

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

EMC v návrhu mikropočítačů

Michal Balíček

2015/2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal BALÍČEK**
Osobní číslo: **E13B0167P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **EMC v návrhu mikropočítačů**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Proveďte rozbor základních rušivých elektromagnetických vazeb a způsob jejich minimalizace.
2. Uveďte zásadní úpravy v konstrukci mikropočítačů vedoucí ke zlepšení jejich elektromagnetické odolnosti.
3. Účinnost některých opatření ověřte měřením na funkčním vzorku mikropočítače.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh mikropočítače při splnění podmínek EMC. Pojednává o základních vlastnostech elektromagnetické kompatibility a jejich norem. Popisuje základní typy a vlastnosti elektromagnetického rušení, jeho zdroje a vazby, kterými se může šířit. Dále se věnuje obecným návrhovým pravidlům systémového řešení a jeho desky plošného spoje, které mohou přispět ke zlepšení vlastnostem zařízení z hlediska elektromagnetické interference a odolnosti proti rušení.

V závěru práce je navrženo zařízení, na která byla aplikována obecná pravidla pro návrh, a zařízení bylo otestováno sérií několika testů, vypovídající o vlastnostech zařízení z hlediska EMC.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibility, EMI, EMS, návrhová pravidla plošného spoje, standardizované testy EMC, ESD

Abstract

This thesis is focused on design of device with microprocessor, which is meeting the conditions of electromagnetic compatibility. It provides elementary knowledge of electromagnetic compatibility and its standards. It contains complex information about electromagnetic interferences, sources of interference and its binding with other part of device. According to electromagnetic compatibility rules it provides correct design of printed circuit board, which is resistant to electromagnetic interference.

The target of this thesis is to create electromagnetic compatible device, which was tested with series of electrocompatible test.

Key words

Electromagnetic compatibility, EMI, EMS, design rules of printed circuit board, standardised tests of EMC, ESD

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 2.6.2016

Michal Balíček

Poděkování

Rád bych úvodem vyjádřil poděkování vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Jířímu Skálovi, Ph.D. za metodické vedení mé bakalářské práce a za cenné profesní rady, které mi pomohly dokončit tuto práci.

Obsah

OBSAH.....	1
ÚVOD.....	3
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	4
1 EMC.....	5
1.1 ROZDĚLENÍ OBORU EMC.....	5
1.1.1 Elektromagnetická susceptibilita – odolnost.....	5
1.1.2 Elektromagnetická interference – vyzářování.....	6
1.2 DRUHY NOREM O EMC.....	6
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY EMC.....	7
1.4 DRUHY ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ.....	8
1.5 ZDROJE RUŠENÍ.....	9
1.6 TYPY VZÁJEMNÝCH VAZEB.....	10
1.6.1 Induktivní vazba.....	11
1.6.2 Kapacitní vazba.....	11
1.6.3 Galvanická vazba.....	12
1.6.4 Vazba elektromagnetickým polem.....	12
2 MINIMALIZACE ÚČINKŮ RUŠENÍ A VYZAŘOVÁNÍ ÚPRAVOU KONSTRUKCE	
MIKROPOČÍTAČE.....	12
2.1 VOLBA A ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK.....	13
2.1.1 Parazitní vlastnosti součástek.....	13
2.1.2 Minimalizace ploch proudových smyček.....	15
2.2 ZEMNĚNÍ.....	16
2.2.1 Jednobodové zemnění.....	16
2.2.2 Vícebodové zemnění.....	17
2.3 BLOKOVÁNÍ NAPÁJENÍ.....	17
2.4 NAPÁJECÍ ZDROJ.....	18
2.4.1 Stabilizátory napětí.....	18
2.5 ODROŠOVACÍ FILTRY.....	19
2.5.1 Odrušovací kondenzátory.....	20
2.5.2 Odrušovací tlumivka.....	20
2.5.3 LC filtry.....	20
2.5.4 Přepětové ochrany.....	21
2.6 ODDĚLENÍ ANALOGOVÉ A ČÍSLICOVÉ ČÁSTI.....	22
3 EMC TESTY NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ A JEJICH VÝSLEDKY	23
3.1 POPIS NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	23
3.2 ZKOUŠKA ODOLNOSTI ELEKTRICKY RYCHLÝMI PŘECHODOVÝMI DĚJI/SKUPINOU IMPULSŮ.....	24
3.2.1 Výsledky zkoušky odolnosti proti transientním signálům typu <i>Burst</i>	25
3.3 MĚŘENÍ ÚROVNĚ VYZAŘOVANÉHO VYSOKOFREKVENČNÍHO RUŠENÍ.....	26
3.3.1 Naměřené úrovně vyzářovaného rušení po vedení.....	27
3.3.2 Naměřené úrovně vyzářovaného rušení šířícího se zářením.....	28
3.4 ZKOUŠKA ODOLNOSTI ELEKTROSTATICKÝM VÝBOJEM ESD.....	30
4 ZÁVĚR.....	31
4.1 ZHODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	31
4.2 ZHODNOCENÍ ZKOUŠEK EMC NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	31
4.3 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ.....	32
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	33

PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A1 – NÁVRH DPS A ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK - HORNÍ STRANA	1
PŘÍLOHA 2 – NÁVRH DPS A ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK - HORNÍ STRANA	1
PŘÍLOHA A3 – ELEKTRICKÉ SCHÉMA NAVRŽENÉ VÝVOJOVÉ DESKY	2

Úvod

Tato práce je zaměřena na problematiku EMC při návrhu mikropočítače. Návrh se soustředí na vývojový kit s mikroprocesorem Atmega16A, který disponuje řadou periferních obvodů a obvody pro sériovou komunikaci. Celý kit je samozřejmě navržen tak, aby nehrozilo ovlivnění jeho funkce v případě jeho vystavení silnému rušení a byl tak z hlediska EMC zcela vyhovující.

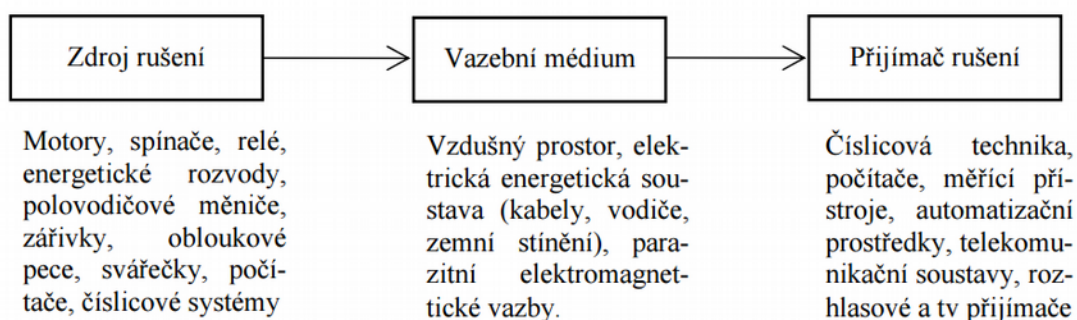
Text je rozdělen do tří částí, první je zaměřena na problematiku EMC, druhá se věnuje úpravám konstrukce mikropočítačů vedoucích ke zlepšení vlastností EMC. Třetí část se věnuje ověření navržené konstrukce mikropočítače měřeními.

Seznam symbolů a zkratk

EMC	- elektromagnetická kompatibilita (ElectroMagnetic Compatibility)
EMI	- elektromagnetické vyzařování (ElectroMagnetic Interference)
EMS	- elektromagnetická odolnost (ElectroMagnetic Susceptibility)
DPS	- deska plošných spojů
vf	- vysokofrekvenční
nf	- nízkofrekvenční
ESD	- elektrostatický výboj (ElectroStatic Discharge)
GND	- zemnění (GrouND)
THT	- technologie montáže součástek (Through-Hole Technology)
SMT	- technologie montáže součástek (Surface-Mount Technology)
I/O	- vstupní/výstupní (In/Out)
Burst	- shluk skupiny impulsů
DP	- dolní propust
HP	- horní propust
LCD	- displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
UART	- asynchronní sériové rozhraní (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)
EFT	- rychlé transientní signály (Electrical Fast Transient)

1 EMC

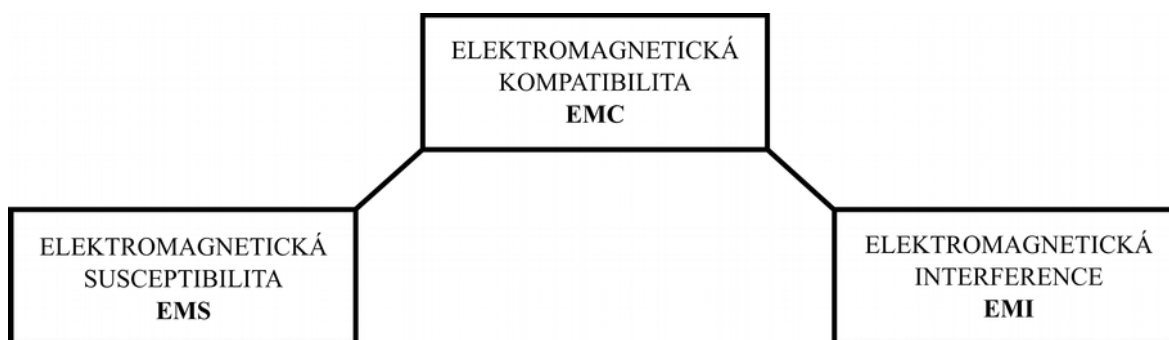
Elektromagnetická kompatibilita EMC je schopnost elektrických zařízení nebo systémů správně fungovat v elektromagnetickém prostředí, které je vytvářeno jinými zdroji elektromagnetického signálu, ať umělými nebo přírodními. Zároveň elektrické zařízení nebo systémy nesmí takové elektromagnetické rušení jakýmkoli způsobem vyzařovat.



Obr. 1.1: Obecný řetězec EMC [1].

1.1 Rozdělení oboru EMC

Celou problematiku EMC můžeme rozdělit do dvou skupin podle požadavků na zařízení či systém. Na elektromagnetickou interferenci (rušení) EMI a na elektromagnetickou susceptibilitu (odolnost) EMS.



Obr.1.2: Základní rozdělení oboru EMC.

1.1.1 Elektromagnetická susceptibilita – odolnost

Elektromagnetická susceptibilita EMS nebo také odolnost rušeného objektu je vlastnost systému pracovat bez poruch při vystavení systému elektromagnetickému rušení. EMS se na rozdíl od EMI neměří ale testuje. Systém, u kterého jsou předem známá funkční kritéria, se podrobí sérii EMC testů, např. odolnost proti elektrostatickému výboji, elektrostatickému poli, skupině impulsů (burstů), atd.. Na základě chování systému při těchto testech se vyhodnocují výsledky testování. Při testování může dojít ke změně funkce nebo ztrátě funkce. Tyto změny rozdělíme do čtyř skupin:

- Normální funkce.
- Ztráta funkce - vyvolání resetu systému.
- Ztráta funkce – systém se sám bez pomoci obsluhy nedokáže uvést do normální funkce.
- Ztráta funkce – systém nejde v žádném případě uvést do stavu normální funkce. Tento stav se vyhodnocuje jako destrukce zařízení..

EMS se tedy zabývá vlivem dopadu elektromagnetického rušení na rušený objekt a jde tedy o snahu minimalizace tohoto dopadu.

1.1.2 Elektromagnetická interference – vyzařování

Elektromagnetická interference (zkráceně EMI) je proces, při kterém zdroj vyzařuje elektromagnetické záření, které se přes přenosové prostředí šíří k ostatním zařízením. Frekvenční spektrum tohoto záření může začínat na 0 Hz a může končit ve stovkách GHz. V technických zdrojích mohou za vznik tohoto rušení rychlé změny proudu, zejména ve spínaných obvodech nebo číslicových obvodech. EMI se věnuje především identifikaci zdrojů rušení, jeho přenosové cesty a minimalizaci tohoto rušení. EMI tedy zkráceně popisuje typy rušení a jeho měření.

1.2 Druhy norem o EMC

V oblasti EMC se rozlišují tři druhy norem:

- základní normy (*Basic Standards*)
- všeobecné normy (*Generic Standards*)
- normy výrobků (*Product Standards*)

Základní normy- definují obecný problém EMC. Stanovují základní všeobecná pravidla a metody pro testování libovolného zařízení. Oproti normě výrobků nestanovují příslušné meze EMC pro dané typy zařízení. Jsou zaměřeny na:

- terminologii
- prostředí
- nízkofrekvenční a vysokofrekvenční vyzařování a odolnost
- impulsní odolnost

Všeobecné normy- jsou vztaženy na jednotlivá prostředí a určují minimální požadavky a testovací metody pro výrobky nebo systémy pracující v těchto prostředích. Tyto normy jsou základem hodnocení EMC všech zařízení. Všeobecné normy se při popisu zkoušek a jejich metod odvolávají na normy základní. Jsou zaměřeny na:

- prostory obytné, obchodní a lehkého průmyslu
- průmyslové prostředí
- vyzařování (harmonické, vf rušení po vedení i polem)
- odolnost (elektrostatické výboj, rychlé napěťové jevy, vysokofrekvenční rušení po vedení i polem)

Normy výrobků- jsou to normy předepisující požadavky úrovní rušení a obvykle i odolnosti proti němu na zařízení všech typů. Jsou zaměřeny na:

- domácí spotřebiče (nízkofrekvenční a vysokofrekvenční rušení)
- průmyslová, vědecká a lékařská zařízení (vf rušení)
- motorová vozidla a zařízení se zážehovými motory (vf rušení)
- rozhlasové a televizní přijímače (vf rušení a odolnost)
- elektrické motory- elektrické nářadí a podobně (vf rušení)
- zařízení informační techniky (vf rušení a odolnost)

1.3 Základní pojmy EMC

Jak již bylo uvedeno, každé zařízení může elektromagnetické rušení vyzařovat, ale také může být elektromagnetickým rušením ovlivňováno. Aby navrhovaná zařízení mohla správně pracovat v tomto elektromagnetickém prostředí, musí při návrhu splňovat následující meze, které jsou interpretovány normami. Použití a interpretace základních definic a pojmů předepisuje norma ČSN IEC 1000-1-1.

Elektromagnetické rušení

Jakýkoli elektromagnetický jev, který svou existencí může ovlivňovat technický přístroj, zařízení nebo systém a nebo negativně působit na biologický systém.

