

Měření rušivého elektromagnetického vyzařování u systémů s moduly pro platformu Arduino a omezení úrovně tohoto rušení

Bc. Patrik Studený

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav elektroniky a měření

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Patrik Studený
Osobní číslo:	A21154
Studijní program:	N1032A020003 Bezpečnostní technologie, systémy a management
Specializace:	Bezpečnostní technologie
Forma studia:	Kombinovaná
Téma práce:	Měření rušivého elektromagnetického vyzařování u systémů s moduly pro platformu Arduino a omezení úrovně tohoto rušení
Téma práce anglicky:	Measurement of interfering electromagnetic emissions in systems with modules for the Arduino platform and limiting the level of this interference

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s technikou měření elektromagnetického vyzařování v pásmu 30 MHz až 6 GHz
2. Nastudujte problematiku týkající hw řešení modulů pro platformy Arduino
3. Vyberte vhodný systém PZTS založený na platformě Arduino s více moduly a změřte rušivé elektromagnetické vyzařování sestavy v pásmu od 30 MHz do 6 GHz a diskutujte splnění EMI norem
4. Navrhněte techniku pro odstranění rušení pomocí stínění a ověřte ji na dané sestavě
5. Seznamte se problematikou měření rušení na napájecím vedení a proveďte jeho měření
6. Navrhněte způsob potlačení tohoto rušení pomocí vhodných filtrů

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

Seznam doporučené literatury:

1. VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil. *Elektronická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení : ČSN-ČSN EN-ČSN IEC-ČSN CISPR-ČSN ETS*. Praha: Grada, 1998. ISBN 80-7169-568-8.
2. SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky. Připojujeme se k Evropské unii*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-21418737.
3. PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0471755001.
4. HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009. ISBN 978-80-7232-383-8.
5. VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
6. PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-110-1.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Goňa, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **20. listopadu 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2024**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Milan Navrátil, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. prosince 2023

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 27.6 2024

Bc. Patrik Studený v.r.
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou elektromagnetické interference elektrických zařízení. Primárním cílem této diplomové práce je podrobit testem EMI systémy založené na platformě Arduino s více Arduinovými moduly. V praktické části je experimentálně ověřováno vyzařování s jedním, dvěma a čtyřmi Arduinovými deskami. Arduina jsou testována vždy po nahrání naprogramovaného kódu od těch nejjednodušších po náročné. Nejvíce náročnou aplikací se projevila komunikace prostřednictvím rychlé impedančně neukončené sběrnice SPI. Ta byla nakonec vybrána, jako součást systému, který odpovídá jednoduché poplachové ústředně založené na platformě Arduino. Následně je navrženo a realizováno protiopatření pomocí stínění. Poslední úlohou diplomové práce je měření vyzařování tohoto systému po vedení a návrh eliminace tohoto rušení pomocí vhodných filtrů.

Klíčová slova:

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická interference zářením, elektromagnetická interference vedením, mikropočítačová platforma Arduino, elektromagnetické stínění, rušení na vedení.

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of electromagnetic interference of electrical equipment. The primary objective of this thesis is to test EMI systems based on the Arduino platform with multiple Arduino modules. In the practical part, the radiation is experimentally verified with one, two and four Arduino boards. The Arduinos are tested each time after loading the programmed code from the simplest to the complex ones. The most challenging application proved to be communication via the fast impedance-invariant SPI bus. This was eventually selected, as part of a system that corresponds to a simple alarm control panel based on the Arduino platform. Subsequently, a countermeasure using shielding is designed and implemented. The last task of the thesis is the measurement of the radiation of this system along the line and the suggestion of eliminating this interference by means of suitable filters.

Keywords:

Electromagnetic compatibility, radiated electromagnetic interference, line electromagnetic interference, Arduino microcomputer platform, electromagnetic shielding, line interference filtering

Tímto odstavcem bych chtěl poděkovat lidem, kteří mi jakýmkoli způsobem pomáhali během psaní diplomové práce. Největší poděkování náleží vedoucímu práce Ing. Stanislavu Goňovi, Ph. D., kterému tímto moc děkuji za odborné vedení, časovou flexibilitu, velké množství konzultací a pomoci při měření praktické části v laboratoři.

Dále bych chtěl poděkovat členům své rodiny, kteří mi pomáhali s psychickou podporou během tohoto náročného období.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	10
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ INTERFERENCE	14
1.2 ELEKTROMAGNETICKÁ SUSCEPTIBILITA	15
1.3 NORMY	16
1.3.1 Standardy a legislativa	16
1.4 VLIV ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	18
2 RUŠIVÉ VYZAŘOVÁNÍ	20
2.1 ROZDĚLENÍ SIGNÁLŮ	20
2.1.1 Determinované signály.....	21
2.1.2 Stochastické signály	21
2.2 VAZEBNÍ MECHANISMY	21
2.2.1 Galvanická vazba	21
2.2.2 Kapacitní vazba	22
2.2.3 Induktivní vazba.....	23
2.2.4 Vyzářování	23
2.3 VYZAŘOVÁNÍ NA VEDENÍ	24
2.4 MĚŘENÍ POMOCÍ ANTÉN	28
3 ZPŮSOB MĚŘENÍ	31
3.1 TYPY DETEKTORŮ	31
3.2 LIMITY A FUNKČNÍ KRITÉRIA.....	32
3.3 MĚŘÍCÍ PROSTŘEDÍ	33
3.3.1 Semi-anechoická komora	33
3.3.2 Anechoická komora	34
3.4 MĚŘÍCÍ PROSTŘEDKY	35
3.4.1 Antény	35
3.5 SONDY.....	37
3.5.1 Měřicí nástroje rušení vedením.....	38
3.6 UMĚLÁ NAPÁJECÍ SÍŤ	40
4 VÝVOJOVÁ PLATFORMA ARDUINO	42
4.1 DESKY ARDUINO.....	42
4.1.1 Arduino Mini.....	43
4.1.2 Arduino Micro.....	43
4.1.3 Arduino Fio	43
4.1.4 Arduino UNO	44
4.1.5 Arduino Mega	44
4.2 KLONY	44
4.3 ARDUINO SHIELDY	45
4.4 ARDUINO IDE	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	46

5	NÁVRH MĚŘENÉHO ZAŘÍZENÍ.....	47
5.1	NÁVRH TESTOVANÝCH ÚLOH	47
5.2	VÝBĚR HARDWARU PRO TEST	47
5.2.1	Arduino UNO	48
5.2.2	LCD displej	48
5.2.3	Výukový shield	49
5.2.4	Modul reálného času DS3231	49
5.3	REALIZACE SOFTWAREVÉ ČÁSTI	50
5.4	VYBAVENÍ LABORATOŘE.....	52
5.5	POSTUP MĚŘENÍ EMI.....	53
6	MĚŘENÍ ARDUINA.....	55
6.1	MĚŘÍCÍ ÚLOHA 1	56
6.2	MĚŘÍCÍ ÚLOHA 2	58
6.3	MĚŘÍCÍ ÚLOHA 3	59
6.3.1	Návrh ústředny	60
6.3.2	Naměřené hodnoty	63
7	NÁVRH STÍNĚNÍ.....	64
8	MĚŘENÍ NA VEDENÍ	66
8.1	PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ	67
8.2	MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍM ANALYZÁTOREM.....	68
8.3	ELIMINACE RUŠENÍ PO VEDENÍ	70
8.3.1	Použití feritové perličky	71
8.3.2	Použití RC filtru	71
	ZÁVĚR	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	75
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	79
	SEZNAM TABULEK.....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	82

ÚVOD

Elektromagnetická kompatibilita je velmi populární vědní disciplína, která široce zasahuje do elektronických zařízení. Elektromagnetická interference zářením nebo vedením může způsobovat chybnou činnost elektronických zařízení nebo v krajním případě způsobit výpadek funkce zařízení. Celá tato problematika je popisována v první kapitole Elektromagnetická kompatibilita.

Druhá kapitola se zaměřuje na rušivé signály, tedy zdroj elektromagnetického rušení EMI. Je zde stručný popis základních druhů signálů, které se mezi sebou liší svými vlastnostmi. Dále jsou zde probrány vazební mechanismy, které vznikají na vodičích a následující podkapitola se zabývá vyzařování na vedení. Zde je detailněji rozepsán fyzikální jev na vodiči s použitím vzorců pro elektrickou intenzitu, Huygensův princip a anténní faktor. Následující podkapitola je věnována problematice týkající se vyzařování pomocí anténní techniky, neboť veškeré informace z tohoto bloku budou využity v praktické části při EMI měření v laboratoři. Stejně jako poslední kapitola, kde je ve stručnosti představena měřicí technika EMC laboratoře s jejich funkcemi, možnostmi použití apod.

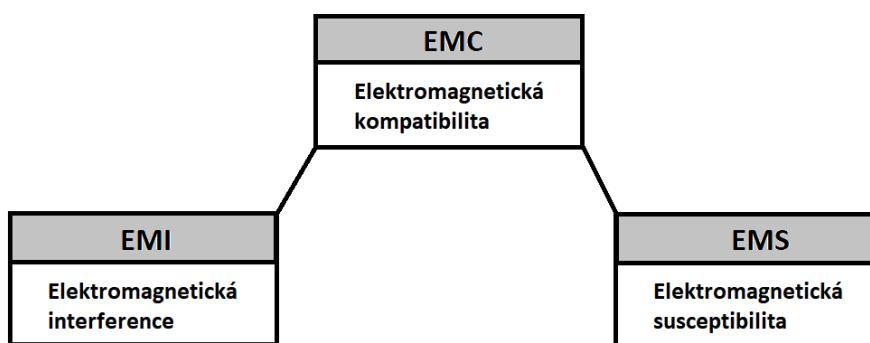
Kapitolou uzavírající teoretickou část je měřené zařízení. V tomto případě se jedná o vývojovou platformu Arduino. Jsou zde popsány různé druhy těchto desek, které se mezi sebou odlišují svými vlastnostmi. Tyto desky velmi často pro svou funkci v konkrétním praktickém využití potřebují různé moduly, proto jsou obsahem následující podkapitoly.

Hlavním cílem praktické části této diplomové práce je prozkoumat elektromagnetickou interferenci levné vývojové sady s mikrokontrolérem ATmega328P, konkrétně se jedná o vývojovou desku Arduino UNO. Tyto Arduinové platformy po zprovoznění neobsahují žádný startovní program, proto je nutné navrhnout hardwarovou i softwarovou část před EMI měřením. Následně jsou Arduina testovaná vždy po nahrání naprogramovaného kódu od těch nejjednodušších po náročné, aby byla odhalena slabina těchto zařízení z pohledu vyzařování. Výstupem praktické části práce je návrh a následné změření vyzařování PZTS ústředny založené na platformě Arduino a následně navrhnout vhodný způsob eliminace, aby zařízení splňovalo platné normy.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)

Široké použití elektronických obvodů pro komunikaci, výpočty, automatizaci a další účely vyžaduje, aby různé obvody fungovaly ve vzájemné těsné blízkosti. Bohužel ve skutečnosti se až příliš často tyto obvody navzájem nepříznivě ovlivňují. Elektromagnetické rušení (EMI) se stalo hlavním problémem pro návrháře obvodů a je pravděpodobné, že v budoucnu s přibývajícím navyšováním nároků na výpočetní techniku bude tato problematika ještě závažnější. Tento trend je částečně způsoben velkým počtem běžně používaných elektronických zařízení. Kromě toho použití integrovaných obvodů a rozsáhlé integrace snížilo velikost elektronického zařízení. S tím, jak se obvody zmenšují a jsou sofistikovanější, je více obvodů vměstnáno do menších konstrukcí, což velmi zvyšuje pravděpodobnost rušení. Navíc s přibývajícím vývojem hodinové frekvence procesorů a celkově výpočetní techniky v průběhu let dramaticky zvýšily. Řádově se v dnešní době pohybují obvykle přes gigahertz. Obzvláště u výpočetní techniky používané v zaměstnání nebo domácnostech, ty dnes mají procesory s hodinovým kmitočtem vyšším než 1 GHz. [1];[2];[3]



Obr. 1. Základní dělení EMC [2]

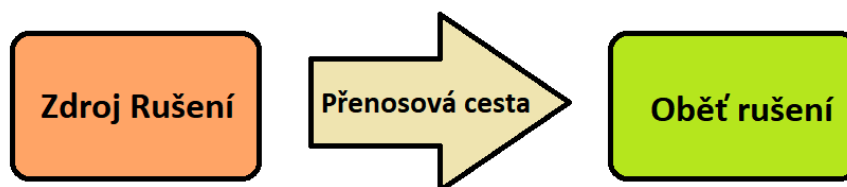
V dnešní době je na světě velké množství různých elektronických systémů, které během své primární činnosti mohou být rušeny, nebo naopak mohou vydávat rušivé signály a ovlivňovat tím funkci jiných zařízení v bezprostředním okolí. Proto je nutné elektronické výrobky konstruovat způsobem, aby splňovaly normy elektronické kompatibility. Každý výrobek se před samotným uvedením na trh musí podrobit zkoušce EMC. [1]

Pojem elektromagnetická kompatibilita si lze představit jako vědní obor a vlastnost daného systému. Jedná se o fyzikální multidisciplinární obor zahrnující především elektroniku, fyziku, lékařské vědy, právo apod. Pod pojmem vlastnosti systému je myšleno zajištění nerušené požadované funkce celého systému. Systém musí být schopen pracovat v blízkosti jiných systémů a systémy se nesmí vzájemně ovlivňovat. V případě negativního ovlivňování dochází k tzv. rušení systému. [3]

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnost elektronického systému správně pracovat v určeném elektromagnetickém prostředí a nebýt zdrojem znečištění tohoto elektromagnetického prostředí. Elektromagnetické prostředí se skládá z vyzařované i vedené energie. EMC má tedy dva aspekty, emisi a susceptibilitu. [1]

Elektromagnetická kompatibilita se v podstatě skládá ze dvou hlavních větví. První odvětví se nazývá elektromagnetická interference (EMI), která představuje schopnost systému vyzařovat do svého okolí rušivé signály. Druhým odvětví je elektromagnetická susceptibilita (EMS), neboli odolnost systému, představující schopnost odolat vlivu rušivých signálů nacházející se v bezprostřední blízkosti a zachovat si svou primární funkci. [3]

Pro bližší představu, jak může vypadat základní problematika EMC, slouží základní řetězec. Skládá se celkem ze tří základních bloků a je k dispozici na Obr. č. 2.



