blokovací kondenzátory? Jaký vliv má jejich umístění na výsledky měření?
- Jak se konstrukčně liší jednotlivé sondy blízkého pole?
- Jaký vliv má frekvence spínání tranzistoru na elektromagnetické vyzařování? Proč dochází ke změnám spektra?
- Jaká opatření byste navrhli ke zlepšení EMC výsledků u měřených DPS? Které změny by byly podle vás nejúčinnější?

Možné chyby a doporučení

- Měřicí sondy vždy správně uzemněte. Neuzemněná nebo špatně připojená sonda může mít za následek rušení, zkreslený signál či možné poškození měřících přístrojů
- Používejte držák a zafixujte sondu do definované výšky. Nedodržení výšky a pozice sondy nad DPS může mít za následek problém s následným porovnáním výsledků
- Pro porovnání jednotlivých DPS udržujte stejný rozsah časové základny i další nastavení FFT jako je rozlišení či vzorkování
- Během měření se vyvarujte nechtěnému dotyku potenciometru, může dojít ke změně jeho odporu a tím i základní frekvence

Literatura a odkazy

- DŘÍNOVSKÝ, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: přednášky. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4202-3
- KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7
- ZÁHLAVA, Vít. *Metodika návrhu plošných spojů - DCE FEL ČVUT v Praze*. Online, Skriptum. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Elektrotechnická fakulta, 2000. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/17974634/metodika-navrhu-plosnych-spoju-dce-fel-cvut-v-praze>. [cit. 2024-11-14]