Odrušení

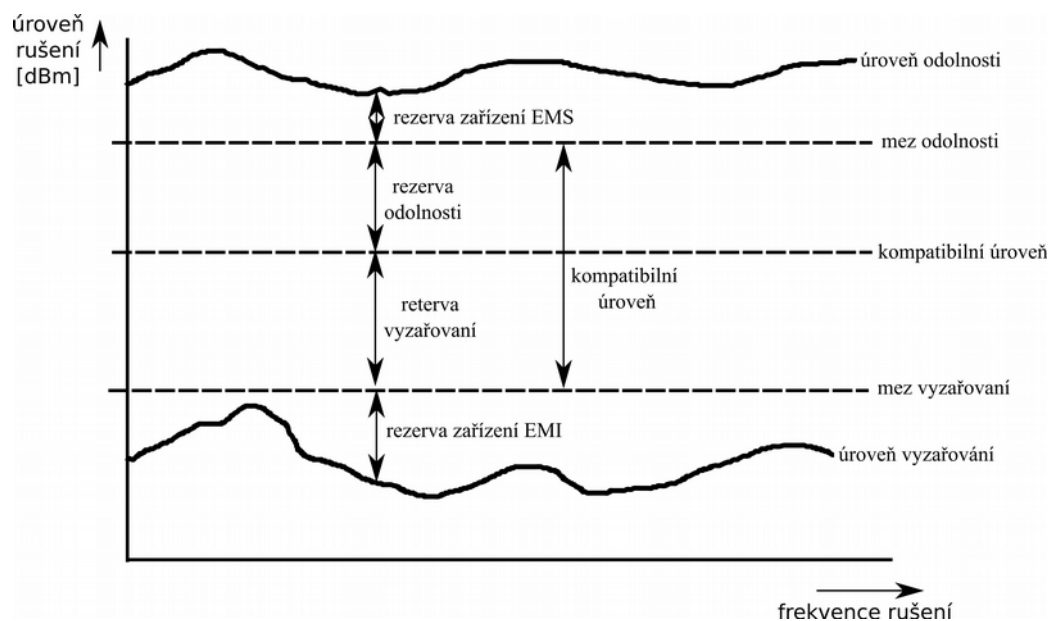
Je to opatření nutné k tomu, aby dané zařízení splňovalo požadavky z hlediska EMI, za kterou je do značné míry odpovědná samotná funkce komponentů zařízení i při dodržení pravidel při návrhu DPS zařízení.

Úroveň vyzařování

Úroveň rušení, které je produktem samotného zdroje rušení, musí být měřeno podle patřičných norem pro EMI. Úroveň rušení je měřena v dB v závislosti na frekvenci tohoto rušení. Úroveň vyzařování nesmí překročit mezní hodnotu vyzařování, která jsou pro každé zařízení předepsaná obecnou normou.

Úroveň odolnosti

Úroveň odolnosti je maximální přípustná úroveň elektromagnetického rušení působící na konkrétní zařízení nebo systém, při kterém nedojde ke zhoršení funkce provozu. Při překročení této úrovně může dojít ke ztrátě funkce. V krajních případech také k destrukci zařízení.



Obr. 1.3: Zobrazení jednotlivých úrovní pro splnění pravidel EMC

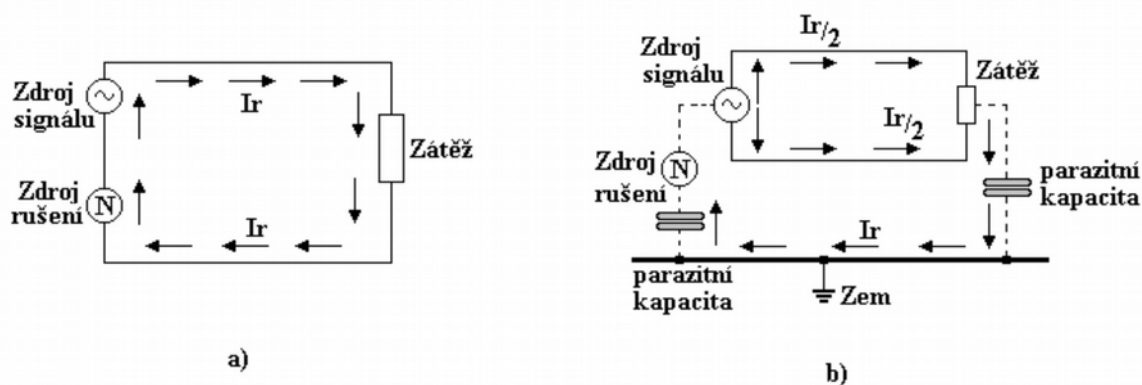
Meze odolnosti a vyzařování musí mít mezi sebou určitou rezervu, nazývanou rezervou EMC, pro dodržení správné funkce zařízení nacházejících se v elektromagnetickém prostředí. Zvýšení této rezervy může do jisté míry ovlivnit bezpečnost funkce zařízení. Jak úroveň odolnosti, tak ani úroveň vyzařování nesmí překročit svou mez ke splnění norem o EMC. Tyto rozdíly mezi jednotlivými úrovněmi a mezemi se označují jako rezervy návrhu zařízení z hlediska EMI a EMS. Velikost těchto rezerv určují jak kvalitu zařízení z hlediska EMC, tak i cenu zařízení. Dostatečně velká rezerva je zárukou vyhovění zkouškám EMC, ale stojí za ní zvýšení ceny produktu způsobené použitím kvalitnějších komponentů a lepšího stínění. Naopak nedostatečně velká rezerva může zapříčinit nevyhovění zkouškám EMC, a tím zařízení nedostane certifikaci potřebnou pro uvedení výrobku na trh. U takového produktu je poté nutné dodatečné odrušení, které může být finančně a časově náročnější než předešlá varianta. Proto by se už v samotném návrhu mělo uvažovat o budoucích problémech při certifikaci a vyvarování se tak zvýšení budoucích nákladů, které souvisejí se zpožděním uvedení výrobku na trh.

1.4 Druhy elektromagnetického rušení

Elektromagnetické rušení generované zdroji rušení můžeme dělit podle několika kritérií. Podle časového průběhu rušení, jeho frekvence, šířky pásma a symetrie rušení.

Z hlediska šířky pásma bychom tak mohli rušení dělit na širokopásmové a úzkopásmové. Úzkopásmová rušení jsou produktem zejména radiových vysílačů. Širokopásmová rušení jsou prakticky všechna přírodní rušení a jakákoli průmyslová rušení.

Podle polohy v kmitočtovém spektru můžeme rušení rozdělit na nízkofrekvenční do zhruba 10 kHz a vysokofrekvenční (radiové) v rozsahu od 10kHz až do stovek GHz.



Obr. 1.4: Rozdělení rušení z hlediska symetrie - a) symetrické rušení, b) nesymetrické rušení.

Rozdělení podle charakteru průběhu:

šum – značí se písmenem N podle anglického slova *noise*. Je to spojitý rušivý signál, který svým účinkem negativně ovlivňuje průběh napětí rušeného signálu. Podle poměru velikosti šumu a užitečného signálu je výsledný signál znehodnocen (tzv. odstup signál/šum). Je to náhodný, obvykle periodický signál, který se může nacházet ve velkém kmitočtovém rozsahu. Zdrojů šumu může být nepřehlédnutelné množství od parazitního produktu samotných elektronických součástek až například po klasické svářečky.

impulsy- značí se zkratkou S z anglického *spikes*. Na rozdíl od šumu jsou to jednorázové napěťové špičky trvající velmi krátký interval. Na rušený signál se superponují a výsledný signál má tak velké kladné či záporné špičky. Například při superponaci těchto impulsů na napájecí napětí určitého systému mohou mít výsledné špičky napájecího napětí devastující účinky na tento systém při absenci nebo nevhodné ochraně systému.

přechodné jevy- značí se T podle anglického *transients*. Jsou to jednorázové děje zřetelné v obálce křivky napětí. Jsou vyvolány změnou zatížení rozvodné sítě a mohou trvat od několika milisekund až po jednotky sekund.

1.5 Zdroje rušení

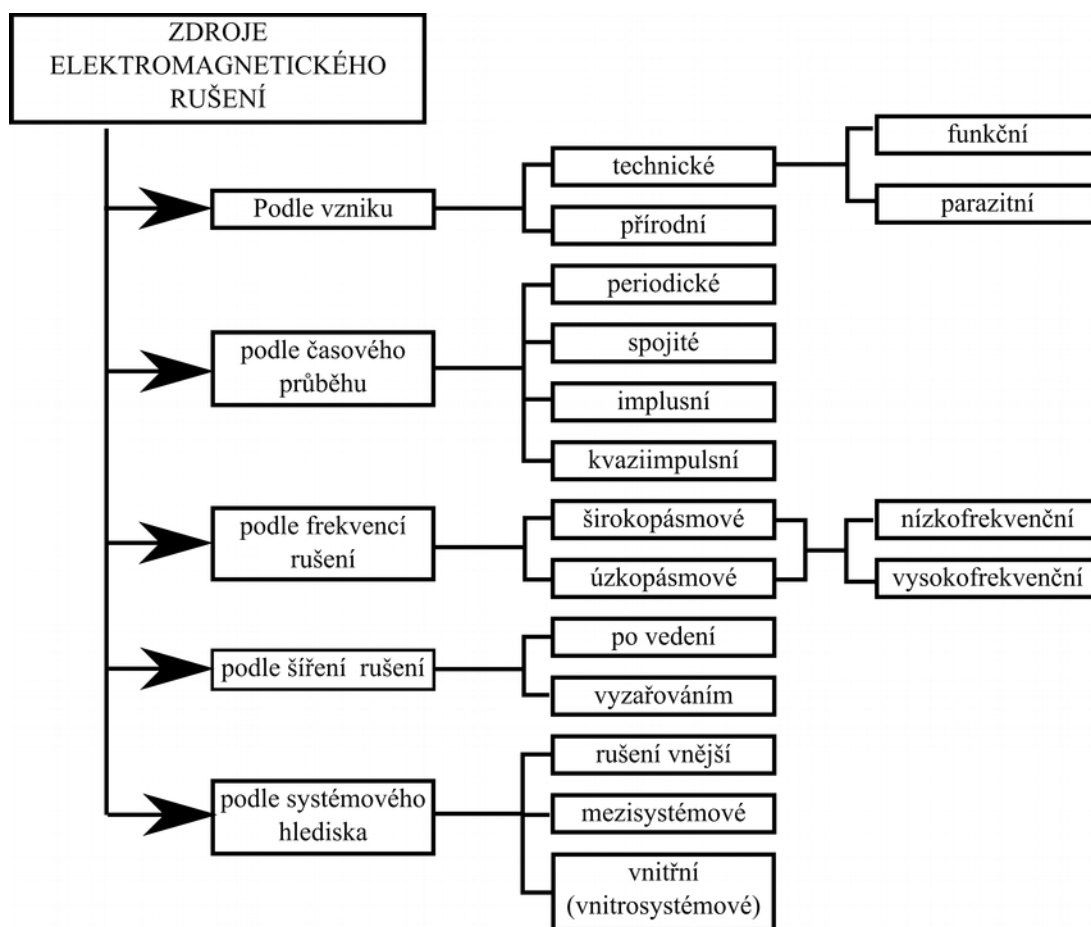
Každý zdroj elektromagnetického rušení lze brát i jako přijímač rušení. Zde se ale zaměříme na systémy, kde převládá jejich rušivá vlastnost pro ostatní systémy a můžeme je tedy brát jako zdroje rušení. Zdroje rušení můžeme dělit dle mnoha různých hledisek (viz. Obr. 1.5).

Všechny interferenční zdroje můžeme rozdělit na **přírodní** nebo **technické**. Pod pojmem přírodní zdroje rušení si můžeme představit například různé atmosférické jevy, rušení vzniklé sluneční aktivitou, blesky, atd.. Z vypsaných příkladů je patrné, že přírodní zdroje rušení nelze ovlivnit, a tak se musíme soustředit alespoň na minimalizaci jejich důsledků adekvátními ochranami. Jako technické zdroje rušení můžeme zařadit všechny ostatní, které vznikly lidskou činností. Zde můžeme posuzovat rušení jako funkční,

to je rušení, které je produktem funkce nějakého systému (antény, radary, navigační systémy), nebo rušení parazitní, které vzniká jako parazitní produkt při funkci zařízení.

Z časového průběhu můžeme rušení dělit na **periodické** (rušící vyšší harmonické funkčních signálů), **spojité** (taktovací frekvence číslicových obvodů, radiové a televizní vysílače), **impulsní** (vzniklé elektrostatickými výboji, spojování/rozpojování mechanických kontaktů, blesk), **kvaziimpulsní** rušení (superpozice spojitého a impulsního rušení – u polovodičových měničů).

Z hlediska frekvenčního pásma jsou rušení širokopásmová a úzkopásmová. Mezi úzkopásmová rušení můžeme řadit funkční rušení radiových nebo televizních vysílačů. Mezi širokopásmová můžeme řadit většinu průmyslového rušení, které může mít jakýkoliv časový průběh z výše zmíněných. Vyšší harmonické takovýchto signálů mohou dosahovat i jednotek GHz.



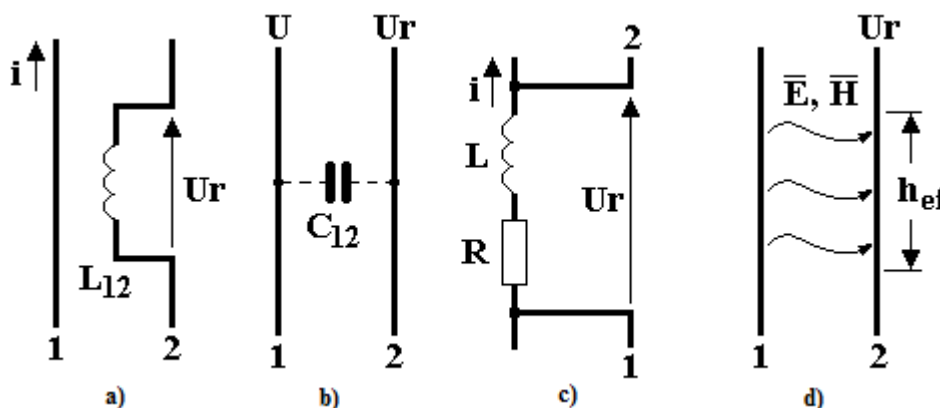
Obr.1.5: Rozdělení interferenčních zdrojů rušení.

1.6 Typy vzájemných vazeb

Elektromagnetické rušení se k rušenému systému může šířit dvěma způsoby:

-**po vodičích**- systém může být ovlivněn rušením, které se k němu dostane prostřednictvím vodičů, ať napájecími nebo datovými. Aby jsme tomuto ovlivňování systému předešli, musíme vstupy zařízení dobře zabezpečit, například vhodnou filtrací nebo galvanickým oddělením.