Obr. 2. Základní bloky EMC [3]

Prvním blokem zjednodušeného EMC řetězce představuje zdroj rušení. Zde jsou zahrnuty zdroje rušení na základě jejich charakteru nebo intenzity. Zdroje se dále dělí na přírodní nebo umělé. Přírodní zdroje vznikají volně v přírodě bez zásahu lidské společnosti a umělé naopak vyžadují lidský zásah. [3]

Příklady typických zdrojů rušení:

- počítače, monitory,
- zářivky, měniče napětí,

- motory, el. spínače,
- výkonové polovodičové měniče,
- jističe, stykače, relé. [2];[3]

Přenosová cesta mezi zdrojem rušení a jeho obětí dochází pravidla dvěma způsoby, a to prostorovým přenosem nebo po vedení.

Přenosové cesty:

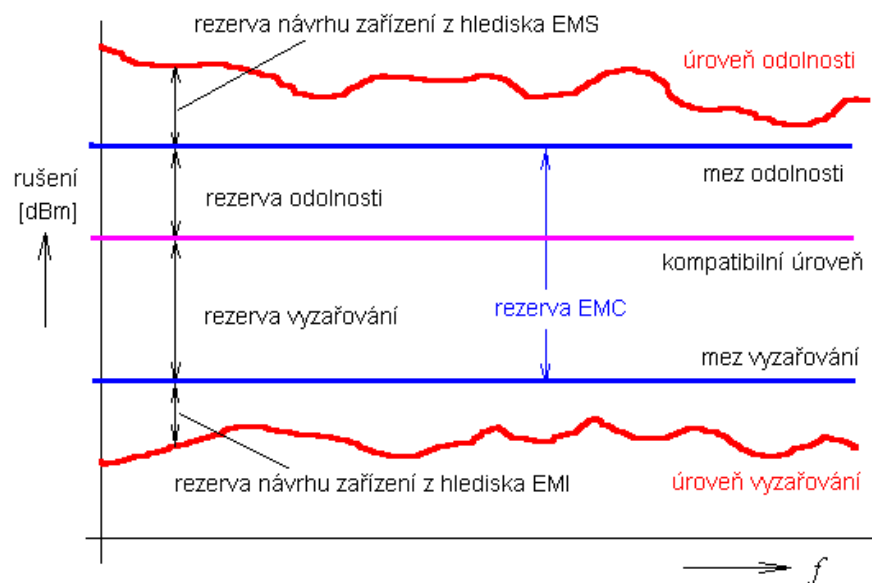
- vzdušný prostor,
- datové vodiče, použité stínění
- napájecí vodiče,
- zemní vodiče.[2];[3]

Rušenou obětí jsou označovány rušené objekty neboli přijímače rušení. Zde je nutné zkoumat dva základní aspekty. Stupeň ovlivnění dle pevně daných EMC norem a jakým způsobem dochází k ovlivnění standardní činnosti zařízení. [3];[5]

Typická oběť:

- počítače, číslicová technika,
- radiokomunikace, navigační systémy,
- televizní přijímače,
- navigační a komunikační systémy,
- lékařské el. zařízení. [2];[3]

Jakékoliv elektronické zařízení je zdrojem elektromagnetického rušení a zároveň i jeho obětí neboli přijímačem. Aby bylo možné si lépe představit, jak mohou vypadat případná kritéria definující Mezinárodní elektrotechnický slovník ČSN IEC 50 pro kterékoli elektronické zařízení, je zde k dispozici Obr. 3. Tento obrázek představuje vysvětlivku k některým základním pojmům, jako jsou maximální úroveň, mez pro odolnost a vyzařování. [1]



Obr. 3 Definice úrovní a mezí vyzařování [3]

Úroveň vyzařování představuje signál, který si lze představit jako rušení naměřené na elektrickém zařízení v rámci testování EMI. Každé měření by mělo probíhat předepsaným způsobem dle přesně definovaných kritérií příslušné normy. Naměřená úroveň vyzařování se udává v jednotce dBm. [3]

Mez vyzařování jedná se o maximální přípustnou normou akceptující úroveň vyzařování, kterou je možné naměřit na testovaném zařízení. Během testování EMI nesmí dojít k dosažení této úrovně. V případě naměření mezní hodnoty zařízení automaticky neprojde zkouškami EMI. [3]

Úroveň odolnosti je hodnota představující nejvyšší dosaženou úroveň rušení při zkoušce EMS působící na dané zařízení. V průběhu rušení touto úrovní ještě nedochází k negativnímu ovlivnění primární činnosti testovaného zařízení. [3]

Mez odolnost je definována příslušnou normou pro dané zařízení a představuje nejnižší akceptovatelnou úroveň odolnosti. Rozdíl mezi úrovní udává rezervu návrhu zařízení z hlediska jeho odolnosti. Rozdíl mezi úrovní odolnosti a mezí odolnosti představuje tzv. rezervu návrhu zařízení z hlediska EMS. Rozdílem mezi odolnosti a vyzařování představuje tzv. celková rezerva EMC. [3]

Poslední podstatným údajem, který je možné vidět na Obr. 3, je kompatibilní úroveň. Tuto hodnotu lze definovat komplexně jako maximální úroveň celkového rušení, při kterém nedochází k ovlivnění elektrických zařízení provozovaných v určitých podmínkách. [3]

1.1 Elektromagnetická interference

Elektromagnetická interference je obor zabývající se elektromagnetickým rušením, které je vytvářeno potencionálním zdrojem rušením. Tento generovaný signál je dále přenášen prostřednictvím galvanické vazby do rušeného systému. Vzniklé rušení může negativně ovlivnit požadovanou činnost daného systémů například zhoršení nebo omezení efektivního výkonu. Důvodem měření elektromagnetické interference je snaha odhalit zdroj rušení a následně jej eliminovat, aby byla zajištěna bezproblémová funkčnost ostatních elektronických systémů, které se nachází v bezprostřední blízkosti. Konkrétně se tento obor zabývá identifikací zdroje rušení, identifikací všech vazebních cest, měřením a popisem rušivých signálů. [2];[5]

Elektromagnetická interference se zabývá měřením intenzity a příčiny zdroje elektromagnetického rušení. Měření intenzity rušení probíhá na různých frekvencích, zobrazením časového průběhu měřeného signálu a jeho frekvenčního spektra. Změřené hodnoty a popis rušivých signálů je následně porovnán s požadavky příslušných norem, které definují přijatelné mezní úrovně rušení pro konkrétní systém. [3]

Primárním úkolem EMI je:

- Měření rušení
- Identifikace zdroje rušení
- Charakteristika a popis rušení
- Identifikace přenosových cest [3]

Elektromagnetická interference se, jak již bylo vysvětleno výše zaměřuje na měření zdrojů rušení a přenosových cest. Z toho důvodu lze tento obor dále rozdělit na dvě odvětví:

- Měření elektromagnetického pole prostřednictvím anténní techniky uvnitř stíněných bezodrazových EMC laboratoří.
- Měření elektromagnetického vyzařování na napájecích a datových vedení. [4]

Jelikož se tato práce zabývá převážně měřením elektromagnetické interference, je této problematice věnována celá kapitola č. 2 Rušivé signály.

1.2 Elektromagnetická susceptibilita

Druhým odvětvím elektromagnetické kompatibility je odolnost systému vůči rušivým signálům. Tento obor se zabývá elektromagnetickou citlivostí a celkové odolnosti proti působení nežádoucího signálu v blízkém okolí. Cílem je zajistit systému bezporuchovost a stabilní funkčnost bez ohledu na prostředí, ve kterém se zařízení vyskytuje. K odstranění důsledků vyzařovaného elektromagnetického rušení lze docílit využitím různých druhů stínících technik. [2]

Elektronická zařízení musí být konstruována tak, aby snesla určitou úroveň rušení. Hlavní odpovědnost disciplíny EMS tedy spočívá v:

- klasifikaci rušení,
- definice požadavků na citlivost elektronických zařízení, definice určitých,
- zkoušek k prokázání citlivosti zařízení (tyto testy musí být přesně definovány, aby byla zajištěna jejich opakovatelnost a informační hodnota). [2]

Elektromagnetickou susceptibilitu je možné dále rozdělit dle dvou kritérií. V prvním případě se jedná o kvantitativní kritérium, které představuje schopnost zařízení odolat danému množství rušivých signálů. Při tomto počtu rušivých signálů je zařízení schopno zachovat si své funkční vlastnosti (není narušen primární funkčností systému). Kvantitativní kritérium se v praxi příliš nepoužívá, více využívané je kvalitativní kritérium. [3]

Při měření EMC se nejčastěji používá kvalitativní kritérium zkoumající ovlivnění systému po přijetí rušivých signálů. Vliv rušivého signálu na zařízení může být různý, a proto existují pevně dané požadavky na zachování systému po přijetí rušivého signálu. [3]

Z tohoto důvodu se v praxi kvalitativní kritérium rozděluje na 5 bodů:

- Funkční kritérium A – Testované zařízení vystavené rušivému signálu musí být schopné pokračovat ve své obvyklé činnosti. Podstatou tohoto kritéria je žádná tolerance vůči zhoršení funkčních vlastností nebo dokonce celkové ztrátě funkce testovaného systému.
- Funkční kritérium B – Testované zařízení během působení rušivého signálu může projevit mírné známky rušení, ale po odstranění rušivého signálu musí být plně funkční. Není zde tolerována zhoršená činnost systému nebo ovlivnění dat v paměti systému.

- Funkční kritérium C – Testované zařízení vystavené rušivým signálem je negativně ovlivňováno v jedné nebo ve více funkcích. Dochází zde k úplné ztrátě funkce vlivem rušení nebo je funkce plněna s částečnými výpadky, které často doprovází systémové zpoždění. Po odstranění rušivého signálu se systém automaticky vrátí do své obvyklé činnosti. Nedochází zde k trvalé poruše vlivem dočasného rušení.
- Funkční kritérium D – Testované zařízení vystavené rušivým signálem je negativně ovlivňováno v jedné nebo více primárních funkcích. Vlivem rušivého signálu dochází k úplné ztrátě funkce, nebo jsou funkce plněné s poruchami. Následky pro zařízení jsou fatální a po ukončení rušení nejsou automaticky obnoveny funkce systému. Pro obnovení základní činnosti je nutný zásah uživatele.
- Funkční kritérium E – Testované zařízení vystavené rušivým signálem je negativně ovlivňováno v jedné nebo více primárních funkcích. Dochází k úplné ztrátě funkce, nebo jsou funkce plněné s poruchami. Po ukončení rušení dochází k trvalým škodám na zařízení a je nutná oprava, aby mohl být obnoven provoz. [2];[3]

1.3 Normy

Hlavním klíčem k měření elektromagnetické kompatibility je pomocí měřících metod nejprve nalézt a následně definovat přípustné meze z pohledu elektromagnetické interference i susceptibility. K určení, zda naměřené hodnoty splňují vymezená kritéria, slouží soubor doporučení a norem. Tyto normy musí splňovat každý elektronický výrobek před vydáním výrobku na trh. Normy nedefinují pouze přípustné meze a limity, ale i metodické postupy měření a zkoušek odolnosti. [2]

1.3.1 Standardy a legislativa

Každý stát má odlišné zákony týkající se elektromagnetické kompatibility. Tyto odlišnosti v zákonech a standardech jsou způsobeny jinými bezpečnostními podmínkami, a především používáním jiných technologií.

V rámci EU platí, aby zařízení mohlo být uvedeno na trh, musí být opatřeno značkou CE, která znamená, že zařízení odpovídá normám pro evropská elektronická zařízení. Tyto normy musí být právně závazné normy nebo předpisy. [2];[4]

- Nařízení vlády 117/2016 Sb. o posuzování shody výrobků z hlediska elektromagnetické kompatibility při jejich dodávání na trh.

- Nařízení vlády 426/2016 Sb. o posuzování shody rádiových zařízení při jejich dodávání na trh. [2]



Obr. 4 Značka shody EU [2]

Pro oblast elektromagnetické kompatibility je nejvyšším normalizačním orgánem Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC), která byla založena roku 1904. Tato komise je součástí celosvětového normalizačního procesu, který koordinuje Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO). Součástí této Mezinárodní elektrotechnické komise je specializovaný výbor zaměřený převážně na rádiové rušení, jehož zkratkou je CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques). Tato komise vydává celosvětově platná doporučení, která jsou následně implementována do národních norem. V rámci problematiky elektromagnetické kompatibility jsou nejdůležitější výbory výše uvedených organizací. [1];[2];[3]

Evropské požadavky na zkoušky EMC

Evropská směrnice EMC je typická oproti Americkým předpisům (FFC) především tím, že kromě požadavků na vyzařování zahrnuje požadavky na odolnost. Dalším rozdílem je, že směrnice se bez výjimky vztahuje na všechna elektrická/elektronická zařízení. Neexistují žádné výjimky – směrnice EMC se vztahuje i na žárovku. Směrnice však vylučuje zařízení, na která se vztahuje jiná směrnice s ustanoveními o EMC, jako je směrnice pro automobilový průmysl. [1];[4]

V Evropě je obecnou normou pro vyzařování rušení EN 61000-6-3. Tato norma specifikuje limity a frekvenční rozsahy, které musí být uplatněny, když není k dispozici žádná vhodná produktová norma. Produkt testovaný v laboratoři EMC bude pravděpodobně splňovat jeden z následujících produktových standardů: [2]

- EN 55011 (průmyslové, vědecké a lékařské přístroje),
- EN 55014 (domácí elektrická zařízení jako vrtačky, mixéry atd.),
- EN 55015 (osvětlovací zařízení)
- EN 55032 (multimediální zařízení). [2]

1.4 Vliv elektromagnetické kompatibility

S vlivem elektromagnetické kompatibility se lidstvo setkalo již před mnoha lety. Z některých literárních pramenů je patrné, že se tak stalo ještě před právním popsáním samotné elektrické energie. Jeden z prvních zaznamenaných případů nehody, jejíž příčina byla později přikládána elektrické kompatibilitě, je výbuch skladu se střelným prachem. K tomuto výbuchu nejspíše došlo vlivem přeskočení jiskry na strojním zařízení. Jelikož tyto sklady obsahovaly velké množství střelného prachu, velmi často tedy docházelo k podobným výbuchům. [2]