-prostorovým šířením elektromagnetického pole- tento druh šíření není zdaleka tak významný jako šíření po vodičích, jelikož většina zařízení je stíněna kovovými šasi, které jsou uzemněny. Stínění minimalizuje jak vliv rušení na zařízení, tak i emisi rušení.



Obr.1.6: Zobrazení základních vazeb mezi dvěma vodiči a) induktivní vazba b) kapacitní vazba c) galvanická vazba d) vazba elektromagnetickým polem.

1.6.1 Induktivní vazba

Induktivní vazba je typická pro galvanicky oddělené smyčky. Smyčkou musí protékat časově proměnný proud, který v okolí vytváří časově proměnlivé magnetické pole, které následně indukuje do ostatních smyček v okolí rušivé napětí. Velikost rušení je pak závislé na velikosti a strmosti změn proudu v rušícím obvodu, vzdáleností obvodů od sebe a prostředím, ve kterém jsou vázané obvody. Typickým příkladem induktivní vazby je transformátor, kde je tato vazba žádaná. Pro jednoduchou ukázkou lze uvést příklad, kdy dva vodiče ležící vedle sebe mají na dané vzdálenosti vzájemnou indukčnost $1 \mu\text{H}$. Řekněme, že jeden je napájecí vodič a druhý datový. V napájecím vodiči dojde k rychlé změně proudu z 1A na 5A za $1 \mu\text{s}$. Po dosazení do vztahu (1.1) dostaneme velikost indukovaného napětí do rušeného vodiče $U_r = 4\text{V}$. Taková velikost rušivého napětí může pro datový vodič znamenat chybné přenesení dat.

$$U_r = M \cdot \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} \right) \quad [\text{V}] \quad (1.1)$$

1.6.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká mezi vodiči, které jsou galvanicky oddělené a jsou svázány působením jednotlivých vektorů intenzit elektrostatického pole. Velikost kapacitní vazby je opět závislá na vzájemné vzdálenosti vodičů, dielektrickými vlastnostmi prostředí, ve kterém se vodiče nacházejí (například dva vodiče visící ve vzduchu oddělené vzduchovou mezerou nebo dva vodiče v jednom kabelu oddělené izolací). Účinky kapacitní vazby lze také zmenšit velikostí a rychlostí změn napětí v rušícím vodiči. Pro zjednodušení je opět vhodné si uvést jednoduchý příklad dvou vodičů, mezi kterými je parazitní kapacitní vazba velikosti 10 pF a v rušícím vodiči dojde k rychlé změně velikosti napětí 300V trvajícím 500ns . Z jednoduchého vztahu lze vypočítat vzniklý proud rušeným vodičem po dosazení těchto hodnot do vztahu (1.2). Z výpočtu dostaneme hodnotu proudu $I_r = 6 \mu\text{A}$.

$$I_r = C \cdot \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} \right) \quad [\text{V}] \quad (1.2)$$

1.6.3 Galvanická vazba

Galvanická vazba je spojení elektrotechnických zařízení způsobem, že existuje jeden nebo více společných vodičů spojujících tato zařízení. To jsou většinou vodiče napájecí nebo zemnicí. Prostřednictvím těchto vodičů dochází k ovlivňování propojených zařízení. Tyto vodiče můžeme brát jako impedance, které mají většinou charakter sériového obvodu RL. Společnou impedanci pak tečou proudy všech takto propojených zařízení. Takže napětí vyvolané průchodem proudem RC (Obr.1.5 c), působí jako rušení pro ostatní bloky. Pro nízké kmitočty je složka L obvodu RL zanedbatelná, a tak je i rušivé napětí rovné jen úbytku na parazitním odporu R průchodem proudem I . Hodnotu rušivého napětí lze určit ze vztahu (1.3).

$$U_r = R \cdot \Delta I + L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [\text{V}] \quad (1.3)$$

1.6.4 Vazba elektromagnetickým polem

Tato vazba je typická pro galvanicky oddělené systémy. K rušení obvodů dochází prostřednictvím elektromagnetické energie vyzářené zdrojem rušení a následného indukovaní elektromagnetického rušení do rušeného zařízení. Minimalizace této vazby je možná jen vhodným stíněním zdrojů a přijímačů rušení. Hodnota rušivého pole je závislá na vzájemné vzdálenosti zdroje a přijímače rušení. S rostoucí vzdáleností bude intenzita elektrického pole (E_x) klesat a tím i hodnota výsledného rušení. Hodnota E_x lze určit ze vztahu 1.4, kde P je výkon vyzářeného signálu a x je vzdálenost od zdroje vysílání. Zároveň záleží na efektivní délce antény (l_{ef}) přijímače. Jako anténu si můžeme představit například vodiče na rušeném zařízení, na které se indukuje rušivé napětí. Naindukovaná velikost rušeného napětí je uvedena ve vztahu 1.5.

$$E_x = 0,3 \frac{\sqrt{P}}{x} \quad [\text{V/m}] \quad (1.4)$$

$$U_r = E_x \cdot l_{ef} \quad [\text{V}] \quad (1.5)$$

2 Minimalizace účinků rušení a vyzařování úpravou konstrukce mikropočítače

S ohledem na EMC řetězec lze vazbu zařízení ovlivnit ve třech bodech řetězce. Hned u samotného zdroje rušení, v přenosové cestě nebo u ovlivňovaného zařízení. S pohledem na tuto situaci je nejjednodušší minimalizovat úroveň generovaného rušení samotného zdroje, než minimalizovat dopad rušení každého zařízení v dosahu zdroje EMI. Toto pravidlo však neplatí vždy. Například v situaci, kdy signál rušivý pro ostatní zařízení je zároveň signálem užitečným, nezbyvá nic jiného, než minimalizovat dopad tohoto rušení na rušený objekt. Hned u samotného návrhu zařízení bychom tedy měli brát zřetel na konstrukci a návrh zařízení a tím co nejvíce minimalizovat EMI. Odolnost proti rušení a zároveň nevyzařování rušení při samotném návrhu nelze separovat. Můžeme to tedy brát jako komplexní činnost, začínající již při blokovém návrhu celého zařízení. Jako základní pravidla při návrhu zařízení z hlediska EMC patří:

-Minimalizace hodnot proudů - maximální hodnoty proudů lze ve výsledku minimalizovat jen správnou volbou obvodů, respektive jejich vstupními impedancemi.

-Minimalizace proudových smyček je nejdůležitější bod z hlediska EMI i EMS. Zbytečně velké proudové smyčky můžeme eliminovat u samotného návrhu DPS, kde je nutné vhodné uspořádání součástek vedoucí

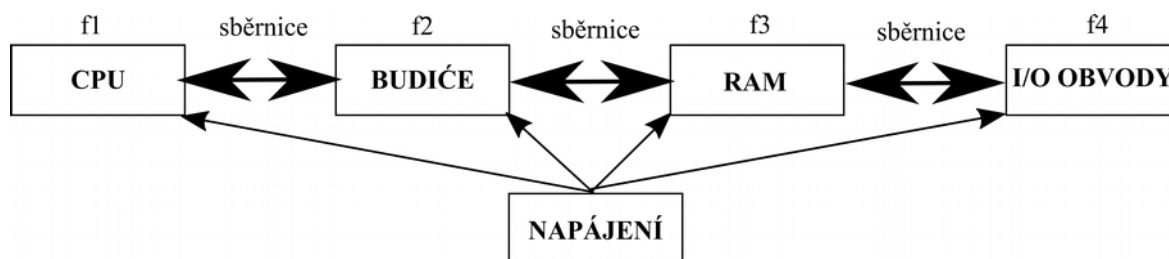
ke zmenšení délek spojů a zároveň vhodné vedení vodičů co nejbliže u sebe, aby uzavíraly pokud možno, co nejmenší plochu.

-Minimalizace kmitočtového spektra zbytečně rychlé obvody nebo používání rychlé datové sběrnice nám může přispět k vyšší úrovni vyzařovaného rušení, kde vyšší rychlost znamená větší rušení. Proto musíme volit alternativu mezi rychlostí a výkonem daného zařízení a jeho přípustnou hodnotou vyzařovaného rušení.

-Filtrace a ochrana vstupů a výstupů – vhodnou ochranou a filtrací zvýšíme odolnost zařízení proti ESD, které může mít pro zařízení i destruktivní charakter a zároveň omezíme případné vyzařování do vedení.

2.1 Volba a rozmístění součástek

Rozmístění součástek je při návrhu DPS klíčové. Při samotném rozmyšlení rozmístění součástek a návrhu spojů už musíme vybrat správnou metodu zemnění, kterou budeme používat a nejefektivnější rozmístění samotných součástek vedoucí k minimalizaci proudových smyček (viz. dále). Při rozmístování je vhodné se řídit pravidlem a tedy řadit bloky od vyšší rychlosti (frekvence) postupně k nižším rychlostem. Při návrhu bychom měli také počítat s fyzickou separací jednotlivých bloků (analogový, digitální, napájecí, I/O obvody atd.).



Obr.2.1: Řazení bloků podle frekvence – $f_1 > f_2 > f_3 > f_4$

2.1.1 Parazitní vlastnosti součástek

Při používání jednotlivých elektrických komponentů musíme uvažovat i jejich parazitní vlastnosti, které můžeme do jisté míry ovlivnit (typ součástek, použité pouzdra, atd.). Proto bychom měli upřednostňovat SMT před THT součástkami, kde větší přívody součástek znamenají větší parazitní indukčnost a parazitní elektrický odpor.

Rezistor- je jeden z nejvíce používaným komponentem na DPS vůbec. Rezistor může do jisté míry také ovlivnit vlastnosti DPS z pohledu EMI. Záleží na použitém materiálu rezistoru (metalické rezistory, drátové, uhlíkové atd.) a na frekvenční oblasti jeho použití. Drátové rezistory nejsou vhodné pro vysokofrekvenční aplikace, kvůli parazitní indukčnosti použitého drátu. Tenkovrstvé uhlíkové rezistory také vykazují parazitní indukčnost pro vysokofrekvenční aplikace, ale pro její velikost je tato indukčnost zanedbatelná. Běžně přehlédnutelný aspekt u rezistorů je také parazitní kapacita, která existuje mezi jeho vývody. Parazitní kapacita může zapříčinit chybnou funkci zařízení v aplikacích v oblasti GHz. Pro většinu aplikací tak není parazitní kapacita podstatná.

Jeden z problémů u používání rezistorů je také přepětové namáhání. Jestliže je rezistor pro povrchovou montáž vystaven ESD, může dojít k elektrickému oblouku nebo k jeho zničení.

Kondenzátor- je hojně používanou součástí pro filtraci, blokování a řadu dalších využití.

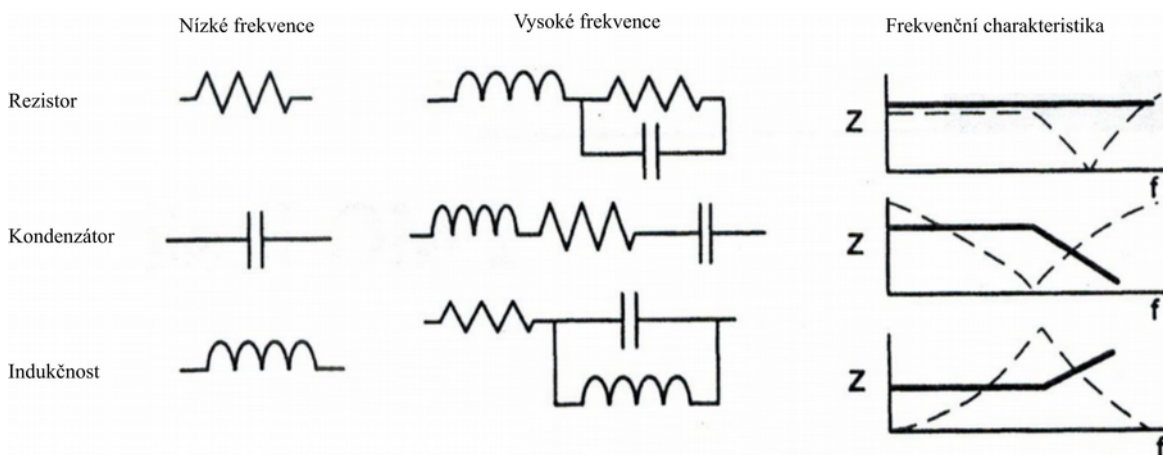
Ze vztahu (2.1) lze vypočítat kapacitní reaktanci. Pro názorný příklad mějme elektrolytický kondenzátor velikosti $10\mu\text{F}$, který má kapacitní reaktanci $1,6\Omega$ při 10kHz , která klesá na $160\mu\Omega$ při 100MHz . Tím vznikne zkrat, který přispívá k potlačení EMI. Nicméně sériová parazitní indukčnost a sériová rezistivita, které jsou zapříčiněné parazitními vlastnostmi přívodů, ovlivňují vlastní rezonanční kmitočet kondenzátoru. Zmíněný kondenzátor je tím určen pro frekvence v oblasti stovek kHz až jednotek MHz. Při překročení této hodnoty kondenzátor nabývá induktivního charakteru, proto s rostoucí frekvencí dochází k nechtěnému zvyšování reaktance.

$$X_C = 1/(2\pi fC) \quad (2.1)$$

Indukčnost- je používána na DPS pro minimalizaci EMI. Využívá se induktivní reaktance popsána vztahem (2.2), kde je ze vztahu patrná lineární závislost na frekvenci. Pro znázornění je uveden příklad ideální indukčnosti velikosti 10mH , která má při frekvenci 10kHz reaktanci 628Ω . Tato reaktance vzroste na $6,2\text{M}\Omega$ na frekvenci 100MHz , což představuje otevřený obvod - okruh. Stejně jako ostatní součástky má ale indukčnost také své parazitní vlastnosti. Nejvíce se projevuje parazitní kapacita mezi vinutími. To povede k poklesu reaktance se zvyšujícími se kmitočty. To limituje opět použití zmíněné indukčnosti v kmitočtech v oblasti desítek MHz.

Nastává tedy otázka, co dělat při vysokých kmitočtech. Řešením mohou být feritové slitiny ze železa a magnesia nebo železa a niklu. Tyto materiály mají výborné vlastnosti, které umožňují pracovat v oblasti vysokých frekvencí a poskytují vysokou impedanci při minimální parazitní kapacitě mezi závity vinutí. Proto jsou feritové materiály používány ve spojení s vysokofrekvenčními aplikacemi. Při nízkých kmitočtech se chovají jako obvyklá indukce a při vysokých jsou v podstatě frekvenčně závislými reaktancemi.

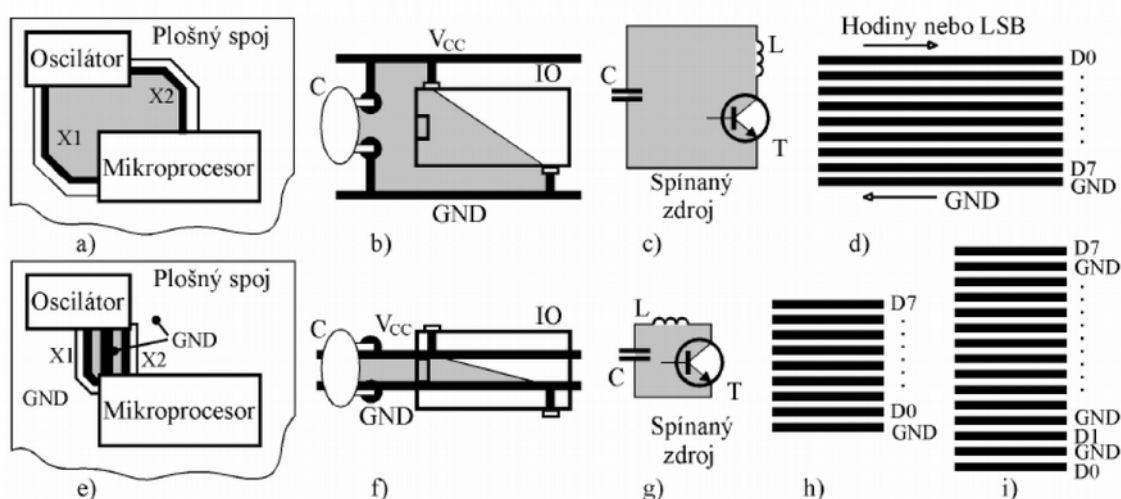
$$X_L = 2\pi fL \quad (2.2)$$



Obr. 2.2: Náhradní schéma součástek v nízkofrekvenčních a vysokofrekvenčních obvodech a jejich závislost impedance na frekvenci (souvislá čára – chování v nízkofrekvenčních aplikacích, čárkovaná čára – chování ve vysokofrekvenčních aplikacích) [3].

2.1.2 Minimalizace ploch proudových smyček

Při návrhu DPS lze udělat možná největší chybu z hlediska EMI a EMS při rozmístování součástek a volbě jejich pouzder. Každý centimetr spoje znamená nárůst parazitní indukčnosti přibližně o 10nH/cm (vodič o šířce 0,3 mm a tloušťce mědi 45μm). Při návrhu desky, kde špatně volíme rozmístění součástek, tak můžeme negativně ovlivnit vyzařování rušení vlivem parazitní indukčnosti. Zároveň při zbytečně velkých rozstupech součástek a špatném řešení vedení spojů způsobíme nechtěné zvětšení proudových smyček, které dělá zařízení citlivější na okolní rušení a zvyšuje interferenci rušení. Proudová smyčka zde totiž bude zvyšovat induktivní vazbu s okolím a bude se chovat jako anténa.



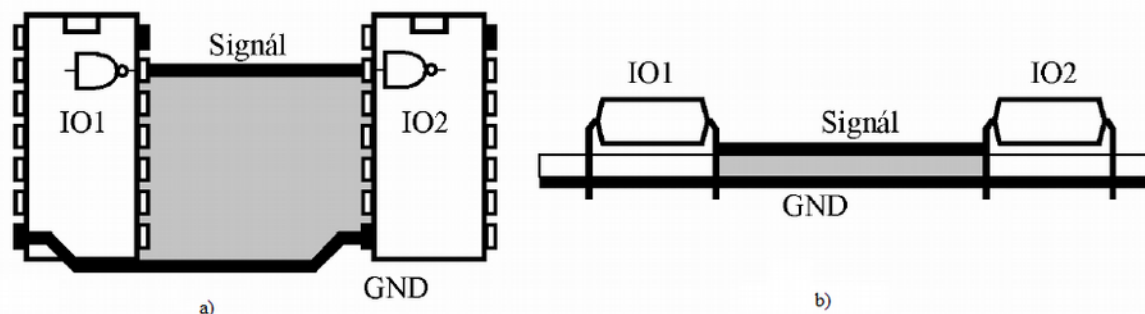
Obr. 2.3: Příklady návrhových chyb (a,b,c,d) a jejich oprava vedoucí ke zmenšení plochy proudové smyčky (e,f,g,h,i) [3]

Minimalizace proudové smyčky je tím důležitější, čím rychlejší obvody propojuje a čím větší napěťové úrovně jsou používány, což je patrné ze vztahu (2.3). U integrovaných obvodů se docílí snížení proudové smyčky tím, že jsou napájecí vývody vždy vyvedeny v bezprostřední blízkosti. Na obrázku 2.3 je porovnání několika způsobů propojení jednotlivých součástek a možná minimalizace jejich proudových smyček. U prvních čtyř obrázků (a,b,c,d) lze vidět největší chyby vedoucí k nárůstu proudové smyčky. Zatímco u prvních dvou případů nám stačí k opravě pouze úprava vedení spojů, u obrázku c) je již nutné upravit rozmístění jednotlivých součástek vedoucí ke zkrácení spojů. Při návrhu sběrnice je nutné myslet na to, že nejčastější změny logických stavů probíhají na nejméně významném bitu (LSB), vedle kterého je tak neefektivnější umístit vodič GND. Pokud to situace (hlavně prostor na DPS) umožňuje, je lepší z hlediska EMI umístit vodič GND vedle každého datového vodiče D0-D7 (varianta i).

$$U = L \cdot \left(\frac{\Delta I}{\Delta t} \right) \quad (2.3)$$

Možnost minimalizace proudových smyček je i při použití vodivé plochy GND (tzv. rozlité měď) v jedné z vrstev DPS. Jednotlivé součástky je pak možné uzemnit přes tuto vrstvu a proudová smyčka tak uzavírá v ideálním případě jen plochu rovnou tloušťce DPS vynásobenou vzdáleností součástek. Vodivá

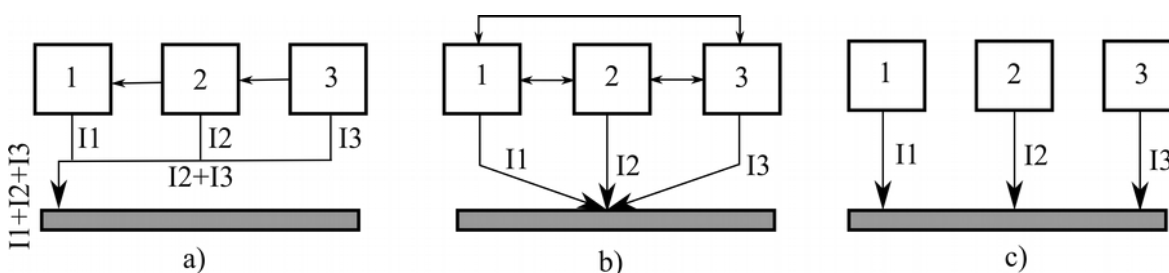
plocha GND může při správném provedení snížit parazitní indukčnost spojů až o 50%. Pro co největší přiblížení k ideálnímu případu je tak vhodné neumísťovat například THT součástky mezi takto propojené součástky, kde mezi vývody THT součástky nemůže být spojení vodivé plochy GND, a tím musí proud „obtékat“ tuto součástku, což opět vede ke zvýšení parazitní indukčnosti. Dobré není ani rozdělování vodivé plochy datovými vodiči, když to situace nutně nevyžaduje.



Obr. 2.4: Příklad použití vodivé plochy GND ve druhé vrstvě DPS a zmenšení proudové smyčky. [2]

2.2 Zemnění

Při samotném rozmísťování a návrhu spojů součástek musíme vybrat metodu zemnění. Typ zemnění vybíráme podle vlastností obvodu. Na obrázku 2.5 jsou uvedeny možnosti zemnění. Pod každým zemnicím vodičem si však musíme představit parazitní indukčnost narůstající s jeho délkou.



Obr. 2.5: Možnosti zemnění a velikosti proudů jednotlivých bloků a) jednobodové sériové b) jednobodové paralelní c) vícebodové.

2.2.1 Jednobodové zemnění

Tato metoda zemnění se používá převážně u aplikacích, u kterých pracovní kmitočet nepřesahuje 1 MHz. Jednobodové zemnění lze dělit na sériové nebo paralelní.

Sériové spojení se používá při situaci, kdy signál je postupně zpracováván bloky 3-2-1 a úrovně jednotlivých proudů jsou vzestupné (3-nejmenší a 1-největší). Tuto situaci si jde nejlépe představit u výkonového audio zesilovače, kde blok 3 je předzesilovač, 2 zpracování signálu, 1 výkonový koncový stupeň.

Paralelní zapojení použijeme v opačném případě, kdy proudové odběry jednotlivých bloků jsou takřka srovnatelné a všechny bloky jsou navzájem propojené signály stejných úrovní.

2.2.2 Vícebodové zemnění

Vícebodové zemnění je použito u vysokofrekvenčních aplikací, tedy zejména pro číslicové obvody. Pro tuto metodu je vhodné použít v jedné z vrstev DPS souvislou vrstvu GND. Jak bylo zmíněno, je nutné tuto vrstvu co nejméně přerušovat. Každý blok či součástka pak mohou být hned u vývodu uzemněny, a tím je zajištěno co nejkratší propojení bloků.

2.3 Blokování napájení

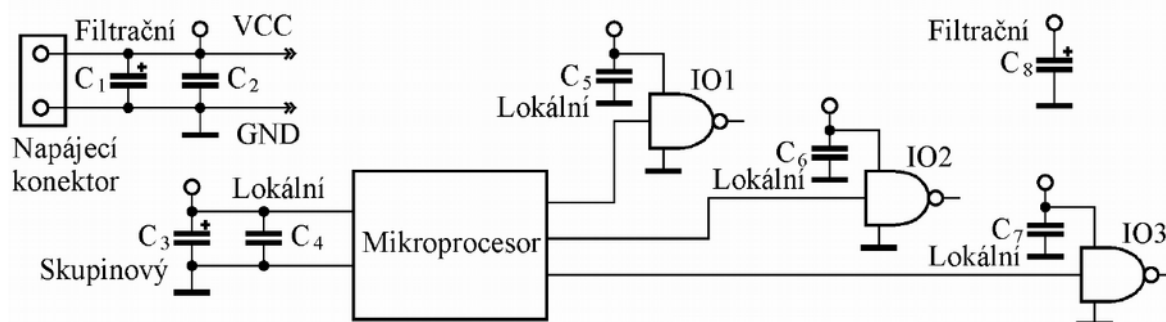
Při návrhu elektrického schématu zařízení musíme počítat s použitím blokovacích kondenzátorů u všech logických součástek, které jakýmkoli způsobem vykazují impulsní spotřebu (relé, klopný obvod, atd.). Správné blokování může výrazně snížit hodnotu vyzařovaného rušení. Při změně logického stavu obvodu například z logické 0 na logickou 1 jsou v okamžiku překlápění sepnuty oba dva výstupní tranzistory, přes který teče proud od 1 do 30 mA v závislosti na použitém typu logických obvodů. Například u typu logiky TTL je impulsní proudový odběr 16mA po dobu zhruba 8 ns. Je zřejmé, že odebíraný proud má tak charakter impulzu a při uvažování parazitní indukčnosti vodičů tak dochází k rušení. Proto bychom potřebovali zmenšit parazitní indukčnost vodičů nebo zmenšit impulzní odebíraný proud.

Odebíraný proud je dán konstrukcí součástky a můžeme ho tedy ovlivnit výběrem součástky. Parazitní indukčnost vodičů je možné zmenšit zkrácením vodičů, respektive zkrácením délky vodiče, kterou protéká impulsní proud. Z toho plyne, že bychom napájecí zdroj potřebovali co nejbliže u součástky a to je možné použitím blokovacích kondenzátorů, které poskytnou na krátkou dobu zdroj energie, a tím redukují impulsní proudy, které by jinak protékaly vodičem od zdroje napětí až k součástce. Nepoužití blokovacích kondenzátorů může způsobit dokonce nesprávnou funkci zařízení. Může dojít k nepřipustnému zvlnění napájecího napětí, hazardním stavům logických obvodů, sklonem ke kmitání u analogových částí zařízení, a tak k vyzařování rušení přes napájecí vodiče do vedení. Blokovací kondenzátory můžeme z hlediska použití dělit na lokální, skupinové a filtrační. Na obrázku 2.5 lze vidět různé typy blokovacích kondenzátorů.

Lokální- nachází se u každého logického obvodu, kde slouží jako lokální zdroj energie. Redukují tak impulsní proudy. Pro lokální blokovací kondenzátory se používají vysokofrekvenční keramické kondenzátory.

Skupinové- slouží jako zdroj energie pro několik současně se přebíjejících vstupních kapacit a zároveň vyrovnává napěťové úbytky vzniklé na parazitních indukčnostech spojů na DPS. Pro skupinové se nejčastěji používají keramické nebo tantalové kondenzátory.

Filtrační- slouží k odstranění šumu a rušení v obvodu tím, že složky rušení svedou na zem. Při rychlých změnách proudu ale slouží i jako rychlý zdroj energie, a tím eliminuje úbytky napětí na napájecích vodičích, které by způsobovaly rušení. Pro filtrační kondenzátory se používá kombinace elektrolytického kondenzátoru, který má velkou kapacitu a keramického kondenzátoru, který má dobré frekvenční vlastnosti.



Obr. 2.5: Příklad použití blokovacích kondenzátorů. [2]

Při výběru blokovacích kondenzátorů, musíme uvažovat i jejich vlastnosti (viz. parazitní vlastnosti součástek), aby nedošlo k použití kondenzátoru v obvodu s vyšší frekvencí, než je jeho rezonanční kmitočet. Rezananční kmitočet klesá s velikostí samotné kapacity kondenzátoru. Při nutném použití větší kapacity tak nastává problém s rezonančním kmitočtem takového kondenzátoru. Tento problém lze eliminovat použitím více kondenzátorů s menší kapacitou, paralelně spojených, kde se v takovém případě jejich celková kapacita bude sčítat.

Samotnou vícevrstvou desku DPS lze také použít jako blokovací kondenzát, kde ve vnitřních vrstvách vedle sebe umístíme vrstvy napájení a GND. Velikost kapacity takové desky lze vypočítat ze vztahu (2.4), kde C je celková kapacita, ϵ je permitivita vakua vynásobená permitivitou nosného materiálu DPS, S je plocha DPS a t je tloušťka desky. Velikost takového kondenzátoru se pohybuje okolo jednotek nF na decimetr čtvereční. Takový kondenzátor má vysoký rezonanční kmitočet (200-400 MHz u materiálu FR4).