Další následky elektromagnetické kompatibility vznikaly ve velké míře v leteckém průmyslu. Historicky významným případem je havárie armádního bombardéru v roce 1982. Tehdy došlo k selhání řídicích systémů vlivem intenzivního radiového rušení. Rušení měl na svědomí velmi výkonný radiový vysílač. [2]

Letoun Northrop B-2 Spirit

Tzv. neviditelný letoun Northrop B-2 Spirit je poměrně novodobá technika v armádě využívající technologii Stealth. Tento letoun je konstrukčně sestaven způsobem, aby byl zamezen přímý odraz elektromagnetických vln od radarů. Motory jsou realizované způsobem minimálního vyzařování tepla kvůli zamezení odhalení prostřednictvím infračervených detektorů. Tento letoun navíc využívá vlastní aktivní rušící zařízení na oklamání těchto radarů. [2]



Obr. 5 Armádní letoun Letoun Northrop B-2 Spirit [7]

Lékařství

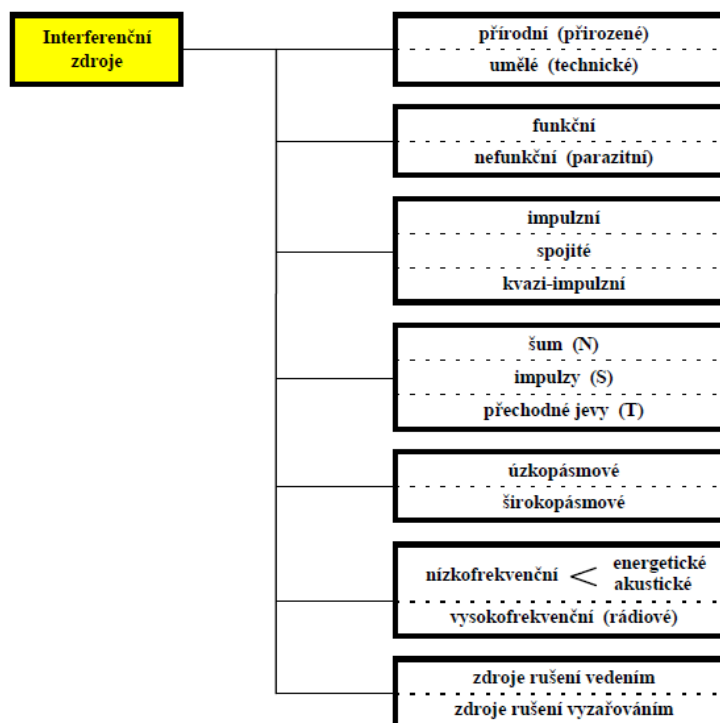
Vliv elektromagnetické kompatibility byl velkým problémem i na jednotce intenzivní péče v Praze u kriticky nemocného pacienta napojeného na přístroj, který monitoroval srdeční tep, dech a tělesnou teplotu. Přístroj neustále alarmoval personál nemocnice kvůli častým srdečním arytmiím pacienta. Po kontrole lékaře se však ukázalo, že se jedná o falešný poplach a srdeční činnost pacienta byla v pořádku. Chybu měření způsobovaly rušivé signály ovlivňující přístroj měřící srdeční tep. Okolní vysokovýkonné spotřebiče vyvolávaly přídatné pulsy, které kardioskop přijímal a vyhodnocoval jako srdeční arytmiie. Ukázalo se, že rušícím přístrojem byl startér osvětlení poblíž ležícího pacienta, který spínal v sekundových periodách. Nemocnice byla donucena pořídit svítidla od jiného výrobce. [2]

Autodoprava a EMC

Zavedení testů v oblasti elektromagnetické kompatibility se velmi rozšířilo s přibývajícím rozvojem elektrotechniky v domácnostech a dopravě. Velmi významnou oblastí je pro lidstvo možné označit oblast dopravní elektrotechniky, neboť většina obyvatelstva v dnešní době se denně setkává s tímto druhem techniky nebo jej využívá. V případě zanedbání testů v dopravě by mohlo dojít k rapidnímu nárůstu selhání řídicích a navigačních přístrojů, což by se velmi negativně projevilo. Především by došlo k nárůstu nehod a následnému nárůstu úmrtnosti v dopravních prostředcích. [2]

2 RUŠIVÉ VYZAŘOVÁNÍ

V oblasti elektrotechniky lze považovat téměř každé elektronické zařízení a podobné systémy jako potencionální zdroj i příjemcem elektromagnetického rušení. Tyto aspekty zařízení mohou mít poměrně stejný negativní dopad na chod systému, ale převážně často si veřejnost spojuje s EMC zařízení, kde ve větší míře převažuje schopnost generování rušivých signálů nad schopností přijímat rušivé signály. V tomto případě lze tvrdit, že se jedná o interferenční zdroj neboli zdroj elektromagnetického rušení. Tyto zdroje se dále mohou dělit na více druhů a mohou mít odlišné vlastnosti. Pro přehled základních interferenčních zdrojů slouží Obr. 6. [3];[5]



Obr. 6 Interferenční zdroje [3]

2.1 Rozdělení signálů

Signál v technice je fyzikální jev závislý na čase obsahující určitou informaci. Každý měřený signál v oblasti elektromagnetické kompatibility může vykazovat různé vlastnosti a jednotlivé signály se mezi sebou mohou lišit. K tomu aby, člověk dokázal pochopit měřený signál a vhodně jej popsal je nutné seznámit se s různými druhy signálů. Základním rozdělením signálu je podle ohraničení časové osy. Zde mohou nastat jen dvě varianty, a to

signál s konečným průběhem nebo průběhem nekonečným. Příkladem nekonečného signálu je nejčastěji periodický signál. [3]; [8]

2.1.1 Determinované signály

Lze je charakterizovat jako známé (nenáhodné) signály popisující námi známou přenášenou informaci. Lze je popsat funkcí času. Rozdělují se na signály mající periodických průběh, tyto signály se dále dělí na harmonický nebo neharmonický, a v opačném případě může být i neperiodický signál. [3];[4]

2.1.2 Stochastické signály

Tento druh signálu je charakteristický tím, že nelze popsat funkcí času. Stochastický průběh se dále rozděluje na stacionární (nejsou závislé na pozici počátku časové osy) a pravým opakem jsou signály nestacionární (jsou závislé na počátku časové osy). Hodnoty u Stochastických signálů v libovolném okamžiku lze přibližně určit pouze přibližnou pravděpodobností. [3];[4]

2.2 Vazební mechanismy

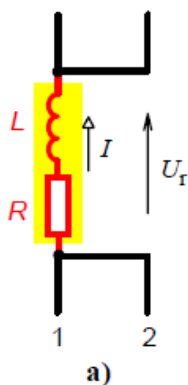
Každé rušení vzniká z různých příčin a označuje se zdrojem rušení. Za zdroj rušení je považováno vzniklé rušení prostřednictvím cesty šíření přijít do blízkosti zařízení citlivého na rušení neboli oběti rušení. Samotné šíření rušivých signálů je nejvíce významné v oblasti EMC. Rušivé signály se mohou přenášet čtyřmi způsoby: [5];[6]

- bezdrátový způsob,
- po vedení,
- prostřednictvím vazeb,
- vyzařováním. [3]

2.2.1 Galvanická vazba

Jinak nazývaná také vazba společnou impedancí je druh elektromagnetické vazby vznikající při uzavřené proudové smyčce na vodičích, nebo elektrických bloků propojenými vodiči. Tedy je nutné, aby součástí systému byly přítomny propojovací vodiče. Může se jednat například o datové přenosové kabely nebo napájecí kabely. Nutnou podmínkou ke vzniku vazby je společná impedance mezi těmito prvky. Již zmíněná impedance má charakter RL obvodu a vzniká např. společným přívodem informačních kabelů, vnitřní impedancí

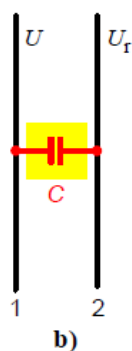
napájecího zdroje, společného zemnicího řešení apod. Galvanická vazba v elektrických systémech nižších kmitočtů (v pásmu kHz), je převážně ovlivněna odporovou složkou R . Naopak v případě vyšších kmitočtů procházející vodiči se nejvíce projevuje induktivní složka L . Galvanické rušení lze rozdělit na symetrické vedení a vedení nesymetrické. V případě symetrického galvanického rušení dochází mezi dvěma vodiči k vyvolání nežádoucího rušivého zdroje napětí. [3]



Obr. 7 Galvanická vazba [3]

2.2.2 Kapacitní vazba

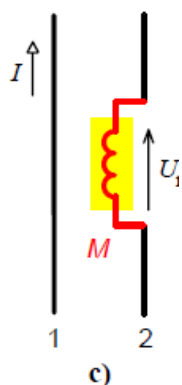
Nastává v okamžiku, kdy jsou v bezprostřední blízkosti od sebe vzdáleny dva nebo více vodičů. Nemusí se však jednat jen o vodiče, neboť kapacitní vazba vzniká i u jednotlivých obvodů a plošných spojů. Vzniká v důsledku expanze parazitních kapacit mezi rušenou a rušící částí. [3];[5]



Obr. 8 Kapacitní vazba [3]

2.2.3 Induktivní vazba

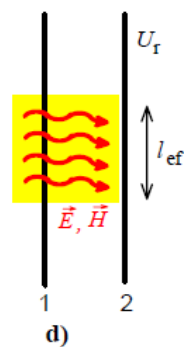
K induktivní vazbě dochází na napájecích vodičích u elektrických zařízení. V případě, že vodičem prochází elektrický proud, dochází zároveň k tvorbě elektromagnetického pole v bezprostřední blízkosti vodiče. Pokud se v okolí vytvářeného elektromagnetického pole prvního vodiče vyskytuje druhý vodič, může docházet k vzájemnému indukovaní rušivého napětí. Zásadní vliv na funkčnost daného systému mají induktivní vazby v případě náhlých změn. Těmito změnami může být například bleskový výboj. [3]



Obr. 9 Induktivní vazba [3]

2.2.4 Vyzařování

Jedním z dalších nečastějších typů vazby je vazba vyzařovací. Oproti předchozím případům se tato vazba může projevovat i na větší vzdálenost. Principiálně se jedná o téměř stejný druh rušení jako v případě induktivní vazby, ale hlavním rozdílem je přenosová vzdálenost elektromagnetické vlny rušivého signálu. Vznikající rušení u elektrických systémů je způsobeno vysíláním elektromagnetických vln z jednoho zařízení do druhého, které se vyskytuje v jeho blízkosti. V praxi se nejvíce projevuje tento druh rušení u komunikačních zařízení, vysílačů apod. Nejčastějšími rušenými zařízeními jsou tedy radiové přijímače, které jsou velmi náchylné na elektromagnetické rušení. [1];[2]

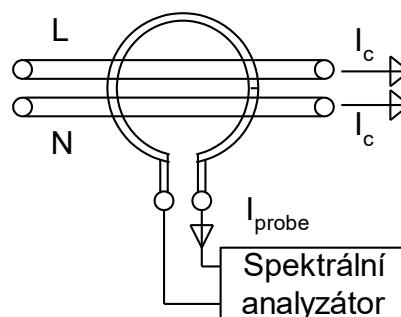


Obr. 10 Vyzařovací vazba [3]

Možnost, jak eliminovat následky vzniklé vyzařovaným rušením, je použití vhodného stínění. Stíněním docílíme zeslabení vyzařovaných elektromagnetických vln, neboť stínící materiál elektromagnetickou vlnu z části absorbuje a z části odrazí. Rušení způsobené vyzařováním elektromagnetických vln se může negativně projevit i na vyzařujícím zařízení, tedy zdroji vyzařování. Při eliminaci stínícím materiálem je zařízení ve většině případech obaleno, tedy využívají se kryty nebo přepážky s výběrem vhodného stínícího materiálu. [3];[5]

2.3 Vyzařování na vedení

K měření vyzařování na vedení slouží nástroje, jako jsou napěťové a proudové sondy připojené k osciloskopu, nebo k spektrálnímu analyzátoru. Tato zařízení jsou schopná měřit elektromagnetické vyzařování vodičů. Podle těchto výsledků je možné posoudit, zda je nutné použít filtr, který potlačuje tzv. harmonické proudy, tj. vysokofrekvenční proudy procházející napájecími vodiči L a N ve stejném směru. [1];[6]



Obr. 11 Měření dvou vodičů pomocí smyčkové antény [1]

V případě, že je fyzická délka vedení mnohem menší, než je délka vlny, můžeme intenzitu elektrického pole vyzařovanou dvěma vodiči protékányi souhlasným proudem I_c vypočítat

podle vztahu (1). Tento vztah by se odvodil aplikací vztahu pro elektrickou intenzitu vyzařovanou Hertzovým dipólem (elektricky krátkou anténou). [1]

$$E = 4\pi 10^{-7} \frac{I_c L f}{d} = 4\pi 10^{-7} \frac{\left(\frac{I_{probe}}{2}\right) L f}{d} \quad (1)$$

I_c ... souhlasný proud [A]

L ... délka vodiče [m]

f ... kmitočet [Hz]

d ... vzdálenost [m]

V případě, že bude délka vedení srovnatelná nebo delší jak délka vlny, tak bude vyzařování popsáno složitějšími vztahy. Tyto lze nalézt v literatuře pojednávající o drátových anténách. Tuto problematiku lze nalézt například v monografii. [1]