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{t} \quad (2.4)$$

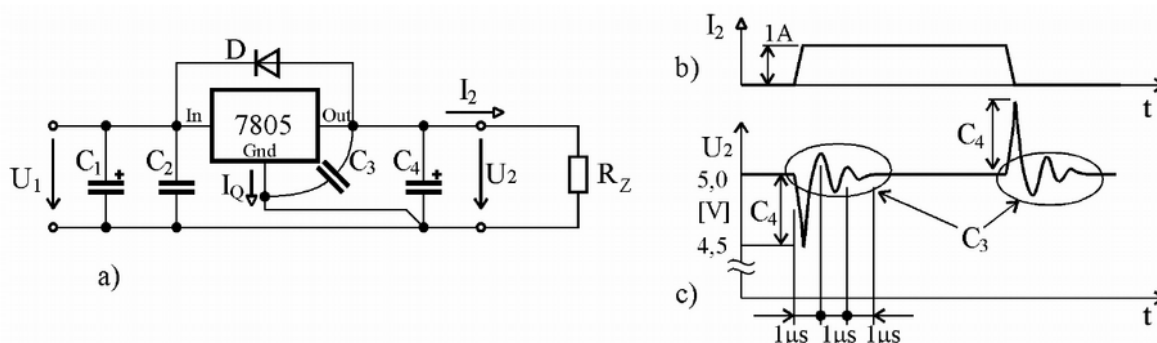
2.4 Napájecí zdroj

Při návrhu napájecího bloku zařízení bychom měli myslet na to, že tento napájecí blok je vstupní branou pro rušení, které se šíří v napájecím vedením a zároveň výstupní branou pro rušení, vzniklé funkcí zařízení a jeho šířením do napájecího vedení. Potlačit rušení přenášené z napájecího vedení nebo opačným směrem jde v zásadě dvěma způsoby. V prvním případě jde o použití odrušovacích filtrů v přívozech napájecího napětí, kde jsou použity odrušovací tlumivky a kondenzátory, LC filtry nebo přepětové ochrany. V druhém případě se používá transformátor s elektricky odstíněným primárním vinutím vůči ostatním vinutím, což vede ke zmenšení parazitní kapacity mezi napájecími vodiči a jednotlivými bloky přístroje.

2.4.1 Stabilizátory napětí

Analogové stabilizátory napětí je vhodné použít v každém napájecím bloku zařízení, k eliminaci kolísání rozváděného napětí po DPS při kolísání napětí na napájecích vodičích. Typickým představitelem analogových stabilizátorů napětí je tří-vývodový obvod 78XX nebo 79XX pro zápornou polaritu napětí, kde poslední dvě číslice určují hodnotu výstupního stabilizovaného napětí. Při použití těchto integrovaných obvodů nám tak odpadá starost se samotnou funkcí obvodu, ale je nutné tyto obvody správně zapojit s

ostatními pasivními součástkami, které minimalizují jeho negativní vlastnosti vyplývající z jejich principu funkce. Pro správnou funkci stačí stabilizátor zapojit společně s několika kondenzátory. První kondenzátor C1 se používá v případě, kdy se stabilizátor nachází dále než 20 cm od filtračního kondenzátoru usměrňovače. Nachází-li se tedy hned u usměrňovače je možné kondenzátor C1 vypustit. Kondenzátor C2 slouží pouze k eliminaci pasivní indukčnosti přívodů a jeho velikost je většinou volena podle doporučení výrobců v rozsahu 50-300 nF. Kondenzátor C3 je nutné umístit co nejbližší výstupním svorkám stabilizátoru, jelikož plní funkci frekvenční kompenzace. Jeho velikost má tedy vliv na velikost amplitudy a frekvence zámitů vzniklých při impulzním odběru. Kondenzátor C4 slouží už jen jako zdroj energie při náhlé změně proudu v okamžiku, kdy stabilizátor teprve začíná reagovat na změnu odběru výstupního proudu. U stabilizátoru můžeme použít i další pasivní součástky zajišťující jeho ochranu. Například diodu mezi vstupní a výstupní svorkou chrání stabilizátor v případě, kdy na vstupu vznikne menší napětí než na výstupu (při zkratu vstupu) a vyrovnávací proud by tekla opačným směrem, což je považováno za zakázaný stav. Použití všech popsaných prvků se může u každého stabilizátoru jiných výrobců lišit, protože mnozí výrobci se snaží tyto prvky integrovat již do samotného pouzdra.



Obr. 2.6: základní zapojení stabilizátoru napětí a), časový průběh odebíraného proudu I_2 b), reakce výstupního napětí U_2 stabilizátoru při změně zatěžovacího proudu c).

2.5 Odrušovací filtry

Ze základního řetězce EMC (Obr.1.1) je patrné, že rušení v řetězci může vzniknout dvěma způsoby. Generování rušení samotným zdrojem rušení a vstupem rušení do řetězce prostřednictvím přenosové cesty. Chceme-li zmenšit hodnotu rušení, které přijímač přijme, máme tři možnosti První je omezit hodnotu rušení opouštějící zdroj rušení nebo samotný vznik rušení v tomto zdroji. Druhá je omezit ovlivňování přenosové cesty rušením a třetí je zvýšení odolnosti přijímače na rušení. K těmto účelům se používají odrušovací filtry, které lze použít k omezení rušení generovaného zdrojem rušení, ale také ke zvýšení odolnosti přijímače na rušení. Rušení od jednoho zdroje rušení nemusí mít dopad jen na jedno zařízení. Proto je zřejmé, že neefektivnější způsob je omezit rušení u samotného zdroje. Musíme ale uvažovat, že samotné rušení může být i užitečným signálem (např. rádiové vysílání), nebo může vzniknout bez činnosti techniky jako přírodní jev (např. blesk). Proto je nutné odrušovat i přijímače rušení. Charakterizujícím parametrem odrušovacích filtrů je vložný útlum, který charakterizuje odrušovací účinnost v daném kmitočtu. Vložný útlum lze vypočítat ze vztahu 2.5, kde A_u je vložný útlum v dB, U_1 je v hodnota rušení v daném bodě obvodu před vložením odrušovacího filtru a U_2 je napětí v tomtéž bodě obvodu po vložení filtru.

$$A_u = 20 \log \frac{U_1}{U_2} [dB] \quad (2.5)$$

Mezi základní odrušovací prvky patří odrušovací kondenzátor, odrušovací tlumivka, filtry LC, frekvenčně závislé odpory, přepětové ochrany a stínění. Použití jednotlivých odrušovacích prvků je závislé na přenosovém prostředí. Při omezování vyzařovaného rušení nebo zvyšování odolnosti proti němu je vhodné použít správné stínění. Pro omezení rušení šířícího se po vedení nebo zvýšení odolnosti na něj se používají odrušovací tlumivky, kondenzátory, LC filtry a přepětové ochrany.

2.5.1 Odrušovací kondenzátory

Odrušovací kondenzátory se dají používat samostatně, v bloku několika paralelně řazených kondenzátorů nebo v LC filtrech. Odrušovací kondenzátor se zapojuje paralelně k odrušovanému zařízení a funguje tak, že při nízkých kmitočtech je jeho impedance velmi velká, a proto se pro obvod neuplatňuje, ale s rostoucím kmitočtem postupně tento impedance klesá. Pro vysoké kmitočty se tak chová jako zkrat. To je chtěné v případě, kdy signál má vysokofrekvenční složky rušení a ty zkratujeme na zem. Pro samotné nízkofrekvenční složky signálu se kondenzátor nebude uplatňovat. Pozor musíme však dávat na parazitní vlastnosti kondenzátoru. Kondenzátor ztrácí schopnost filtrovat vysokofrekvenční signály s rostoucími kmitočty za hranicí rezonanční frekvencí, kde jeho reaktance opět roste vlivem parazitní indukčnosti.

2.5.2 Odrušovací tlumivka

Odrušovací tlumivky se používají samostatně nebo v LC filtrech. Tlumivky se zapojují sériově s odrušovacím zařízením do jeho proudové smyčky. Proto jsou také nejobjemnější a nejdražšími prvky odrušování. Jejich cena je úzce spjata s proudovým zatížením obvodu. Funkce tlumivky je opačná funkci odrušovacího kondenzátoru. Při nízkých kmitočtech se neuplatňuje její indukčnost a její útlum je malý (musíme uvažovat parazitní elektrický odpor vinutí). Ovšem s rostoucími kmitočty se její indukčnost začíná projevovat a začíná tak narůstat její útlum. Růst útlumu ale není nekonečný a při kmitočtech vyšších, než je rezonanční kmitočet, začne vložný útlum filtru opět klesat. Z toho je zřejmé, že je nutné tlumivku použít při frekvencích, kdy je splněn potřebný minimální útlum filtru pro vysoké frekvence.

Z konstrukčního hlediska můžeme také tlumivky dělit na tlumivky potlačující symetrické složky rušení nebo nesymetrické složky rušení. Tlumivky potlačující nesymetrické rušení jsou vlastně dvě tlumivky navinuté souhlasně na stejném jádru a nazývají se jako tlumivky s proudovou kompenzací. Pro protifázové proudy jsou jejich magnetické toky opačné a jejich výsledná indukčnost je tedy téměř nulová. Pro nesymetrické rušení mají magnetické toky ale shodný směr, tak je jejich výsledná indukčnost značná, a proto dojde k potlačení nesymetrického rušení.

2.5.3 LC filtry

Pro lepší ochranu zařízení před vysokofrekvenčním rušením se používají LC filtry, které jsou kombinací dvou předešlých filtrů. Používají se v největší míře jako napájecí odrušovací filtry typu dolní propust. To znamená, že bez potlačení propouštějí signály s nižším kmitočtem, než je stanovený mezní kmitočet, obvykle značený fm. Naopak nepropouštějí signály, jejichž frekvence je vyšší než fm. Většina LC

filtrů je sestavena jako L, Γ , π nebo T-článek nebo kombinace těchto článků.

2.5.4 Přepět'ové ochrany

Při dnešní snaze o větší a větší minimalizaci zařízení, a tedy zvýšené míře integrace součástek jsou samotné integrované obvody citlivější na přepět'ové špičky, které pro zařízení mohou mít i destruktivní charakter. Proto je nutné do zařízení implementovat přepět'ové ochrany chránící tyto obvody. Přepět'ové ochrany můžeme rozdělit podle rychlosti jejich reakce na hrubé a jemné. Reakční rychlost jde ruku v ruce s jejich maximálním ochranným napětím, tzn. hrubé přepět'ové ochrany dokáží pracovat s napětím i několik kilovoltů, zatímco jemné jen do několika stovek voltů. Mezi jemné přepět'ové ochrany můžeme řadit transil nebo varistor a mezi hrubé ochrany varistory nebo plynem plněnébleskojistky. Při realizaci kombinované přepět'ové ochrany z těchto prvků můžeme spojit hlavní výhody jednotlivých součástek, a tak dostat výslednou přepět'ovou ochranu s vynikajícími reakčními i výkonnostními vlastnostmi.

Zenerova dioda- se používá pro stabilizaci a ochranu proti přepětí do hodnoty zhruba 200V. Pro jeho vlastnosti v porovnání s transilem (viz. dále), je zenerova dioda primárně používána jako stabilizátor napětí používajícího V-A charakteristiku závěrného napětí (tzv. Zenerovo napětí).

Transil- je obchodní název pro supresorové diody. Tento typ lavinové diody je velmi podobný zenerově diodě. Rozdíl mezi těmito diodami je chování při velkém přepětí. Rozdíl nastává v situaci, kdy přepětí na diodě je příliš velké a dochází k destrukci zenerovy diody, kdy stabilizovaný obvod je vystaven celému přepětí a může dojít k následné destrukci zařízení. Tento problém řeší supresorová dioda, která naopak od zenerovy diody při velkém přepětí sníží vnitřní odpor, tím přes ní teče velký proud a omezí napětí na vstupu obvodu na hodnotu spínacího přepětí, která není pro zařízení destruktivní. Proud transilem může být až 200A po dobu 1 ms. Pro opětovné zavření součástky stačí pokles napětí pod hodnotu prahového napětí (tzv. vypínacího napětí). Transil je vyráběn jak v jednosměrné, tak i oboustranné variantě, což jsou v podstatě jen dvě zapouzdřené antiparalelně zapojené diody. Pro jeho krátkou reakci (až 0,01ns) a ochranu před napět'ovými špičkami až do 450V je transil hojně používaným přepět'ovým prvkem.

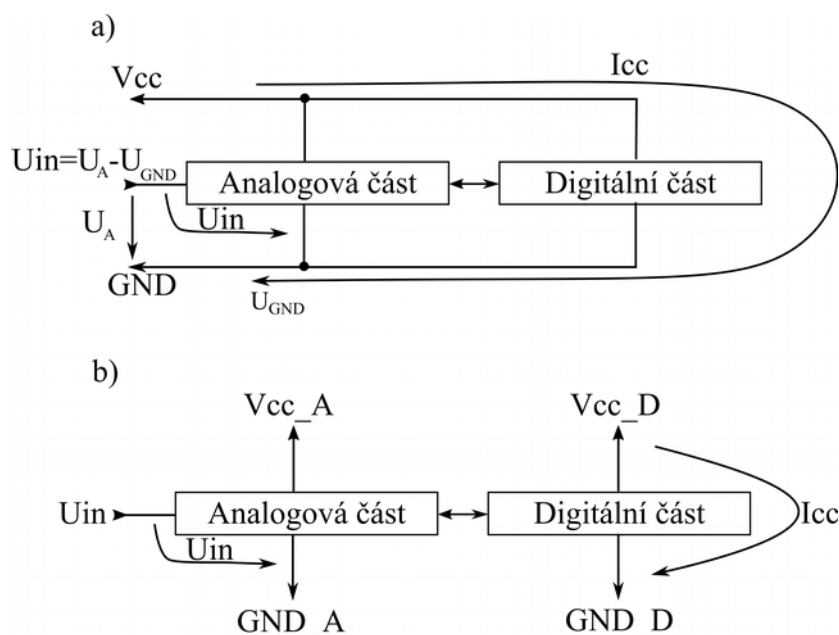
Bleskojistka- je hrubá přepět'ová ochrana, která se využívá pro velké ochranné napětí až 13kV. Takto velká hodnota napětí je však vykoupena pomalou reakční dobou, která i v nejlepších případech dosahuje i desítek μ s. Bleskojistka je vzácným plynem plněná skleněná nebo keramická výbojka. Jeho dva vývody jsou elektricky oddělené do chvíle, kdy hodnota přiloženého napětí přesáhne hodnotu zápalného napětí. Po dobu překročení zápalného napětí jsou vývody bleskojistky elektricky vodivé a úbytek napětí na vzniklém elektrickém oblouku je jen několik desítek voltů.

Varistor- je zkratka anglických slov *variable resistor* (variabilní rezistor). Jak již z názvu vyplývá, varistor je polovodičová součástka, která se chová jako nelineárně závislý rezistor, jehož změna velikosti závisí na velikosti přiloženého napětí. Varistor je možné použít i jako filtr vysokofrekvenčního rušení. Jeho vnitřní kapacita totiž může dosahovat desítek nF. Jeho doba reakce na přepět'ové špičky závisí na použitím

materiálu a dosahuje minima 10 ns. Porovnání s transilem, je varistor tvořen větším množstvím hmoty, z čeho jde vyvodit větší možná absorpce tepla při sepnutí, a tím i větší výkonové ztráty.

2.6 Oddělení analogové a číslicové části

Ve většině zařízení je nutné pracovat s digitální i analogovými signály. Spojkou mezi těmito signály jsou A/D převodníky. To znamená, že A/D převodník tvoří takovou hranici mezi analogovým signálem citlivým na rušení a digitálním signálem, který je naopak silně rušící. Z toho vyplývá, že je nutno tyto dva typy signálů co nejlépe od sebe oddělit. Největší problém pro koexistenci číslicových a analogových obvodů je napájení a zemnění z jednoho společného zdroje. Při použití digitálních obvodů musíme uvažovat jejich proudový odběr, který má impulzní charakter. Tyto proudy impulsního charakteru I_{cc} mají za následek úbytek napětí U_{GND} (viz. obr. 2.7). Toto napětí se bude vlivem galvanické vazby odečítat od vstupního signálu analogových obvodů. Tento úbytek napětí tak bude působit jako rušení analogového obvodu. Toto rušení pak může v A/D převodníku způsobit chybu při kvantování až o několik bitů v závislosti na tom, kolika bitový A/D převodník bude použit. Pro eliminaci vzniku rušivého úbytku napětí U_{GND} je tak vhodné napájení analogové a digitální části rozdělit co nejlépe u napájecího bloku, nejlépe hned u filtračního kondenzátoru na výstupu napájení. Pro propojení napájení a zemnění obou typů obvodů je vhodné využít správnou filtraci. Při integraci analogových a digitálních obvodů na jeden čip (např. u mikroprocesorů) je pro propojení napájecích vodičů optimální využít doporučení výrobců v aplikačních listech.



Obr. 2.7: Nesprávné a) a správné b) zapojení analogových a digitálních částí obvodu.

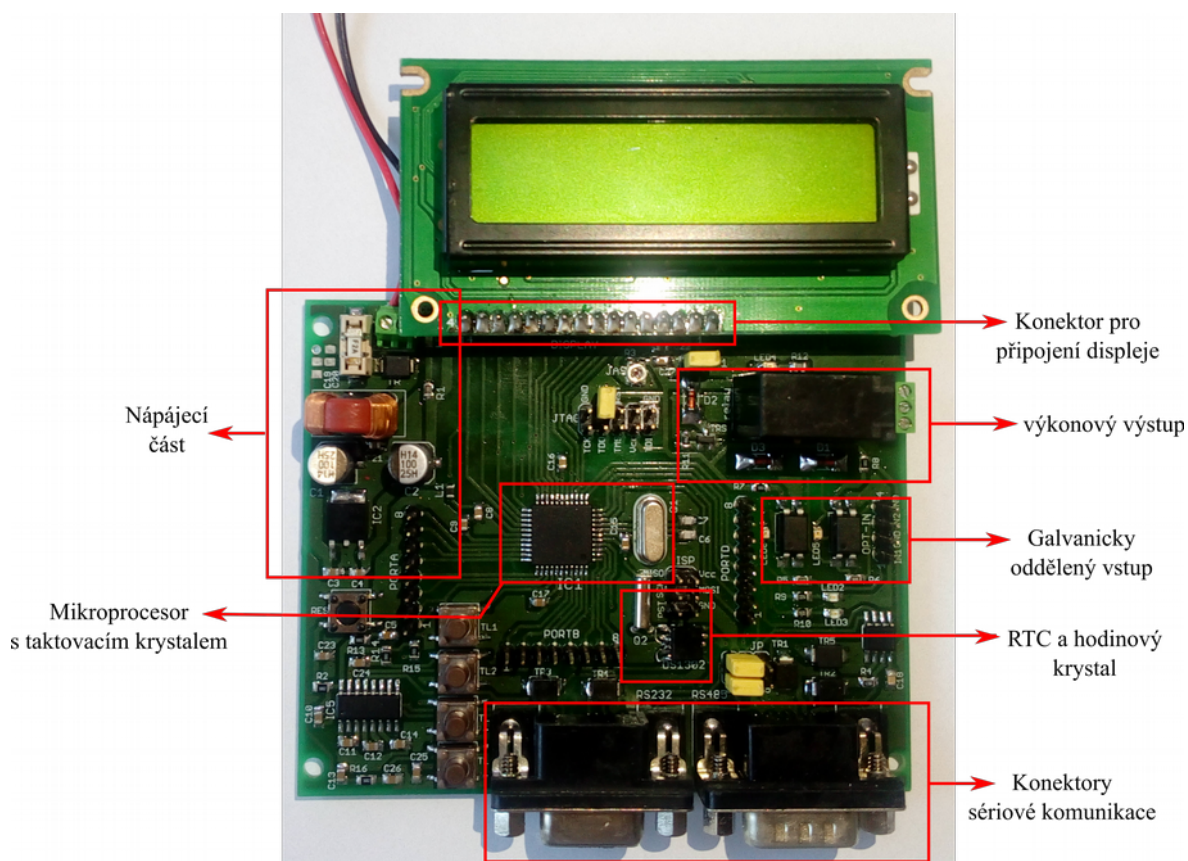
3 EMC testy navrženého zařízení a jejich výsledky

EMC testů je celá řada. Pro otestování navrženého zařízení byla použita série několika nepoužívanějších a nejdůležitějších EMC testů, kterými byly testovány vlastnosti navrženého zařízení z hlediska odolnosti proti rušení a vyzařování rušení.

3.1 Popis navrženého zařízení

Navržené zařízení je vývojová deska s procesorem Atmega16A, která disponuje mnoha funkcemi. Procesor je buzen externím krystalem, který kmitá s frekvencí 16MHz. Tento procesor podporuje komunikování s osobním počítačem přes rozhraní JTAG (z anglického Joint Test Action Group), které je proto vyvedeno na desce v podobě konektoru. Procesor podporuje funkci ISP (z anglického In-System Programming), která dovoluje procesor programovat bez nutného vyjmutí ze zařízení. Proto jsou vyvedené rovněž kontakty na připojení konektoru pro ISP. Vývojová destička disponuje taktéž řadou vstupů a výstupů. Pro náročné podmínky je destička pro zlepšení vlastností z hlediska odolnosti vybavena dvěma galvanicky oddělenými vstupy. Pro galvanické oddělení jsou použity optočleny a vstupy jsou navrženy pro příjem signálů v rozmezí 12-24 voltů, což je odvozeno od napětí, které se využívá pro komunikaci v průmyslových podmínkách. Na desce je také použito přepínací relé pro spínání výkonové zátěže do maximální hodnoty střídavého napětí 250 V a proudu 5A. Mezi další funkce desky patří možnost sériové komunikace s ostatními zařízeními pomocí průmyslových standardů RS232 nebo více odolné RS484, které jsou vyvedeny na konektory typu D-Sub, přesněji na devíti-vývodové DE-9. Oba konektory jsou propojeny přes převodníky napěťových úrovní s integrovanou jednotkou UART mikrokontroléru Atmega16A. Výběr mezi standardy je možný pomocí propojek na konektoru JP 232/485. Dále je procesor rozšířen o vnější periferie. Časový obvod RTC (z anglického Real Time Counter) umožňuje procesoru zapisovat nebo číst reálný čas, a tak nezatěžuje procesor při vykonávání programu. Na desce jsou umístěna tlačítka k možnosti ovlivňování vykonávaného programu, včetně tlačítka vyvolávajícího reset procesoru. Deska taktéž podporuje připojení dvouřádkového LCD displeje DEM16217 s 16 znaky na řádek, ve kterém je integrován řadič KS0070B. Displej je připojen k procesoru pomocí 11-ti bitové sběrnice, kde jsou tři bity použity jako řídicí a osm bitů je využito pro přenos dat. Ostatní vývody displeje slouží k napájení a ovládaní jasu, které je řešeno hardwarově. Pro zvýšení univerzálnosti desky jsou všechny nevyužité porty procesoru vyvedeny na konektory. V napájecí části zařízení se nachází odrušovací filtr LC typu dolní propust s tlumivkou potlačující nesymetrické rušení. Napájecí část byla dimenzována s ohledem na maximální spotřebu desky a připojeného displeje na proud 0,7A. Dále jsou pro zlepšení odolnosti proti přepětí všechny vstupní brány vybaveny přepět'ovými ochranami. Návrh rozložení součástek na DPS a vlastní provedení plošného spoje reflektuje výše zmiňovaná pravidla, která směřují k zvýšené odolnosti a minimalizaci rušivého vyzařování.

Celé obvodové schéma a výrobní dokumentace DPS je součástí přílohy této bakalářské práce.



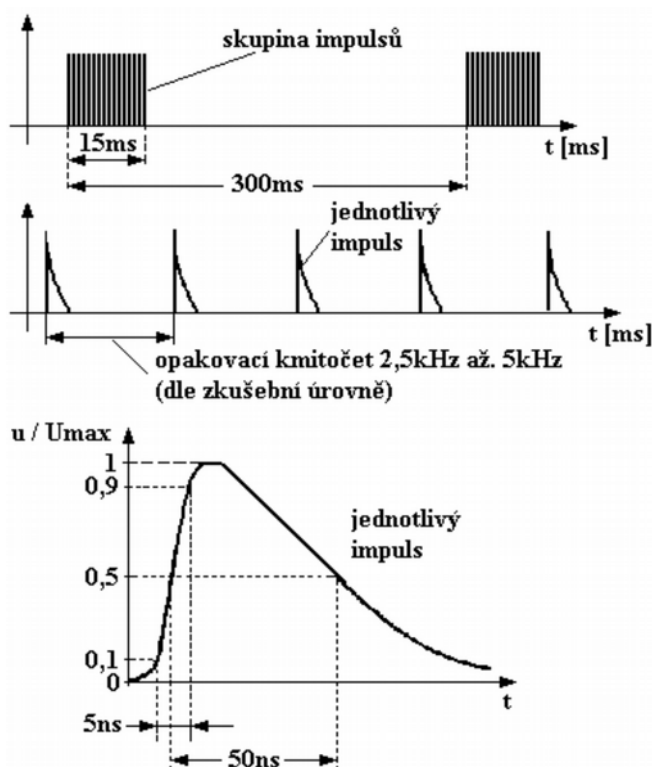
Obr. 3.1: Fotografie navržené vývojové desky se zapojeným displejem a základním popisem částí desky.

3.2 Zkouška odolnosti elektricky rychlými přechodovými ději/skupinou impulsů

Tato zkouška odolnosti je předepsána a měřena podle normy ČSN EN 61000-4-4. Jedná se o test, kdy je zařízení vystavováno sérii několika rychlých přechodových jevů značených zkratkou EFT (z anglického electrical fast transient), takzvaných burstů. Takovéto impulsy se podobají obvyklému průmyslovému rušení vznikajícího při elektromechanickém spínání indukčních zátěží (například motorů). Skupina impulsů se vždy opakuje s malými prodlevami (viz Obr. 3.2). Opakovací kmitočet 2,5 nebo 5kHz jednotlivých impulsů stanovuje norma. Hodnotu úrovně rušení norma předepisuje zvlášť pro napájecí vodiče a zvlášť pro datové, signálové nebo řídicí vodiče. Rozdělení zařízení probíhá do čtyř skupin podle prostředí, pro které je testované zařízení navrhováno. Zatímco úroveň odolnosti 1 je pro dobře chráněné prostředí, úroveň odolnosti 4 je pro prostředí silně rušené, tzn. prostředí silného průmyslu. Tabulka 3.1 ukazuje jednotlivé úrovně rušení.

	Napájecí vodiče	Datové vodiče
Úroveň odolnosti	Ur [kV]	Ur [kV]
1	+/- 0,5	0,25
2	+/- 1	0,5
3	+/- 2	1
4	+/- 4	2

Tab. 3.1: Maximální úrovně rušení pro různé třídy prostředí.



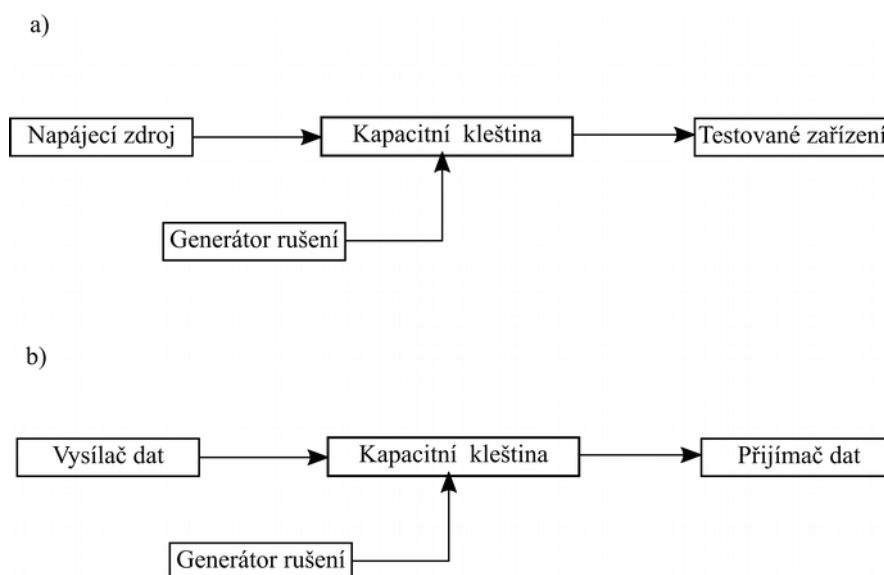
Obr. 3.2: Vlastnosti skupiny impulsů podle normy ČSN EN 61000-4-4.