Huygensův princip

V případě nutnosti matematického výpočtu EMI rušivého vyzařování se využívají simulační programy, které při výpočtu používají Huygensova principu (vycházející z Maxwellových rovnic). Pomocí tohoto principu lze provést přepočít známého elektromagnetického pole do větší vzdálenosti. K tomu je nutné znát tečné složky elektrické a magnetické intenzity na ploše uzavírající simulované elektronické zařízení. Matematický zápis Huygensova principu popisuje rovnice (2). [1]

$$\mathbf{E}_\vartheta^f = \sum_{nc=1}^{Nc} \left[-\frac{jk}{4\pi} Z_0 \int_{cel \ln nc} \mathbf{J}_{eq}^{nc}(x, y) \cdot \mathbf{T}_{xyz_\vartheta} \frac{e^{-jk(r+\Delta_{nc})}}{r} dS \right] + \left[-\frac{jk}{4\pi} \int_{cel \ln nc} \mathbf{K}_{eq}^{nc}(x, y) \cdot \mathbf{T}_{xyz_\phi} \frac{e^{-jk(r+\Delta_{nc})}}{r} dS \right] \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_\phi^f = \sum_{nc=1}^{Nc} \left[-\frac{jk}{4\pi} Z_0 \int_{cel \ln nc} \mathbf{J}_{eq}^{nc}(x, y) \cdot \mathbf{T}_{xyz_\phi} \frac{e^{-jk(r+\Delta_{nc})}}{r} dS \right] + \left[-\frac{jk}{4\pi} \int_{cel \ln nc} -\mathbf{K}_{eq}^{nc}(x, y) \cdot \mathbf{T}_{xyz_\vartheta} \frac{e^{-jk(r+\Delta_{nc})}}{r} dS \right] \quad (3)$$

$$[T_{ca_sp}] = \begin{bmatrix} T_{xyz_r} \\ T_{xyz_\vartheta} \\ T_{xyz_\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \vartheta \cos \phi & \sin \vartheta \sin \phi & \cos \vartheta \\ \cos \vartheta \cos \phi & \cos \vartheta \sin \phi & -\sin \vartheta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{eq}^{nc} = \mathbf{z} \times \mathbf{H}^R = (\mathbf{k}_r \times \mathbf{E}^R) / Z_0 \quad (5)$$

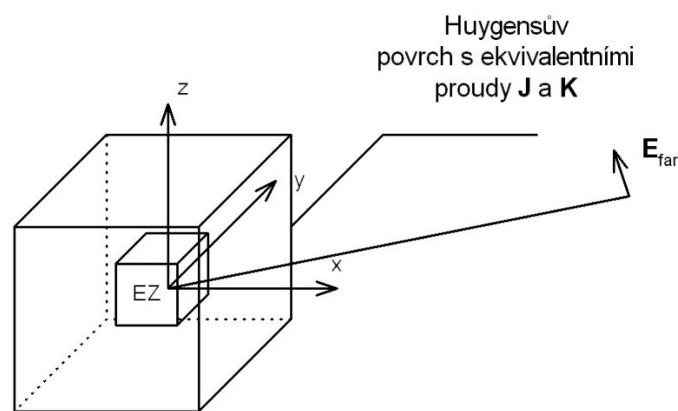
$$\mathbf{K}_{eq}^{nc} = -\mathbf{z} \times \mathbf{E}^R \quad (6)$$

Kde

J ... hustota elektrického vodivého proudu (ekvivalentní elektrický proud)

K ... hustota magnetického proudu (ekvivalentní magnetický proud)

r ... vzdálenost bodu pozorování P v globální soustavě souřadnic



Obr. 12 Schematické znázornění Huygensova principu [1]

T ... transformační funkce

$e^{-jkr/r}$... Greenova funkce

S ... uzavřená plocha

NF ... blízké pole (near field)

FF ... vzdálené pole (far field)

Kde vzdálenost, kde se nachází vzdálené pole r_{FAR} , je možné vypočítat dle vztahů (7) nebo (8).

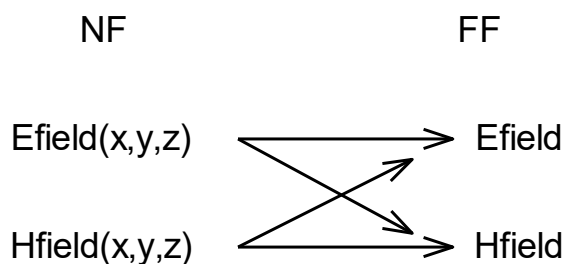
$$r_{FAR_diode} = \lambda / (2 * \pi) \quad (7)$$

$$r_{FAR_reálný_zdroj} = 2 * D * D / \lambda \quad (8)$$

D je největší rozměr zařízení, jehož vyzařování měříme.

Pro výpočet vzdálené zóny přitom použijeme z rovnic (7) a (8) vždy tu rovnici, podle které vychází větší hodnota r_{FAR} . Například pro zařízení s rozměrem $D=0.3$ metru a pro nejvyšší měřený kmitočet $f=3$ GHz vychází vzdálená zóna dle vztahu (8) ve vzdálenosti $r_{FAR}=1.8$ metru. Naopak pro nejmenší kmitočet $f=30$ MHz (který předepisují normy CISPR 32) vychází vzdálená zóna $r_{FAR}=1.6$ metru (dle vztahu 7). [1]

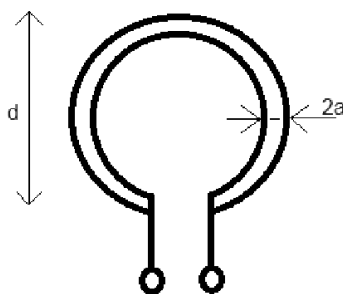
V disciplíně EMI se zajímáme o intenzitu elektrického pole ve vzdálenosti $R=3$ m nebo $R=10$ m, pokud se testuje v anechoické komoře. Dle Huygensova principu lze pozorovat, že k intenzitě elektrického pole ve vzdálené oblasti přispívá jak intenzita elektrického pole, tak intenzita magnetického pole (viz Obr 13). Podobně k intenzitě magnetického pole přispívá jak intenzita elektrického pole, tak intenzita magnetického pole. [1];[4]



Obr. 13 Přepočítání elektromagnetického pole z blízké do vzdálené zóny [13]

E a H sondy

V konstrukční praxi je třeba u vyvíjených zařízení měřit elektrické a magnetické pole produkované těmito zařízeními. Většinou se jedná o pole, které se vyskytuje v tzv. blízké zářivé zóně elektrického zařízení. Pro tento případ je nutné znát tzv. anténní faktory elektrické (E-sondy) a magnetické (H-sondy). [3]



Obr. 14 Konstrukce sondy [1]

d ... průměr smyčky [m]

a ... poloměr vodiče smyčky [m]

Anténní faktory jsou definovány následovně:

$$U_2 = AF \cdot E \quad (9)$$

Kde,

AF je anténní faktor

U_2 ... napětí na svorkách antény, pokud je anténa přizpůsobená

E ... intenzita elektrického pole [V/m].

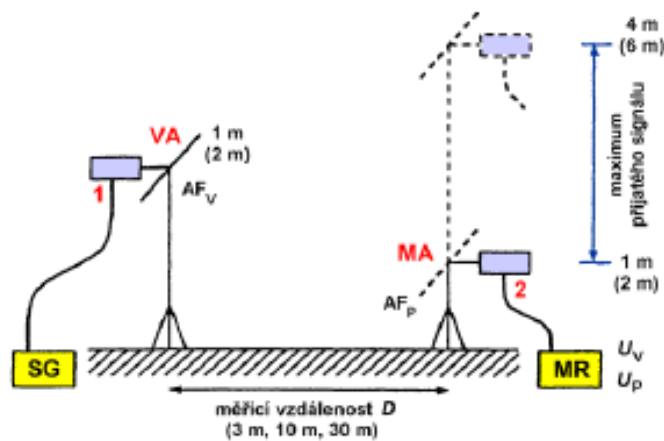
V oblasti EMC a v oblasti měření antén se rovnice (9) nejčastěji vyskytuje v decibelovém vyjádření (10).

$$U_2[\text{dB}\mu\text{V}] = AF[\text{dB}] + E[\text{dB}\mu\text{V}] \quad (10)$$

2.4 Měření pomocí antén

V praxi se obvykle používají antény BiLog ve frekvenčním rozsahu do 1 GHz spolu s nastavením IF filtru na 120 kHz. V případě měření frekvencí nad 1 GHz se obvykle používá trychtýřová anténa a mezifrekvenční filtr přijímače EMI je přepnut na šířku pásma 1 MHz. Podle příslušných norem se také obvykle používají různé detektory na frekvencích nad 1 GHz. Zatímco ve frekvenčním rozsahu od 30 MHz do 1 GHz je nutné použít detektor QuasiPeak na frekvencích vyšších než 1 GHz se společně používají detektory MaxPeak a Average. Normy také předepisují odlišné limity pro použití detektoru MaxPeak a Average detektory zvlášť. Při měření na frekvencích vyšších než 1 GHz je další rozdíl v tom, že místnost musí být zcela bezodrazová, tj. absorbéry musí být umístěny i na podlaze místnosti.

[2]



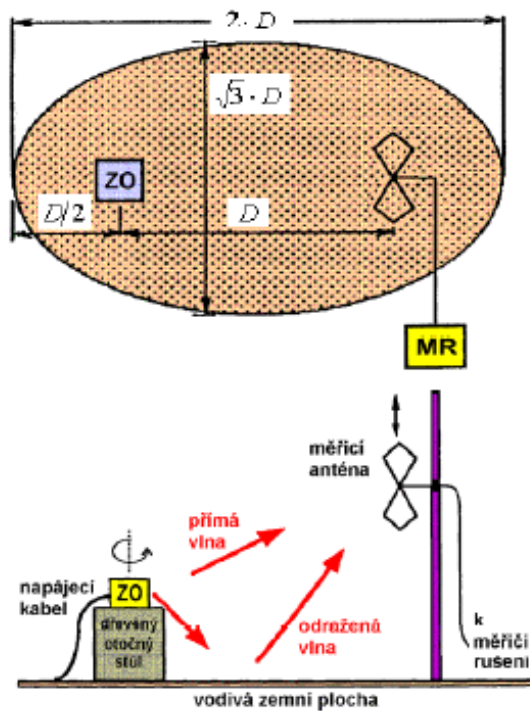
Obr. 15 Princip měření anténou na volném prostranství [Svačina]

Na obrázku č. 15 lze pozorovat typické měření EMI v praxi, kde měřicí vzdálenost označená D představuje normou nařízenou délkou pro EMC zkoušku. Pod zkratkou VA je vyzářovací anténa, kterou lze označit testované zařízení a MA je naopak anténa měřicí.

Metodika měření prostřednictvím anténní techniky je založená na tom, že máme známou snímací anténu zpravidla Bilogarithmicko-periodickou v pásmu 30 MHz až 2 GHz nebo trychtýřovou v pásmu 2 až 18 GHz. Touto anténou se známými parametry a známým anténním faktorem měříme prostřednictvím vhodného v dnešní době většinou plně automatickém systému (v tomto případě EMC 32) intenzitu elektrického pole. Testování probíhá dle vzdáleností udávané normami. Dle použití vybavení dostupného v EMI laboratoři ve Zlíně je možné provést měření v semi-anechoické komoře se vzdáleností 3 nebo 10 m, dle aktuálně platných norem pro multimediální zařízení CISPR 32. Výsledek toho snímání je určený tím, co se v komoře nachází a jestli jde o měření v zcela bezodrazové (anechoické) nebo částečně bezodrazové (semi-anechoické) komoře.

Při měření elektromagnetického vyzářování přijímací anténa může přijímat dva signály. Prvním je přímý signál vycházející přímo z měřeného zařízení. Druhým signálem je odražený, který se při dopadu na vodivou zem odráží. Z toho důvodu výsledek měření silně závisí na vzdálenosti mezi anténami a silně závisí na výšce antény. Výška přijímací antény se v průběhu měření musí neustále měnit většinou v rozsahu 1 až 4 m. Proměnlivá výška přijímací antény zajistí, aby se při měření přijímala jen odražená vlna ve fázi. Což v případě antény, která nemá možnost měnit svou výšku není zcela zaručeno. Celá zkušební laboratoř disponuje absorbéry na vnějších stranách místnosti, kromě podlahy, aby bylo zajištěno dobrých měřících vlastností uvnitř EMC komory. Případně lze umístit přídavné absorbéry i

na podlahu při nutnosti měření v anechoických podmínkách (měření v pásmu 1 GHz a více).
[3]



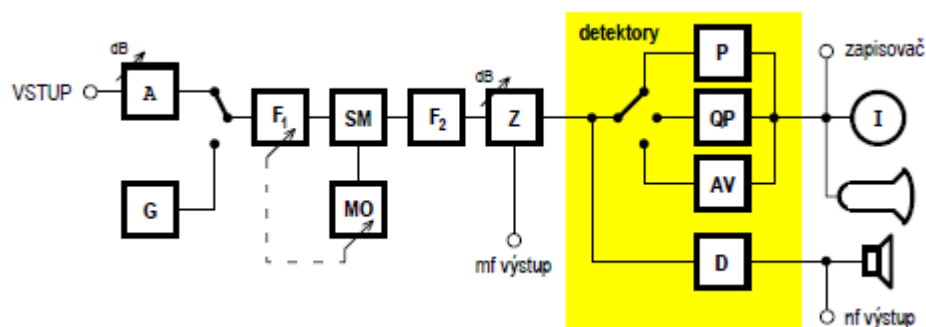
Obr. 16 Měřené zařízení anténou [3]

Zde se jedná o obdobný obrázek, kde je tentokrát měřené zařízení označené pod zkratkou ZO (zkoušený objekt) a je zde uveden i dřevěný otočný stůl, který je dle norem nutnou součástí zkoušek EMC.

3 ZPŮSOB MĚŘENÍ

Cílem měření je nejen naměřit hodnoty elektromagnetického pole, ale i elektrických veličin (elektrického napětí a proudu). Zkoumanou oblastí v rámci elektromagnetické kompatibility je především el. interference neboli schopnost posuzovaného systému generovat rušící signály. Primárním cílem měření je odhalit rušivé signály, identifikovat zdroj rušení, popsat rušivé signály a navrhnout omezení nebo zcela odstranit zdroj rušení. [3];[5]

Pro účely měření a vyhodnocení elektromagnetického pole se nejčastěji používají různé elektrické přijímače (detektory).



Obr. 17 Schéma měřiče rušení [3]

3.1 Typy detektorů

MaxPeak detektor (špičkový)

Špičkový detektor je konstrukčně navržený k měření maximálních vstupních hodnot rušivého signálu v rámci trvání jednoho kroku. Konkrétně v případě měření EMC zkoušek se jedná o maximální velikost napětí na výstupu mezifrekvenčního zesilovače.