3.2.1 Výsledky zkoušky odolnosti proti transientním signálům typu Burst

Testovali jsme jak vliv rušení na napájecí vodiče, tak rušení datových vodičů, na kterých probíhala komunikace mezi dvěma totožnými deskami. Odolnost napájecích vodičů jsme testovali pro dva různé testovací programy. V prvním programu šlo o blikání dvěma LED diodami, kdy se sledovala stálost blikání. V druhém případě mikroprocesor četl data z časového obvodu RTC, který následně zobrazoval na displej, kde se sledovala funkce hodin. Při testování odolnosti komunikace mezi dvěma vývojovými deskami se využil podobný program jako v druhém případě testování napájecích vodičů, ale s tím rozdílem, že první deska četla data z RTC a následně vysílala data přes sériovou asynchronní komunikaci standardu RS232. Druhá deska tak obstarávala příjem a zpracování dat a následně zobrazení dat na displej. Všechny tyto programy jsou součástí CD příloženého k této bakalářské práci.

Deska byla postupně testována až k nejvyšším možným úrovním rušení, které norma předepisuje

pro třídu 4. Při žádném z testů nedošlo k ovlivnění funkce zařízení jak při rušení napájecích vodičů, tak ani datových vodičů. Při rušení datových vodičů jsme dokonce překročili maximální úroveň rušení o 2kV, ale ani při takové úrovni rušení nedošlo k ovlivnění funkce. Zapojení pro jednotlivá měření jsou na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Zapojení pro měření odolnosti zařízení proti EFT a) rušení napájecích vodičů, b) rušení datové linky.

Vzhledem k napájení desky nízkým napětím a vzhledem k sériové komunikaci mezi deskami byla pro injektování rušení využita kapacitní kleština představující kapacitní vazbu mezi rušenými vodiči a generátorem rušení. Použitím kapacitní kleštiny dochází k silnému intenzivnímu vf rušení, a tak se doporučuje měřicí pracoviště umístit do stíněné komory. Pro generování rušení byl použit generátor EM Test – EFT 500.

3.3 Měření úrovně vyzářovaného vysokofrekvenčního rušení

Meze a metody měření charakteristik vysokofrekvenčního rušení způsobeného zařízeními informační techniky předepisuje norma ČSN EN 55022. Norma předepisuje jak úroveň vysokofrekvenčního rušení šířícího se vedením, tak úroveň rušení šířícího se vyzářováním. Norma rozděluje zařízení do dvou kategorií označených jako třída A ITE a třída B ITE.

Třída B ITE je kategorie zařízení, které vyhovují mezím rušení pro třídu B. Třída B ITE je určena pro zařízení určené k domácímu použití. Do této kategorie lze zařadit například osobní počítače, různá přenosná zařízení napájená vestavěnou baterií, telekomunikační zařízení napájená z telekomunikační sítě a podobně. Třída A ITE je kategorie všech ostatních zařízení, která odpovídají mezím rušení třídy A ITE. Zařízení vyhovující třídě A může být používáno v domácím prostředí jen s vhodným upozorněním ohledně možnosti vysokofrekvenční interference. V následujících tabulkách 3.2 až 3.5 jsou uvedeny úrovně rušení pro jednotlivé třídy šířící se po vedení nebo vyzářováním. Pro kmitočty rozhraní platí vždy nižší mez. V pásmu 0,15MHz až 0,50MHz klesá mez lineárně s logaritmem kmitočtu.

Kmitočtový rozsah MHz	Meze rušení dB (μ V)	
	Kvazivrcholové	Střední
0,15 - 0,50	79	66
0,50 - 30	73	60

Tab. 3.2: Meze pro rušení šířené vedením na síťových svorkách pro zařízení třídy A ITE.

Kmitočtový rozsah MHz	Meze rušení dB (μ V)	
	Kvazivrcholové	Střední
0,15 - 0,50	66 - 56	56 - 46
0,50 - 5	56	46
5 - 30	60	50

Tab. 3.3: Meze pro rušení šířené vedením na síťových svorkách pro zařízení třídy B ITE.

Kmitočtový rozsah MHz	Kvazivrcholové meze dB (μ V)
30 - 230	40
230 - 1000	47

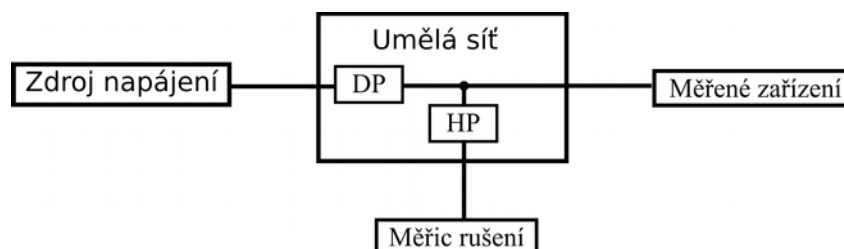
Tab. 3.4: Meze rušení pro kmitočty pod 1 GHz šířené zářením pro zařízení třídy A ITE ve vzdálenosti 10 metrů.

Kmitočtový rozsah MHz	Kvazivrcholové meze dB (μ V)
30 - 230	30
230 - 1000	37

Tab. 3.4: Meze rušení pro kmitočty pod 1 GHz šířené zářením pro zařízení třídy B ITE ve vzdálenosti 10 metrů.

3.3.1 Naměřené úrovně vyzařovaného rušení po vedení

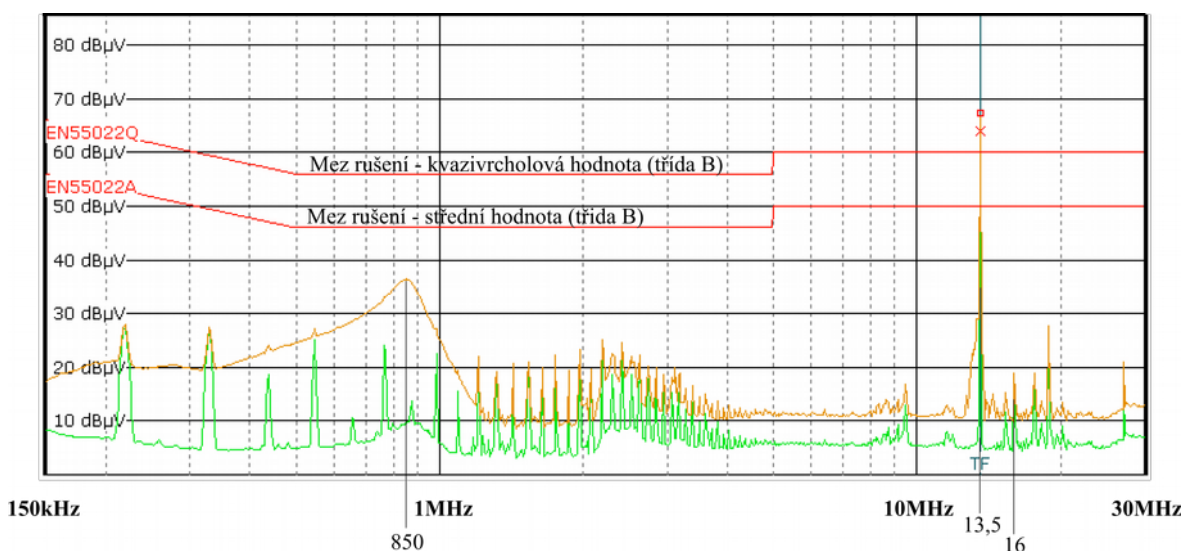
Pro měření úrovně rušení vyzařovaného po vedení bylo použito zapojení na obrázku 3.4. Při měření byla použita umělá síť PMM L2-16A, která plní tři funkce. Zajišťuje definovanou vf impedanci na svorkách testovaného zařízení, aby výsledky měření nebyly zkresleny odlišnými vf impedancemi. Dále přes filtr typu dolní propust nepropouští rušení do napájecí sítě a zároveň nepropouští rušení z napájecí sítě, které by mohlo zkreslit výsledky měření. Přes filtr typu horní naopak přivádí rušivé napětí do měřicího přijímače.



Obr. 3.4: Blokové schéma zapojení pro měření vyzařovaného rušení po napájecích vodičích.

Měření probíhalo při testovacím programu, kdy procesor četl data z časového obvodu RTC. Data následně

zobrazoval na displeji a zároveň je odesílal na konektor sériové linky RS232 přes převodník napěťových úrovní MAX232. Jako měřic rušení byl použit signálový a spektrální analyzátor R&S ESRP EMI Test Receiver s frekvenčním rozsahem 10 Hz až 7 GHz. Výsledky z měření jsou na obrázku 3.5. Jelikož byla v napájecí části navržené desky umístěna indukčnost s proudovou kompenzací k potlačení nesymetrického rušení, byly úrovně rušení v obou napájecích vodičích totožné.



Obr. 3.5: Naměřené hodnoty rušení šířícího se napájecími vodiči. Na vodorovné ose je frekvence rušení s vyznačenými důležitými kmitočty. Na svislé ose je úroveň naměřeného rušení. Žlutá křivka reprezentuje kvazivrcholovou hodnotu a zelená střední hodnotu.

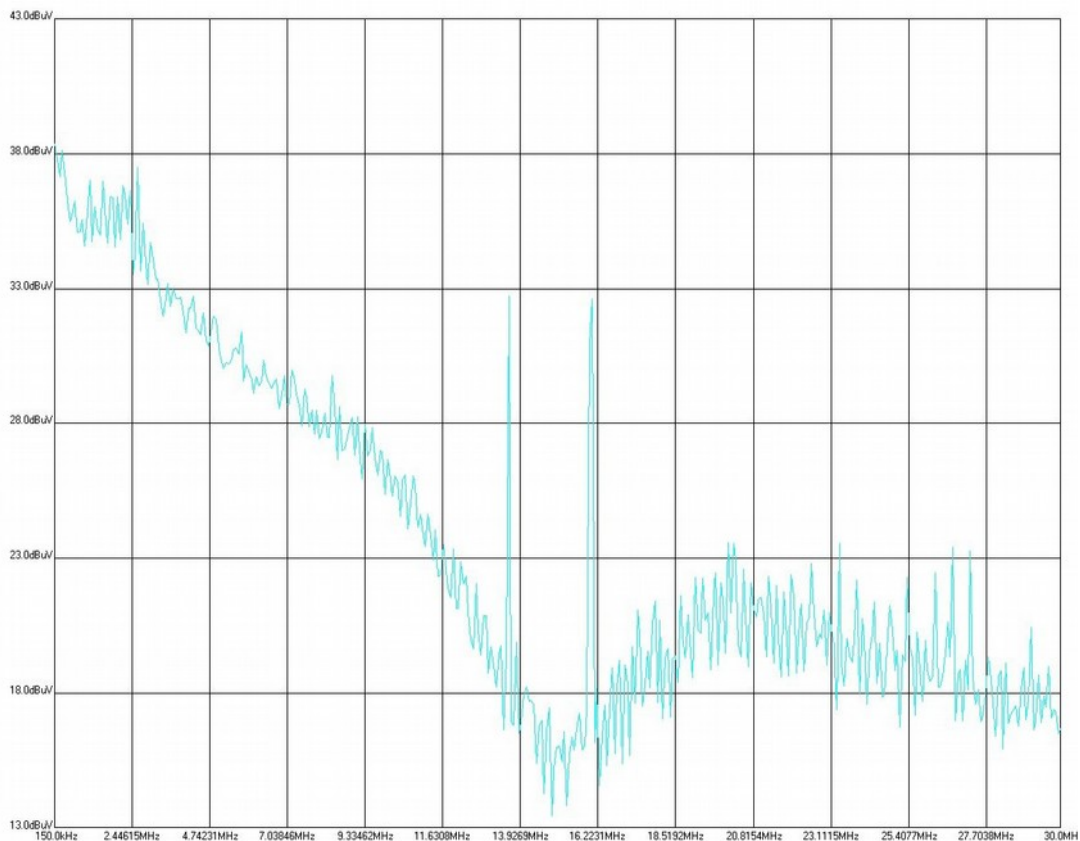
Největší rušení překračující normovanou mez je v oblasti 13,5 MHz. Tento přesah normované úrovně lze zanedbat, jelikož měření nebylo prováděno v odrušeném prostředí a rušení od docházkového systému pracujícího na kmitočtu 13,5 MHz tak ovlivnilo výsledky. Všechny ostatní hodnoty rušení nepřesahují mez, a tak lze navržené zařízení považovat za vyhovující z hlediska EMI pro třídu B. Na kmitočtu 16 MHz, na kterém pracuje mikrokontrolér navržené desky, je viditelné jen malé rušení dosahující 18,9 dBµV kvazivrcholové hodnoty. To ukazuje na vhodné použití blokovacích kondenzátorů. Výrazné zvýšení kvazivrcholové hodnoty je ještě v oblasti 850kHz, kde dosahuje hodnoty 36,4 dBµV.

3.3.2 Naměřené úrovně vyzařovaného rušení šířícího se zářením

Z hlediska vlastností navrženého zařízení nebylo měření rušení, šířící se zářením, provedeno. Podle normy ČSN EN 55022 se měření rušení s kmitočtem pod 1 GHz provádí ve vzdálenosti 10 m od testovaného zařízení a ve vzdálenosti 3 m při kmitočtech rušení nad 1 GHz. Při malých výkonech používaných na vývojové desce by bylo rušení ve vzdálenosti 10 m těžko změřitelné. Proto se provedl test blízkých elektromagnetických polí ve vzdálenosti 2,5 cm od desky, elektromagnetickým skenerem Detectus AB RS642RH. Při skenování byla použita skenovací hlava citlivá na magnetické pole označená RF-B 3-2. V první fázi skenovala plochu celé desky a pomocí spektrálního analyzátoru HP E4411B s kmitočtovým rozsahem 9 kHz až 1,5 GHz byla určena spektrální analýza magnetického pole rozprostřeného nad vývojovou deskou. Při měření byl v procesoru použit stejný testovací program jako při měření vyzařovaného

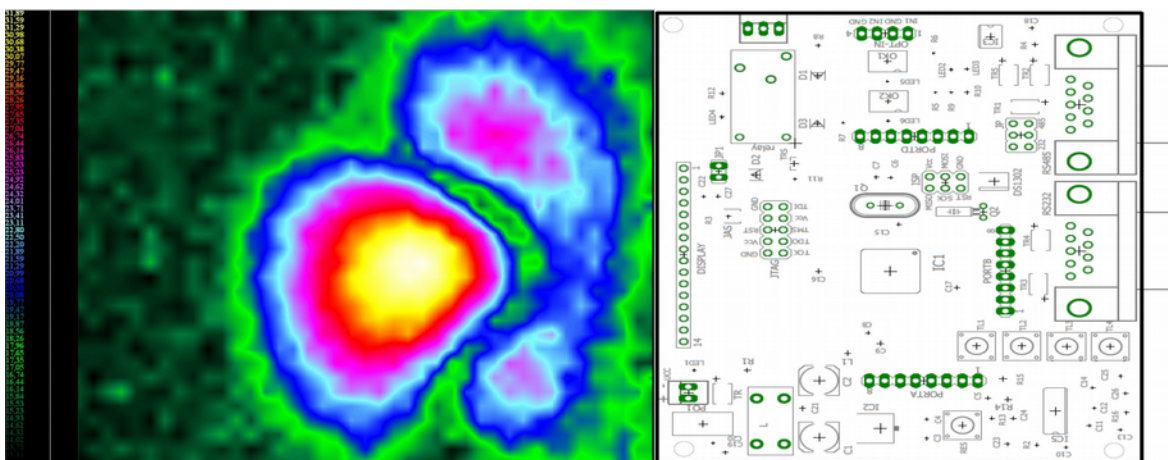
rušení po vedení.