Detektor MaxPeak vrací maximální hodnotu, která se vyskytla v průběhu měření na příslušném úseku pásma, bez ohledu na to, jak dlouho tento maximální interval trval. Tento detektor poskytuje nejvyšší úroveň, protože registruje jakoukoliv krátkou maximální výchylku vyskytující se v měřeném pásmu. MaxPeak poskytne představu o tom, jak se měřená interference mění v reálném čase. Špičkový detektor se při běžném testování příliš nevyužívá. Předepisují ho jen ty nejvíce náročné normy, jako například v případě měření elektromagnetických interferencí armádního vybavení. [2];[3]

Average (střední hodnoty)

Tento detektor vrací střední hodnotu amplitudy napětí měřeného rušivého signálu. Plní průměrující funkci měřeného signálu, tedy aritmetického průměru měřeného rušivého mezifrekvenčního napětí. Tento druh detektoru je vhodný pro měření úzkopásmových rušících signálů. Při měření EMC se často používá v kombinaci s umělou elektrickou sítí. [3]

QuasiPeak (kvazi-špičkový detektor)

Detektor QuasiPeak je předepsán mnoha normami, protože poskytuje přesnější informace o škodlivosti měřeného rušení. Pomocí detektoru QuasiPeak je možné naměřit hodnoty, které obsahují výsledky předcházejících detektorů MaxPeak a Average. Oproti předchozímu MaxPeak detektoru jsou měřené hodnoty napětí u QuasiPeak úměrné napětově-časové ploše mezifrekvenčního signálu. Měřená hodnota je tedy ovlivněna velikostí napětí i opakovacím kmitočtem rušivého napětí. Detekce probíhá vhodnou volbou nabíjecí a vybíjecí časové konstanty odehrávající se v kondenzátoru detektoru. V případě použití tohoto druhu detektoru je nutné počítat zpravidla s delší dobou měření, neboť se zde musí počítat s tím, že kondenzátor C se při měření mezi jednotlivými impulzy vždy částečně vybíjí. Průměrná doba měření se pohybuje v řádu hodin. Zatímco u předchozích MaxPeak a Average detektorů je přibližná měřicí doba v desítkách minut. [3]

3.2 Limity a funkční kritéria

Výsledkem testů EMC je závěrečné posouzení, zda dané zařízení splňuje daná kritéria, která předepisují různé normy. Míra rušení se obvykle vyjadřuje jako maximální intenzita elektromagnetického pole v předem určené vzdálenosti měření od testovaného zařízení nebo jako maximální napětí naměřené na svorkách zařízení. [5]

Protože elektrické a magnetické pole spolu úzce souvisí, ve většině případů stačí měřit pomocí antén citlivých na elektrickou složku elektromagnetického pole. V několika případech, kdy se vyskytnou nízkofrekvenční vysoké proudy, však může být měření magnetické složky pole předepsáno také příslušnými normami.

Jelikož naměřené intenzity elektrického pole se mohou lišit od $10 \mu\text{V/m}$ do 10V/m , dynamický rozsah testovacího přijímače musí být přiměřeně velký. To je také důvod, proč se zavádějí logaritmické jednotky. Většina limitů je pak vyjádřena v $\text{dB}\mu\text{V/m}$ v případě

elektrického pole a v dB μ A/m v případě magnetického pole. Jde tedy o logaritmus poměru mezi naměřeným napětím na svorkách antény a referenční úrovni, která byla dohodnuta. [2]

Obecně jsou limity stanoveny v rámci frekvenčních rozsahů, ve kterých je výskyt rušení očekávatelný. Pro různé rozsahy frekvencí mohou být předepsány různé limity. Limity pro rušení jsou vždy nižší než limity intenzit, které musí testované zařízení vydržet. Prostor mezi limity se nazývá bezpečná rezerva. [2]; [3]

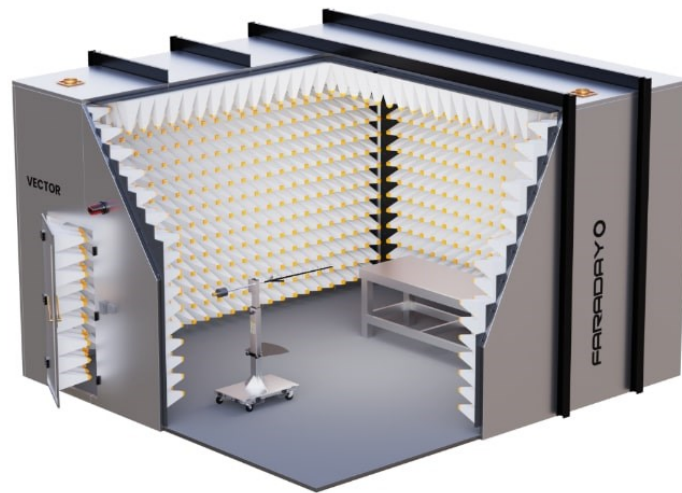
3.3 Měřící prostředí

Proces měření je nutno vykonávat k tomuto účelu ve vhodném prostředí. K účinnému měření emisí elektromagnetického pole je nutné zajistit prostředí, kde nebude testovaný systém vystaven dalším elektromagnetickým polím. V běžném prostředí mohou do měření vždy zasahovat téměř všudypřítomné signály vysílačů, mobilní sítě nebo WiFi. V ideálním měřícím prostředí by nemělo docházet k odrazům elektromagnetického pole, aby nedocházelo k chybnému měření. Podmínky uvnitř měřícího prostředí nesmí měnit své vlastnosti v čase. Nutno podotknout, že žádné prostředí pro měření není vždy plně ideální, jedná se pouze o snahu eliminovat rušící elementy a dosáhnout co nejlepších výsledků měření. [2]

Zajistit ideální prostředí není jediným důležitým aspektem. Stejně důležité je u měření zajistit vhodné fyzikální podmínky ohledně zdroje napájení samotného testovaného systému. Tímto způsobem je možné zamezit případnému rušení na svorkách. Měření by mělo probíhat s použitím tzv. umělých sítí se známou impedancí a frekvenční závislostí. [2]

3.3.1 Semi-anechoická komora

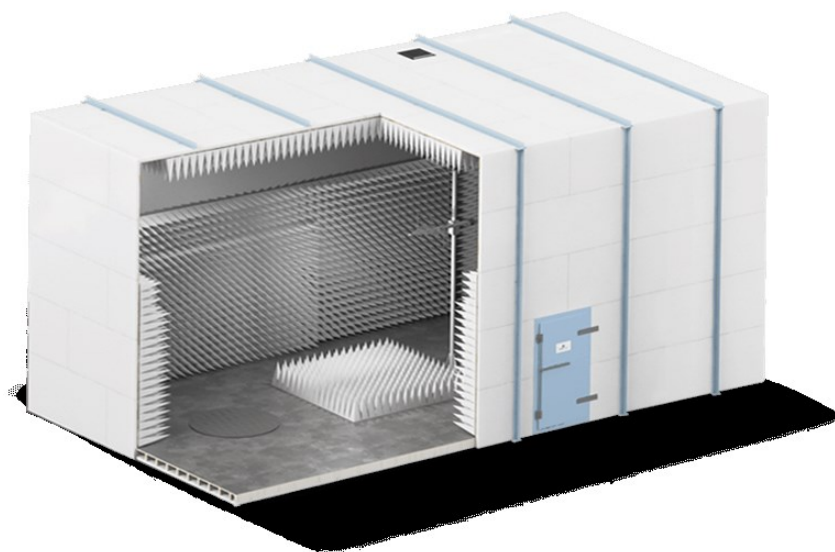
Jedná se o částečně bezodrazovou komoru. Tato komora simuluje přirozené venkovní prostředí, ve kterém však není přítomné žádné elektromagnetické rušení. K zamezení odrazu uvnitř komory jsou přítomny absorbéry umístěné na vnějších stranách komory. Měřené zařízení vyzářuje elektromagnetické pole v podobě vln, které měřící anténa zachytí přímo z vysílače společně s odraženou vlnou od podlahy (zde nejsou přítomny absorbéry). [3]



Obr. 18 Částečně bezodrazová komora [11]

3.3.2 Anechoická komora

Tato komora na rozdíl od semi-anechoické je zcela bezodrazová. Většina reálných komor pro měření elektromagnetické kompatibility jsou realizované téměř vždy jako semi-anechoické s tím rozdílem, že v případě nutnosti měření v anechoické komoře jsou na podlahu umístěny přídatné absorbéry. Tím lze dosáhnout požadavkům pro plně bezodrazové prostředí. V komoře je následně umístěn otočný stůl pro měřené zařízení, aby bylo možné měřit vyzařované charakteristiky ve všech směrech. [3]



Obr. 19 Bezodrazová komora [12]

3.4 Měřicí prostředky

V následující kapitole budou popsány základní měřicí nástroje používané při EMC zkouškách.

3.4.1 Antény

Antény patří mezi nejčastější vybavení každé laboratoře specializované na měření elektromagnetické kompatibility. Pro účely měření vlastností elektromagnetického pole se využívají různé, pro účel konkrétního druhu měření vhodné antény. Veškeré antény lze využívat v režimu vysílacím i přijímacím. Vzhledem k impedančnímu přizpůsobení antén jsou konstruované z pravidla se vstupní impedancí 50 ohm a rovněž 50 ohm na svém výstupu. Shodnou impedancí disponují i anténní propojovací kabely. Měření probíhá s ohledem na šířku pásma, která se u elektromagnetického pole pohybuje v rozmezí od 30 MHz do řádově desítek GHz. U zařízení sloužící pro vojenské účely probíhá měření již od stovek kHz. Z toho důvodu existuje široké množství druhů, které se odlišují svou konstrukcí pro preferovaný druh měření. [10]

Tab. 1. Seznam měřících antén [3]

Druh antény	Frekvenční rozsah [MHz]	Měřicí složka
Rámcová (smyčková) anténa	0,009 - 30	H
Prutová anténa(monopól)	0.009 - 30	E
Symetrické (laděné) dipóly	30 - 1000	E
Bikónická anténa	20 - 300	E
Logaritmicko-periodická anténa	200 - 3000	E
Kónicko-logaritmická anténa	200 - 3000	E
Složená širokopásmová anténa	30 - 2000	E
Trychtýřové antény	1000 - 40000	E, H

Atény lze dělit podle fyzikálního principu s ohledem na jejich citlivost vůči elektrickému pole nebo magnetickému poli. Nejčastěji se setkáváme s využitím antén s citlivostí na elektrickou složku pole, neboť nejčastěji se provádí měření na delší vzdálenost a s ohledem na odpor vzduchu (cca 370 Ω) je elektrická složka pole daleko výraznější. Antény zaměřené na magnetickou složku se používají u měření nízkofrekvenčních zařízení.

Bikonický dipól

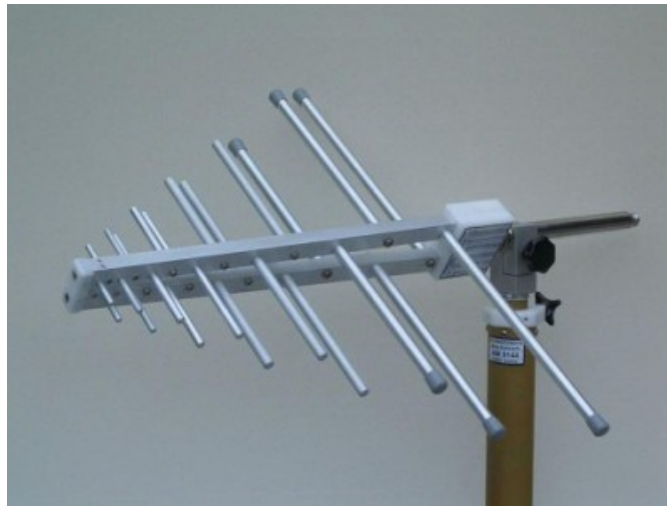
Tento druh antény je typický zejména svým tvarem, neboť ramena antény se rozšiřují do tvaru kužele. Při měření systémů ve frekvenčním rozsahu od 20 MHz až 300 MHz lze použít bikonický dipól, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 20 Bikonický dipól [13]

Logaritmicko-periodická anténa

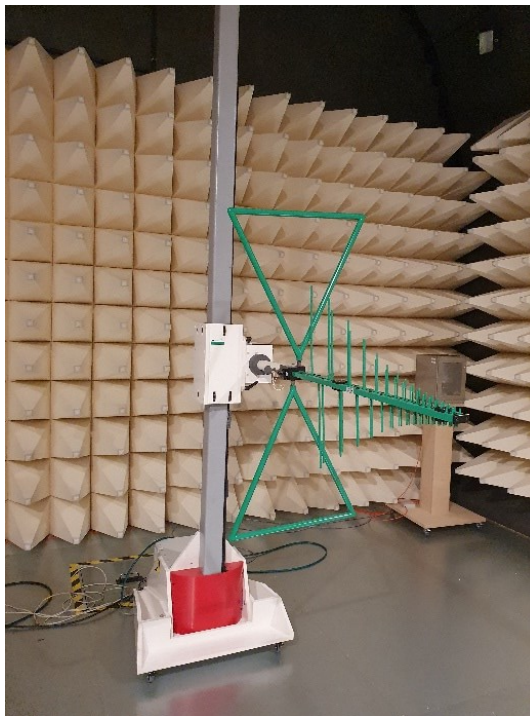
Pro frekvenční rozsah od 200 MHz do 1 GHz, respektive až do 3 GHz je vhodná logaritmicko-periodická anténa viz obr. 21.