Ze spektrální analýzy byly nejdominantnější kmitočty, kromě jiných, kmitočty 13,5 MHz a 16 MHz (viz obr. 3.6). Špička na 13,5 MHz je opět způsobena rušením zmíněného docházkového systému. Špička nacházející se v oblasti 16 MHz je od taktovacího kmitočtu procesoru. Ve druhé fázi byla deska skenována jen na rušení o kmitočtu 16 MHz. Naměřené vyzářované rušení na tomto kmitočtu je na obr. 3.7.



Obr. 3.6 : Spektrální analýza magnetického pole nad testovanou deskou.

Pro toto měření nebyla provedena kompenzace nelineární citlivosti sondy v nízkých kmitočtech. Proto úroveň vyzářování na obrázku 3.6 stoupá se snižujícími se kmitočty.



Obr. 3.7: Vyzářované rušení na kmitočtu 16 MHz

Měření potvrdilo očekávání nejvyšší úrovně EMI v oblasti mikroprocesoru, který pracoval na kmitočtu 16 MHz. Zvýšení EMI je patrné i u obvodu RTC, se kterým procesor komunikuje rovněž na kmitočtu 16 MHz. Další zvýšení EMI je také v oblasti obvodu MAX232, který byl při běhu testovaného programu také aktivní.

3.4 Zkouška odolnosti elektrostatickým výbojem ESD

Simulace elektrostatických výbojů je prováděna podle normy ČSN EN 61000-4-2. Zkušebními zařízeními (tzv. Simulátorem ESD), jehož koncová část má obvykle podobu pistole s vybíjecím hrotem, se testované zařízení testují dvěma způsoby, podle typu výboje.

U zkoušky, kdy se elektrostatický náboj vybije prostřednictvím vzduchového výboje, se hrot vybíjecí pistole přiblíží na takovou vzdálenost, aby došlo k přeskocení jiskry do zkoušeného zařízení. Poté se simulátor opět oddálí, znovu se nabije a opakuje se další jednotlivý výboj.

Naopak u zkoušky, kdy dochází k vybíjení náboje prostřednictvím kontaktního výboje, se vybíjecí hrot pistole přiloží na testované zařízení a vysoké napětí se připojí sepnutím kontaktu uvnitř simulátoru. Tak vznikne v testovaném zařízení vybíjecí impulz. Hodnoty maximálního proudu a proudů tohoto impulzu po 30 a 60 ns jsou závislé na velikosti přivedeného vysokého napětí. Hodnoty proudů ukazuje tabulka 3.5. Velikost přiloženého kladného i záporného napětí je závislá na úrovni odolnosti, která odpovídá prostředí, pro které je zařízení konstruováno. Jednotlivé velikosti napětí podle normy ČSN EN 61000-4-2 jsou uvedeny v tabulce 3.6.

Přiložené napětí [kV]	I_{max} [A]	I_{30} [A]	I_{60} [A]
2	7,5	4	2
4	15	8	4
6	22,5	12	6
8	30	16	8

Tab. 3.5: Vlastnosti proudového impulsu ESD.

Úroveň odolnosti	Zkušební napětí [kV]	
	Kontaktní výboj	Výboj vzduchovou mezerou
1	2	2
2	4	2
3	6	8
4	8	15

Tab. 3.6: Mezní hodnoty rušivých napětí pro ESD.

Účinky ESD na zkoušené zařízení se vyhodnocují dle funkčního hlediska, které bylo zmíněno v podkapitole 1.1.1.

Zkouška odolnosti proti ESD se u navrženého zařízení neprováděla. Při testu by se vybíjecí hrot pistole simulátoru přikládala na přístupné části desky. Například na tlačítka, displej, svorkovnice nebo na konektory portů.

4 Závěr

4.1 Zhodnocení navrženého zařízení

Pro zlepšení vlastností navrženého zařízení byly součástky osazeny na dvouvrstvé desce plošných spojů. Byly voleny součástky s SMT pouzdry, kde kratší přívody součástek kladně ovlivňují parazitní indukčnost. Použití dvouvrstvé DPS dovolilo jednak zmenšení rozměrů celého zařízení, tak i zlepšení vlastností z hlediska EMC vlivem rozlité země a vhodnějšímu uspořádání součástek oproti jednovrstvé DPS. Zmenšení rozměrů zařízení s sebou však přineslo problém v podobě nedostatku místa pro umístění displeje. Umístění displeje nad DPS by bylo přínosné z hlediska snížení EMI, kde by displej mimo funkce zobrazovače dat sloužil i jako stínění vlivem své konstrukce. Při porovnání velikosti displeje (4x8 cm) a velikosti vývojové desky (7,5x9 cm) plyne, že připojený displej nad deskou by zakryl téměř polovinu desky, a tak by nebyla dostupná většina konektorů a tlačítek, které jsou rozmístěny po celé desce. Navíc by takové řešení nebylo možné kvůli rozměrům některých součástek, které jsou při připojení displeje k desce vyšší než displej. Proto se zvolila konstrukce, kdy je připojený displej situován mimo desku (viz Obr 3.1). V konečné verzi se předpokládá, že displej bude připojen prostřednictvím plochého kabelu a umístěn na přístrojové skříni.

Z hlediska návrhu DPS byla respektována návrhová pravidla vedoucí ke zlepšení vlastností celého zařízení z hlediska EMC. Zemní plocha GND byla rozlévána v obou vrstvách DPS ke zvětšení kapacitní vazby mezi jednotlivými vodiči a zemněním, které vede k lepšímu odrušení. Vzhledem k rozlévané ploše GND bylo možné i účinné zmenšení proudových smyček, kdy jednotlivé součástky mohly být uzemněny pomocí prokůvů přímo na spodní vrstvu DPS, kde je rozlévána zem. Samozřejmostí je použití blokovacích kondenzátorů v souladu s pravidly o výběru vhodných hodnot a typů kondenzátorů a jejich správném umístění.

4.2 Zhodnocení zkoušek EMC navrženého zařízení

Pro navržené zařízení byly vybrány takové testy, které nejlépe demonstují EMC vlastnosti odvíjející se od opatření při jeho návrhu.

Provedený test odolnosti prokázal navržené zařízení jako velmi odolné proti rušení, kde maximální úroveň rušení stanovené normou ČSN EN 61000-4-4 neovlivnila chod desky jak při rušení napájecích vodičů desky, tak ani při rušení komunikace probíhající mezi dvěma stejnými deskami. Při rušení datové komunikace bylo odzkoušeno i napětí rušivého signálu 4 kV, které je o 2 kV vyšší než maximální hodnota stanovená normou pro rušení datových vodičů. Ani v tomto případě však nedošlo k ovlivnění funkce desky. Je tak patrné, že rezerva zařízení z hlediska EMS je dostatečně velká.

Zkouška zařízení na vyzařované rušení po vedení ukázala dobré vlastnosti zařízení z hlediska EMI. Změřené rušení na vedení nepřekročilo povolenou úroveň rušení po vedení stanovenou normou ČSN EN 55022. Dokonce navržené zařízení splnilo limity pro třídu B. To znamená, že by mohlo být používáno i v prostředí domácnosti bez nutného upozornění na zvýšenou elektromagnetickou interferenci. Pro přesné měření by bylo vhodné měřit rušení v odstíněném prostoru, kde by cizí rušení nepronikalo do napájecích

vodičů měřeného zařízení a nezkreslovalo tak výsledky. Jak bylo zmíněno, měření rušení šířícího se zářením by bylo nepodstatné z důvodu malého výkonu vyzářeného do prostoru. Náhradou této zkoušky bylo zvoleno skenování intenzity magnetického pole rozloženého nad deskou. Toto měření podle očekávání prokázalo největší hodnoty EMI nad oblastí procesoru a nad oblastmi součástek, s kterými procesor komunikoval.

4.3 Celkové zhodnocení

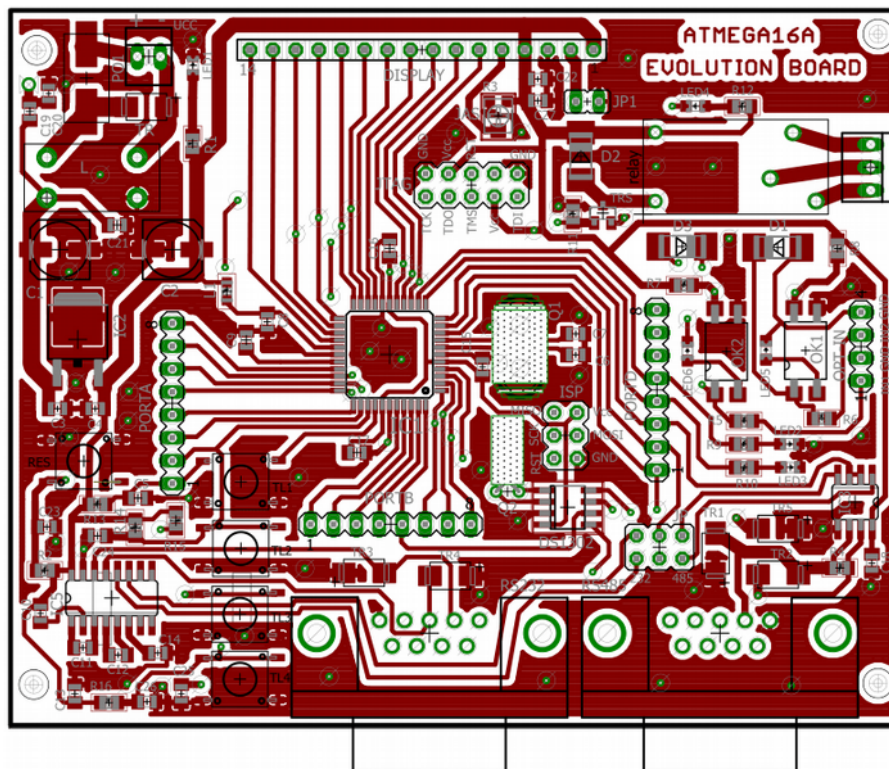
Cílem práce bylo vytvořit funkční vzorek mikroprocesoru za pomoci opatření vedoucích ke zlepšení elektromagnetické kompatibility zařízení. Používání blokovacích kondenzátorů, přepět'ových prvků na vstupních branách zařízení a odrušovacích filtrů, vedlo ke splnění požadavků dané normou ČSN EN 55022 a ČSN EN 61000-4-4, kde byly požadavky prověřeny výše zmíněným měřením. S ohledem na vykonané zkoušky lze říci, že by navržené zařízení splnilo s největší pravděpodobností i další řadu EMC testů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

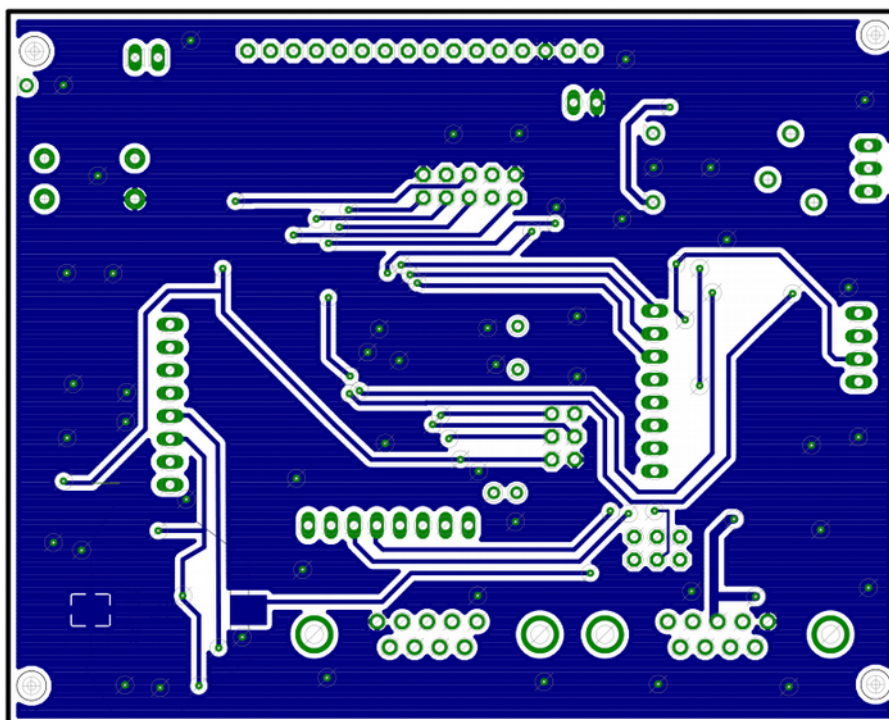
- [1] SVAČINA, J.: Elektromagnetická kompatibilita – principy a metody. Brno: Vysoké učení technické, 2001.
- [2] ZÁHLAVA, V.: Návrh a konstrukce DPS – Principy a pravidla návrhu, BEN, Praha 2010.
- [3] MONTROSE, M.I.: EMC and the Printed Circuit Board, IEEE Press 1998.
- [4] PCB Design Guidelines For Reduced EMI, Texas Instruments 1999.
- [5] KAŇUCH, J.: EMC z hlediska teorie a aplikace, BEN, Praha 2006.
- [6] VACULÍKOVÁ, P. – VACULÍK, E. a kol.: Elektromagnetická kompatibilita elektronických systémů, Grada, 1998.
- [7] HENEHAN, B. - MYERS, L.: EMI Board Design and Layout Guidelines, Texas Instruments 2002.

Přílohy

Příloha A1 – Návrh DPS a rozmístění součástek - horní strana.



Příloha 2 – Návrh DPS a rozmístění součástek - horní strana.



Příloha A3 – Elektrické schéma navržené vývojové desky.