Obr. 21 Logaritmicko-periodická anténa [14]

Bilogaritmicko-periodická anténa

Již zmíněné předchozí varianty antén lze kombinovat dohromady, a vytvořit tak bilogaritmicko-periodickou anténu (BiLog). Cílem této kombinace je získat vlastnosti obou antén a možnost měření ve frekvenčním rozsahu od 30 MHz do 2 GHz. [2]



Obr. 22 Bilogaritmicke-periodická anténa [zdroj: vlastní]

Základními parametry každé antény jsou:

- Elektrická impedance – Údaj napomáhající nalézt vhodný napájecí zdroj.
- Poměr stojatých vln – Tento parametr záleží na geometrickém uspořádání antény. V případě použití nesprávného typu antény pro určitou frekvenční oblast musíme počítat s tím, že může vznikat stojaté vlnění, které zatíží výstup vysokofrekvenčního zesilovače.
- Maximální vysílací výkon – Údaj o maximálním napájecím proudu, který negativně neovlivní funkci antény.
- Vyzařovací diagram [2]

3.5 Sondy

Anténní technikou lze měřit pouze za situace, kdy je měřené elektromagnetické pole vzdálené, tedy ve standardizované situaci. Vysílač a přijímač se nachází ve větší vzdálenosti od sebe a jsou tedy považovány za volné body v prostoru. Naopak v případě nutnosti měření elektromagnetického pole na krátkou vzdálenost, je velmi vhodné využít sadu sond pro měření blízkého pole. Tímto měřením lze přesněji detekovat a lokalizovat zdroj rušení. Funkčnost sondy spočívá na principu induktivní a kapacitní vazby. Měření pomocí sond

blízkých polí se nepoužívá pro certifikované měření, ale pro přesnou lokaci zdroje rušení, např. na desce plošných spojů, počítačových komponentech apod. [2];[3]



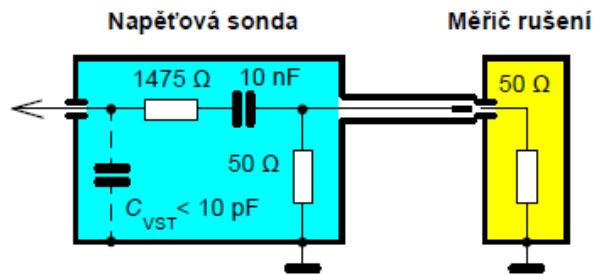
Obr. 23 Sondy pro měření rušení [15]

3.5.1 Měřicí nástroje rušení vedením

Tento způsob rušení vzniká u elektronických zařízení, která jsou zpravidla pro svou funkci propojena vždy vodičům, po kterých se může přenášet rušivý signál. Jedná se typicky o komunikační, napájecí a datové kabely apod. K identifikaci tohoto druhu rušení slouží následující pomůcky. [2];[3]

Napěťová sonda

Napěťová sonda je velmi jednoduché zařízení sloužící k měření napětí přímo v požadovaném místě na elektronickém zařízení. Používá se nejčastěji v případě nutnosti měření bez umělé sítě LISN, neboť lze měřit připojením napěťové sondy na konkrétní požadovanou část elektrického obvodu. Tato sonda je také velmi vhodná k měření vysoko impedančních obvodů, neboť kvůli těmto účelům disponuje napěťová sonda vysokou vstupní impedancí. Nejdůležitějším parametrem napěťové sondy je maximální přípustné vstupní napětí, na které může být sonda připojena. Konstrukční vlastnosti napěťové sondy umožňují provádět měření EMC u elektrických systémů nepřekračující maximální střídavé napětí 250 V. [3];[5]

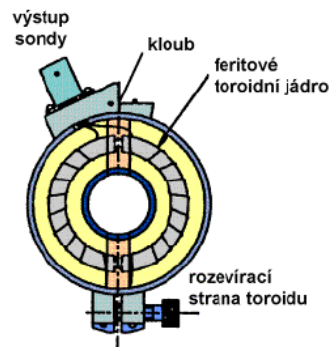


Obr. 24 Napěťová sonda Svačina [3]

Proudová sonda

Jako proudovou sondu lze označit svorku ve formě uzavřené smyčky, kterou lze obepnout kolem vodiče, kterým protéká elektrický proud. Konstrukčně je proudová smyčka sestavena velmi obdobně, jako u jedno závitového transformátoru, kde sekundární vinutí tvoří proudová sonda. Smyčka slouží k měření elektrického proudu bez nutnosti přerušit vedení měřeného vodiče. Rušivý proud procházející vodičem naindukuje napětí na výstupu sekundárního vinutí sondy. Následně je možné monitorovat rušivý proud pomocí vhodného EMI přijímače. Pokud sonda obepíná více vodičů, jedná se o měření souhlasného rušení. Tento typ rušení se ve vodičích šíří se stejným průběhem napětí či proudu. Proudové sondy disponují různou konstrukcí dle požadovaného rozsahu měření (od desítek Hz po MHz).

Svačina



Obr. 25 Proudová sonda Svačina [3]

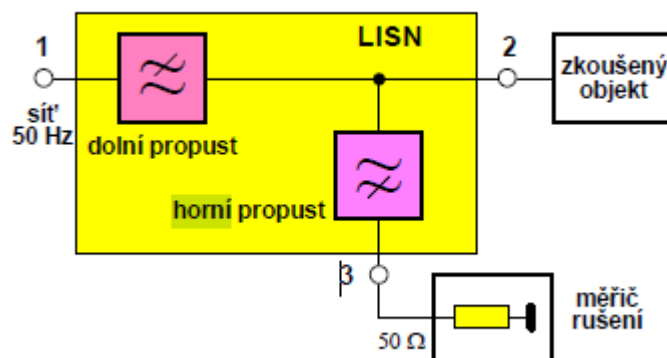
Absorpční kleště

V literatuře se absorpční kleště často označují jako absorpční odbočnice. Jsou konstrukcí velmi podobné proudovým sondám. Opět se jedná o uzavřenou smyčku neboli transformátor, kterým lze obepnout měřený vodič. Ve většině případů se jedná o měření na napájecích nebo datových vodičích. V podstatě jde o kombinaci vysokofrekvenční proudové

sondy a feritových absorpčních kroužků. Absorpční kleště se používají k měření výkonu proudu, který je vyzařován prostřednictvím daného zařízení ve formě rušivého signálu. Měření probíhá ve frekvenčním rozsahu od 30 MHz do 1 GHz. Absorpční kroužky jsou dvojího typu, a to pro měřicí kabel a napájecí vedení. Tímto způsobem lze měřit zároveň rušivý výkon na měřeném vodiči společně s proudem. Přesnost měření při měření absorpční kleštiny je velmi vysoká a měření touto technikou je velmi často využíváno při automatizovaném měření vedení. [2];[3]

3.6 Umělá napájecí síť

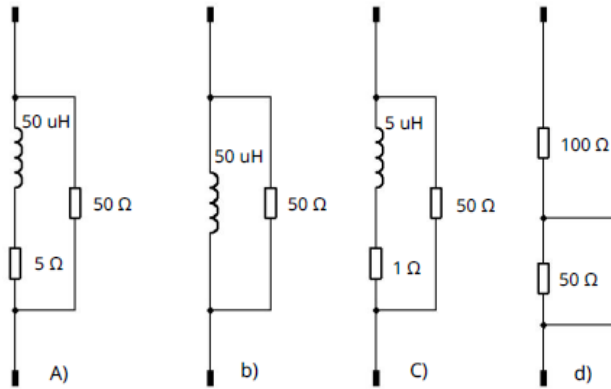
Umělá napájecí síť (LISN – Line Impedance Stabilizing Network) slouží jako zdroj napájení v případě provádění zkoušek EMC za účelem dosažení ideální energetické sítě. Slouží pro stabilizaci impedance vedení. Ideální energetickou síť lze popsat jako stabilní síť bez rušících signálů, které se mohou vyskytovat v klasické rozvodné síti. LISN disponuje třemi svorkami. První svorka se využívá k připojení elektrické sítě, na druhou svorku je připojený měřicí prostředek a třetí svorka je propojená se zkoušeným objektem. Jedná se o zařízení obsahující sadu různých filtrů umožňující dosáhnout stabilní impedance vedení. Využívá se zde oddělení měřicího zařízení od klasické elektrické sítě s využitím filtru s horní propustí. Moderní modely LISN disponují dálkovým ovládáním, které slouží k přepínání mezi jednotlivými fázemi během měření.



Obr. 26 Blokové schéma LISN [3]

Filtr s dolní propustí zde zajišťuje povolenou maximální frekvenci elektrické sítě na 50 Hz. Nedochozí tak ke vstupu rušících signálů skrz elektrickou síť a tím pádem není nijak ovlivněno měření. Tento filtr tvoří obvykle jeden LC článek a využívá se pro útlum nejméně 30 dB pro dané frekvenční pásmo. [3]

Filtr s horní propustí zajišťuje, aby se nedostaly rušivé signály z elektrické sítě do měřicího zařízení, ale na vstup testovaného zařízení. Horní propust tvoří kondenzátor obsahující hodnoty v řádu stovek nF. Vzhledem k impedančním standardům se umělá síť rozděluje na čtyři základní konfigurace, zajišťující vhodné podmínky pro měření. [2]; [3]



Obr. 27 Elektrické schéma zapojení LISN [2]

První varianta (A) se nejčastěji používá v případě měření nízkonapěťových zařízení v kmitočtovém pásmu od 9 kHz do 30 MHz. Následuje konstrukce (B) určená pro průmyslové napájecí sítě na frekvencích od 150 kHz do 30 MHz. Třetí varianta se využívá pro automobilový průmysl (150 kHz až 100 MHz). Poslední konfigurace (D) představuje dle normy CISPR 16 standardní napájecí síť. [2]

4 VÝVOJOVÁ PLATFORMA ARDUINO

Platforma pro výuku programování Arduino byla vytvořena týmem vědců v Itálii přibližně kolem roku 2005. Zpočátku bylo Arduino dostupné pouze pro studenty vysoké školy, ale kvůli velkému zájmu se později uvolnilo k distribuci po celém světě. Zaujalo nejen levnými a funkčními vývojovými deskami, ale především kvůli sdílení již funkčních projektů a schémat, které si mohli uživatelé mezi sebou navzájem sdílet a upravovat dle svých potřeb, neboť se jedná o Open source projekt. [16]

Arduinem se označuje vývojový kit využívaný převážně pro vytváření a následnému testování programu. Je možné Arduino přirovnat k velice jednoduchému počítači s absencí klávesnice, myši apod. Je však možné zmíněné periferie k tomuto zařízení připojit a naprogramovat je pro určitou činnost. Velmi často je toto zařízení používáno k řízení elektrických komponentů, jako jsou el. motory, diody, spínače, různá analogová a digitální čidla. Prostředí v platformě Arduino by se dalo přiřadit k méně náročným pro začínající programátory a vývojáře. Z toho důvodu se hojně využívá na školách pro psaní prvních programů, kdy si studenti potřebují programování mikroprocesorů nejprve zažít a odzkoušet na méně náročných aplikacích. Ovládaným zařízením mohou být jednoduchá zařízení, jako jsou například velmi často roboti, RC modely, ale také lze Arduino použít pro měření různých fyzikálních veličin a tyto informace v digitální podobě dále zpracovávat. [17];[18]

Software pro možnost programování této vývojové platformy se jmenuje Arduino IDE a je volně dostupný na stránkách výrobce. Jedná se o poměrně jednoduché prostředí dostupné ve většině světových jazycích. Je zde využíván programovací jazyk C a C ++ spolu s knihovny, které dokáží zjednodušit obsluhu mikrokontroleru a možných hardwarových součástí k němu připojených. Zjednodušení v Arduino IDE je způsobeno tím, že programátor nemusí psát podrobný zdrojový kód po jednotlivých příkazech, ale může použít již vytvořené, snáze zapamatovatelné příkazy, nebo předem vytvořené knihovny Arduina. Lze tedy tak pomocí stručnějšího programátorského jazyka vytvářet projekty. Tímto způsobem lze vzdělávat začínající programátory a postupně rozvíjet jejich zájem o programování. [16];[19]

4.1 Desky Arduino

Firma Arduino disponuje velmi bohatým sortimentem, co se týče vývojových desek. V této kapitole si představíme alespoň ty nejvíce známé s popisem jejich vlastností. [16]

4.1.1 Arduino Mini

Jedná se o představitele velmi minimalistické verze desky Arduino, s absencí zabudovaného USB portu. Nutno podotknout, že samotný výpočetní výkon rozhodně není výrazný oproti větším deskám. Pro vkládání programu lze použít externí USB – Seriál převodník. Tato deska funguje díky procesoru ATmega328 s pracovní frekvencí 16 MHz. Díky svým malým rozměrům se nejčastěji využívá v ovladačích, chytrých vypínačích apod. [16]



Obr. 28 Arduino Mini [20]

4.1.2 Arduino Micro

Již podle názvu je patrné, že tato verze desky představuje velmi kompatibilní HW řešení. Což lze pozorovat na obr. 29.



Obr. 29 Arduino Micro [21]

Srdcem Arduina micro je čip typu AT mega32u4, který disponuje převodníkem. Díky převodníku pro připojení desky k počítači operační systém automaticky vyhodnotí připojení periférie a není nutné nejprve naprogramovat převodník, jako v případě desek Arduino mini. [16]

4.1.3 Arduino Fio

Základem této desky je procesor ATmega328Ps pracovní frekvencí 8 MHz. Velkým rozdílem oproti ostatním deskám je snížené napětí z 5 V na 3,3 V. Tato změna napětí se

využívá kvůli připojení různých bezdrátových modulů (XBee moduly), pro které je primárně tato verze Arduina využívána. [16]



Obr. 30 Arduino Fio [22]

4.1.4 Arduino UNO

Vzniklo z předchozích verzí desek, jako jsou Arduino Extreme, NG, Duemilanove. Jde o jednu z nejčastěji používaných desek této vývojové platformy. Je programovatelné klasickým způsobem prostřednictvím USB a srdcem této desky je procesor ATmega328. [16]

4.1.5 Arduino Mega

Již podle názvu je tato deska oproti například UNO o něco větší a využívá se především pro složitější aplikace, kde je potřeba připojit více komponentů. Vývojáři při návrhu této desky vycházeli právě z předchozí desky UNO a snažili se o doplnění více I/O pinů. Dále je Arduino MEGA vybaveno větším počtem sériových UART portů (4), na rozdíl od Arduina UNO, které má pouze jeden. Klasické rozšiřující desky (Shieldy) pro Arduino UNO lze díky pinové kompatibilitě použít i na systému Arduino MEGA. [16];[18]

4.2 Klony

Stejně jako v případě jiných úspěšných elektronických výrobků i u Arduina dochází k výrobě věrných kopií od jiných distributorů. V tomto případě je to poměrně logické, neboť jsou k dispozici online použité součástky, schémata desek i software. Díky tomu si může téměř každý sestavit svou vlastní Arduino desku. Kvůli autorským právům však nemohou nést stejný název, a proto se označují příponou „duino“ a často se konstrukčně mírně odlišují od originálních desek např. jiným odstínem barvy nebo typem ovládacích tlačítek. Některé klony jsou speciálně upraveny pro jejich speciální činnost. [16]

Zde jsou příklady Arduino klonů:

- Reinbowduino – používá se k ovládání maticového RGB LED displeje.
- ArduPilot – navržený převážně pro autonomní létací zařízení.
- Freaduino – věrná kopie desek Arduino. [16]

4.3 Arduino shieldy

Samotné vývojové desky Arduino nejsou samy o sobě příliš hardwarově bohaté a nemohou být vhodné pro všechny aplikace. Obsahují pouze určitý počet pinů a pro složitější aplikace, kde je potřeba komunikovat prostřednictvím ethernetu, nebo vypisovat text na displej nejsou moc vhodné. K těmto účelům jsou vytvořené Arduino shieldy, neboli různé doplňkové periferie. U vývojových desek Arduino se nejčastěji setkáváme s Ethernet shieldy, motor shieldy, LCD shieldy a s různými výukovými shieldy. Stačí vybrat shield vhodný pro danou aplikaci a pouze připojit na I/O piny Arduina. [16]

4.4 Arduino IDE

Aby bylo možné využívat vývojové desky pro konkrétní aplikaci, musí uživatel nejprve napsat, odladit a následně nahrát program do paměti. Pro tento účel slouží software sepsaný v programovacím jazyce Java pojmenovaný Arduino IDE (integrated development environment). Arduino IDE je volně dostupný (opensource) software volně dostupný na internetových stránkách výrobce (<http://arduino.org>). Stačí jen vybrat aktuální verzi (aktuálně ve verzi 2.3.2), která je k dispozici podle verze operačního systému. Instalovat tento program je možné na různá výpočetní zařízení mající operační systém Windows, macOS a Linux. [16]

Samotné programy pro ovládání Arduina jsou psané v jazyce C nebo C++, ale je zde možnost programování prostřednictvím tzv. bloků, které jsou pro začínající programátory daleko jednodušší. Napsaný program po dokončení a uložení uživatelem získá příponu „ino“. Tento typ souboru lze následně nahrát do desek Arduino. Proto se tyto vývojové platformy nejvíce využívají ve školství. [16]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH MĚŘENÉHO ZAŘÍZENÍ

Obsah praktické části se zabývá testováním elektromagnetického vyzařování u systémů vývojových platforem Arduino. Nutno podotknout, že se nejedná jen o samotné vývojové desky, ale i o přídavné moduly, které jsou nezbytnou součástí většiny projektů. Samotné platformy bez aktivních prvků (modulů, displejů, snímačů, motorků) a dalších různých periférií se v praxi příliš nepoužívají. Vždy je nutné vytvořit vhodnou hardwarovou sestavu a následně napsat a odladit program pro bezproblémovou funkci.

K dnešnímu dni existuje velké množství Arduino desek, jak již bylo zmíněno v teoretické části. Pro testování však byla zvolena platforma z nejčastěji prodávané řady Arduino UNO.

5.1 Návrh testovaných úloh

Jelikož tyto platformy po připojení nedisponují žádným programem, bylo nutné nejprve navrhnout vhodný program, na kterém je možné odzkoušet testování EMI. Tyto návrhy je nutné vyzkoušet před samotným finálním projektem, abychom měli lepší představu o vyzařovacích schopnostech Arduina.

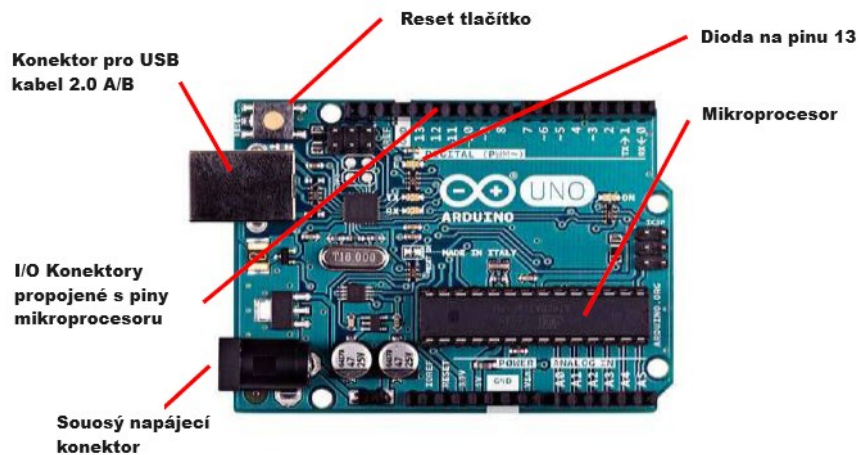
Na základě toho došlo k návrhu prvotních testovacích programů:

1. Ověření úrovně vyzařování samotného Arduino UNO s programem na aktivaci digitálních pinů,
2. Vyzařování Arduino UNO + shield (displej s tlačítky),
3. Vyzařování dvou modulů Arduino UNO + shield (displej s tlačítky),
4. ARDUINO UNO 2x propojeno SPI sběrnici,
5. Testování vyzařování na reálné aplikaci – Arduino UNO + shield displej + detektor pohybu

5.2 Výběr hardwaru pro test

Komponenty byly vybírány na základě předchozích zkušeností, nejvíce nakupované uživateli, a především s předpokladem, že by tyto komponenty mohly být potencionálním zesilovačem případného EMI vyzařování samotného Arduina. Veškeré komponenty byly vybrány a následně objednány z internetového e-shopu drátek.cz.

5.2.1 Arduino UNO

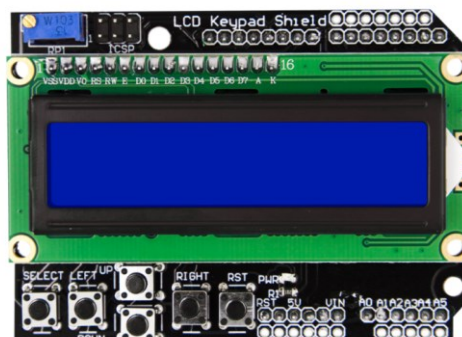


Obr. 31 Arduino UNO [18]

Tento konkrétní model Arduina disponuje celkem 20 piny. Z toho 14 pinů tvoří digitální (číslíkové) piny, tedy lze k nim připojit zařízení rozlišující pouze dvě hodnoty a to logickou 1 a 0. Pro logickou jedničku lze předpokládat maximální napětí cca 5 V a pro logickou nulu 0 V. Tyto piny mohou být používány jako vstupní i výstupní. Je nutné na začátku programu dané piny aktivovat a zvolit, zda budou využívány jako vstupní nebo výstupní.

Dalších 6 pinů je určených pro vstup analogového signálu. Arduino na svých analogových pinech měří v rozsahu 0 až 5 V, ale převádí je na 1024 hodnot prostřednictvím A/D převodníku. V případě nedostatku digitálních vstupů lze využít i analogové piny.

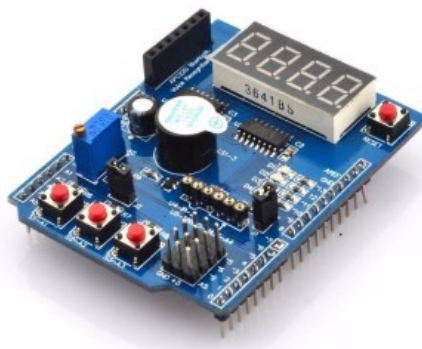
5.2.2 LCD displej



Obr. 32 Arduino LCD shield [23]

Tento LCD Shield lze bez větší námahy jednoduše připojit pomocí předem připravených hradel přímo do sběrnice Arduina a není nutné propojovat samotný LCD displej vodiči. Disponuje i tlačítky pro možnost ovládání případné aplikace. Velikost displeje je 8 x 5,4 cm a lze zobrazit celkem 16 znaků ve dvou řádcích.

5.2.3 Výukový shield



Obr. 33 Arduino výukový shield [23]

<https://dratek.cz/arduino/899-lcd-shield-pro-arduino.html> [32]

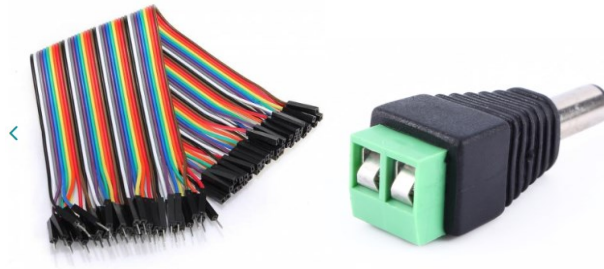
Výukový shield pro Arduino zaujme svou poměrně bohatou výbavou pro ožívání prvotních programů. Disponuje 3 tlačítky, 1 tlačítkem pro reset, otáčkovým trimrem, bzučákem, sedmissegmentovým displejem a integrovaným obvodem 74HC595. Nechybí ani připravené rozšíření pro připojení dalších rozšiřujících elektronických součástek nebo modulů (teploměr, BT modul apod.).

5.2.4 Modul reálného času DS3231



Obr. 34 Modul reálného času [24]

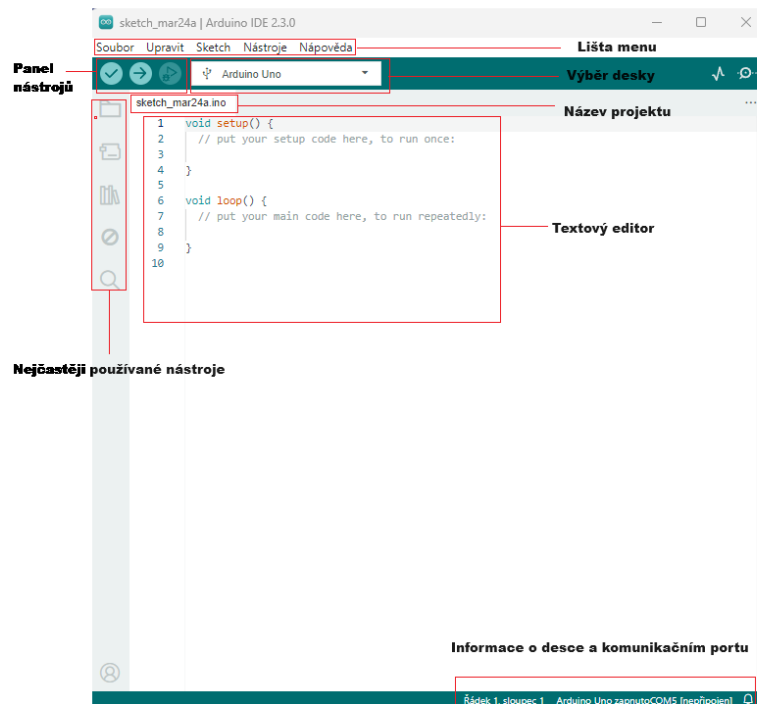
Velmi přesný modul reálného času DS3231 je vhodný, pokud v projektu je nutné používat aktuální čas. Data přenáší pomocí I2C sběrnice a ke své funkci je nutné připojit baterii LIR2032. Následně pomocí předem vytvořených knihoven lze poměrně jednoduše získat sekundy, minuty, hodiny, den, měsíc nebo rok.



Obr. 35 Napájecí konektor s propojovacími kabely [23]

5.3 Realizace softwarové části

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, k nahrávání programu do platformy Arduino lze použít open source software Arduino IDE. Po poměrně jednoduché instalaci a prvním spuštění programu se zobrazí výchozí okno viz. Obr. 36.



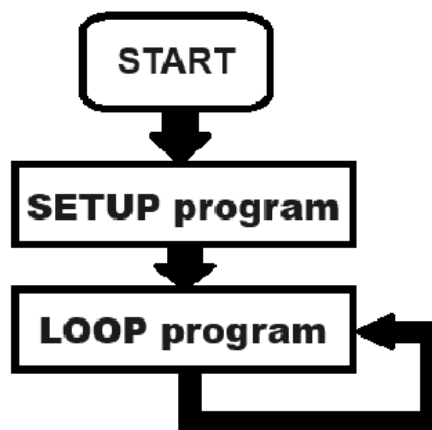
Obr. 36 Uživatelské rozhraní Arduino IDE [zdroj: vlastní]

Pomocí lišty menu je možné stejně jako u jiných programů spravovat většinu základních funkcí programu. Po rozkliknutí bloku „Soubor“ se otevře skupina funkcí pro manipulaci se souborem projektu. Můžeme zde soubor otevřít, vytvořit nový projekt, uložit, vytisknout, nebo otevřít různé předpřipravené vzorové projekty, které jsou v Arduino IDE každému k dispozici a mohou pomoci začínajícím uživatelům programu.

Prvním krokem při vytváření projektu je nutné zvolit (pomocí připraveného okna) typ používané vývojové desky a číslo Portu. Po této volbě dojde k ověření, zda jsou zadané atributy v předchozím kroku správné výpisem stavu komunikace na informační liště. Tyto informace najdeme v pravé spodní části.

Hlavní panel nástrojů obsahuje celkem tři základní tlačítka pro snadné ovládání. Pomocí prvního lze přeložit program napsaný v textovém editoru. Tato funkce vyhledá případné chyby v programu a informuje uživatele, v jaké části programu se případná chyba nachází. V opačné případě vypíše „nahrávání ukončeno“ a lze vytvořený program nahrát pomocí druhého tlačítka do vývojové desky.

Zde je jednoduše vysvětlen princip programu napsaného v Arduino IDE pomocí vývojového diagramu.



Obr. 37 Jednotlivé bloky programu [zdroj: vlastní]

Programy vytvořené v Arduino IDE se píšou ve dvou základních blocích, ale hlavní program je vždy napsán v nekonečném cyklu „loop“. Jak je již patrné z jednoduchého základního blokového diagramu na Obr. 37, na začátku programu stačí nastavit používané proměnné.

V bloku „setup“ se většinou nastaví aktivace pinů případně část programu, které proběhne jednou po zapnutí programu.

5.4 Vybavení laboratoře

Pro měření byla využita akreditovaná laboratoř pro měření EMC nacházející se ve Zlíně na Fakultě aplikované informatiky, která je součástí Univerzity Tomáše Bati. Tato laboratoř disponuje následujícími vlastnostmi.

Bezodrazová komora Frankonia SAC-3

Součástí laboratoře elektromagnetické kompatibility na půdě Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně je bezodrazová komora, ve které je možné uskutečnit měření různých zařízení v rámci testování EMC. Jedná se o komoru umožňující měření elektromagnetické interference (EMI) i elektromagnetické odolnosti (EMI). Součástí je i samotný software pro automatické měření R&S EMC zajišťující automatizaci měření. [2]

Technické parametry EMC komory:

- Vnitřní rozměry: délka, šířka, výška (6,5 x 4,5 x 5 metrů)
- Maximální měřicí rozsah pro EMI i EMS = 3 metry
- Udávaná stínící účinnost: SE \geq 80 dB
- Frekvenční rozsah komory: cca od 25 MHz do 18 GHz
- Limitovaná velikost testovaného (pro zařízení na stole): 1,5 x 1 m
- Testování EMI i EMS magnetické složky pole: od 9 kHz do 30 MHz
- Testování EMI i EMS po vedení: od 150 kHz do 30 MHz [2]

Pro měření interference se používal přijímací spektrální analyzátor a Test Receiver od firmy Rohde & Schwarz ESU8 s frekvenčním rozsahem od 20 Hz až 8GHz. Podporuje široký výběr detektorů, částečně i plně automatická měření a v neposlední řadě splňuje všechny obchodní i vojenské normy.



Obr. 38 RACK s Pc a měřicími přístroji

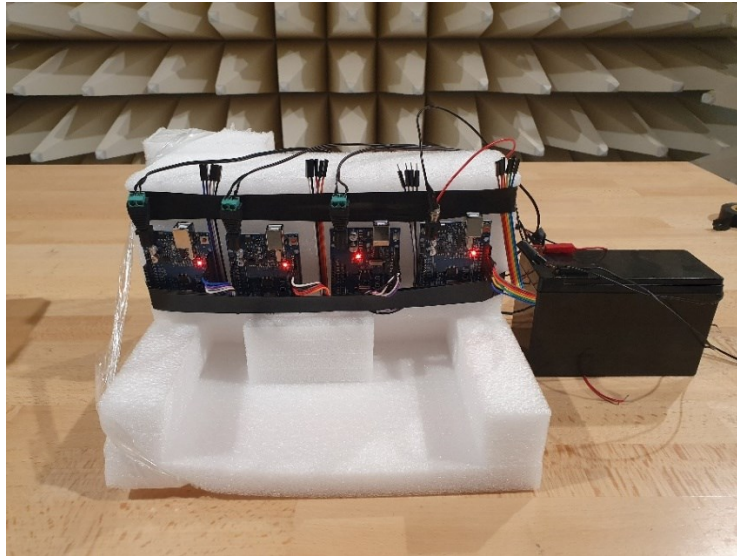
Dalším aktivním prvkem měřicího systému je generátor SMB 100 A od firmy Rohde & Schwarz, jehož úkolem je nastavení výstupního výkonu zesilovačů. Podle dodávaného manuálu od výrobce je jeho frekvenční rozsah od 9 kHz do 6 GHz s výstupním výkonem až +27 dBm. [25]

5.5 Postup měření EMI

Nejprve bylo nutné otestovat správnou funkčnost testovaných modulů Arduino po hardwarové i softwarové stránce. Společně s tím proběhla prvotní kontrola měřicí laboratoře společně s vybavením. Jelikož se jedná o poměrně starší zařízení, byla komunikace mezi některými prvky obtížnější a bylo nutné ze začátku řešit nejasnosti, jako např. proč při automatickém měření nelze nastavit daný typ detektoru, nebo naopak v daném měřicím pásmu. Měřicí program po nastavení vlastních parametrů přestal odpovídat a byl nutný restart celého počítače. Veškeré tyto mírné komplikace se podařilo vyřešit a mohlo se tak přejít k samotnému měření.

Nejprve byla testovaná samotná vývojová deska připojená do sítě 230 V prostřednictvím napájecího adaptéru. Bohužel po několika pokusech bylo zjištěno, že měřené vyzařování Arduina je příliš malé a jediné, co bylo v tomto testu naměřeno bylo vyzařování samotného

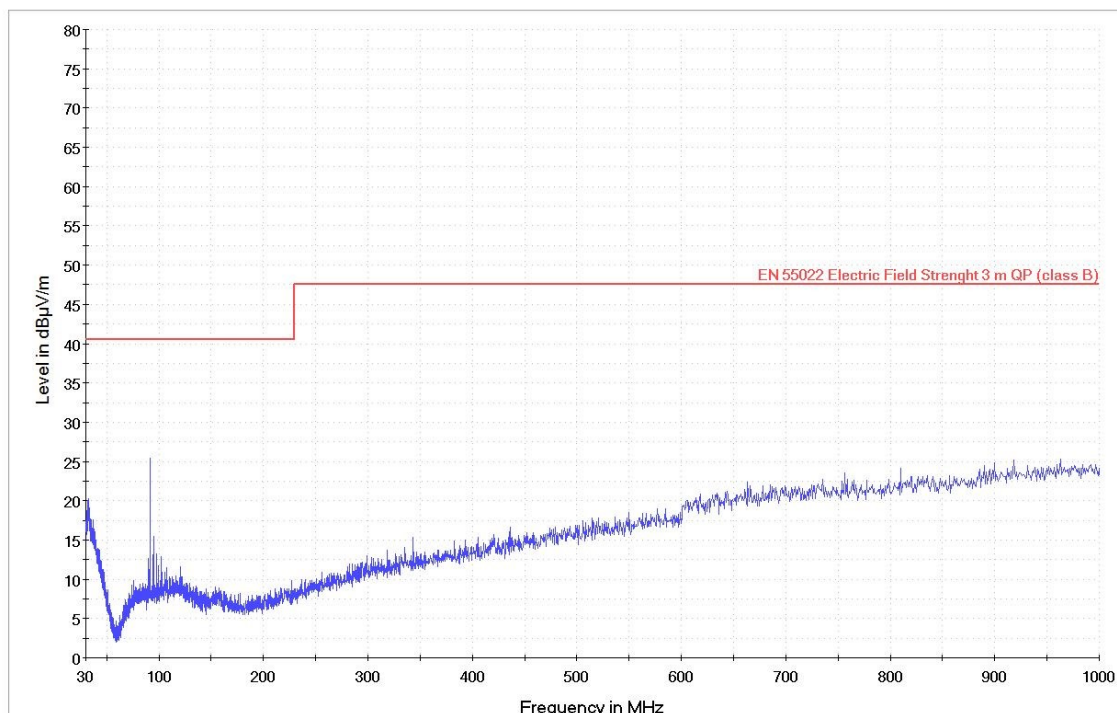
nabíjecího adaptéru. Následně došlo k změně způsobu napájení Arduina, aby bylo možné skutečně změřit jeho vyzařování. Jelikož je tyto sestavy možné napájet napájecím napětím v rozmezí od 7 V do 15 V, byl zvolen 12 V akumulátor, na který byly připevněny kabely zakončené souosými konektory. Tento způsob napájení pomocí stejnosměrného zdroje napětí se ukázal ze všech druhů jako nejvíce vhodný a nebylo zde naměřeno žádné nežádoucí vyzařování způsobené napěťovým zdrojem.



Obr. 39 Ukázka měření EMI vyzařování

6 MĚŘENÍ ARDUINA

Před měřením elektromagnetické interference bylo nutné nejprve provést zkušební měření prostředí, které vypovídá o tom, jak dokáže námi používaná anechoická komora odstínit okolní rušení. Dle obrázku č. 40 je patrné, že tento test vyšel pozitivně a zaznamenané rušení je poměrně malé.



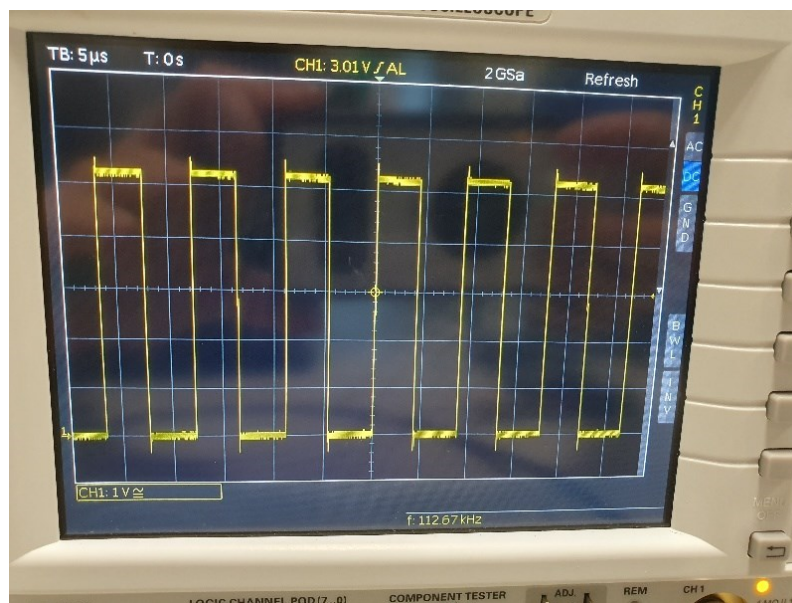
Obr. 40 EMI test předné laboratoře (měření pozadí)

Naměřená maximální špička se pohybuje na úrovni cca 25 dBµV přibližně na frekvenci 90 MHz. Kolem této frekvence v rozmezí cca 90 MHz až 102 MHz jsou další, o něco menší špičky. Tyto nepatrné hodnoty, a zvláště lokální maximum (25 dBµV) mají na svědomí nedaleké vysílače FM radií. Vzhledem k tomu, že dané hodnoty jsou nízko pod limitní čarou udávanou normou (limita se nachází na cca 40 dBµV), lze naměřené rušení pozadí označit za akceptovatelné. Před následujícím měřením je nutné hodnoty zapsat do poznámek kvůli možnému ovlivnění výsledku. V případě nežádoucích výsledků při měření Arduina ve stejné frekvenční oblasti je třeba provést důkladnější měření, aby bylo možné vyloučit ovlivnění měření EMI rušením zvenčí.

6.1 Měřící úloha 1

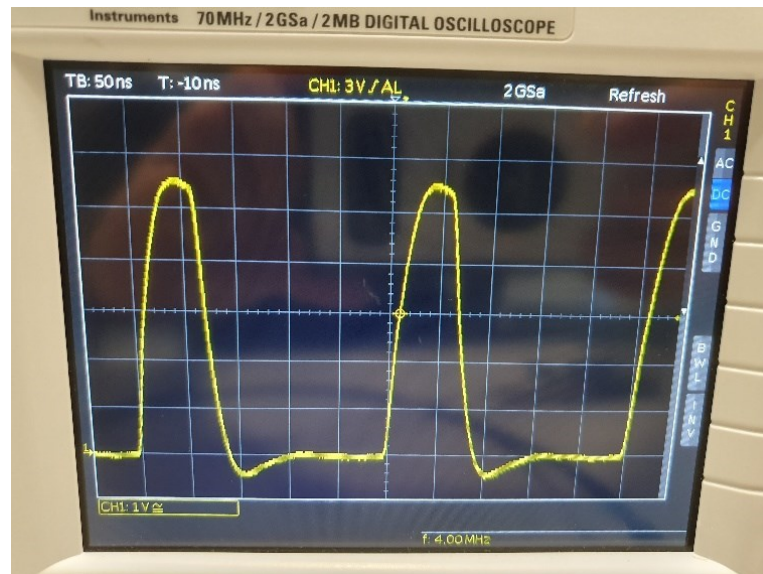
Po kontrole měřicího prostředí v laboratoři bylo možné přejít k první testovací úloze s platformou Arduino. Nutno podotknout, že měřených úloh bylo mnohem více, než je uvedeno v této práci, ale většina z těchto pokusů byla neúspěšná. Přesněji řečeno nedošlo k naměření žádných nebo nepatrných odlišností oproti měření rušivého pozadí. Na základě těchto výsledků následně probíhalo ladění připravených programů pro obsluhu desky, aby bylo možné naměřit vyzařované rušení.

Konkrétně v tomto pokusu se nahrál program č. 1 do Arduina. Tento program byl poměrně jednoduchý, neboť obsahoval pouze aktivaci, tedy přivedení napětí 5 V na 11 digitálních pinů, které jsou součástí vývojové desky a vzápětí byly tyto piny deaktivovány. Program neobsahoval žádné přerušování, aby byla zajištěna maximální možná frekvence generovaného signálu. Bohužel při tomto testu nebyly naměřeny žádné měřitelné hodnoty EMI vyzařování.



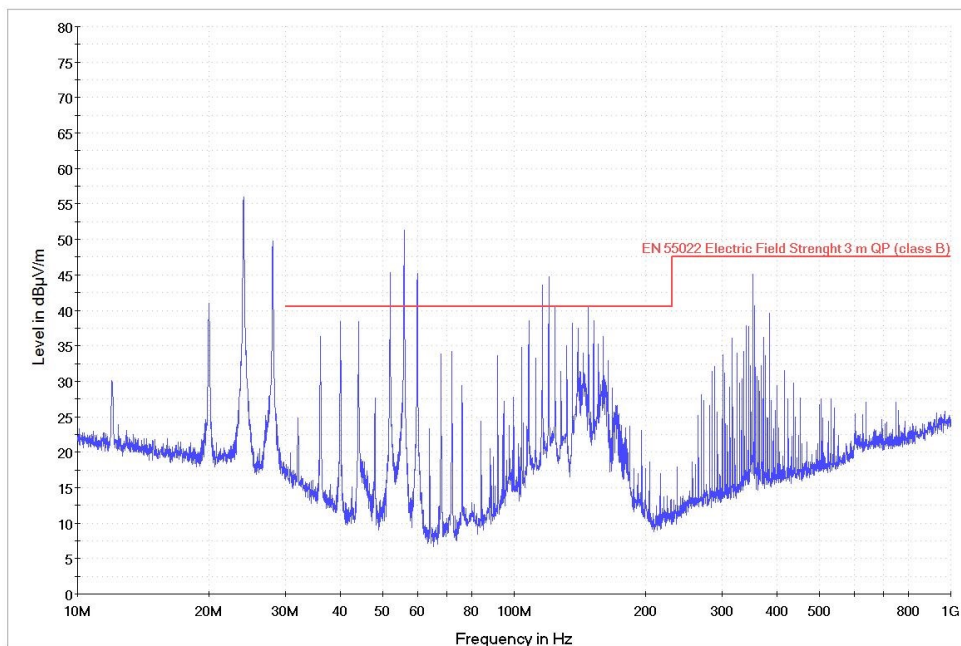
Obr. 41 Aktivace pinů měřená osciloskopem

Po tomto neúspěšném měření byla přidána doplňující měřící úloha. Tato úloha měla za úkol dosáhnout maximálního možného frekvenčního zatížení na I/O pinech. Při prvním měření, kde došlo k aktivaci pinu na Arduino, nebyly naměřeny téměř žádné hodnoty. Tento program byl následně připojen k osciloskopu, aby bylo možné ověřit maximální dosaženou frekvenci signálu na I/O pinech, která byla cca 120 kHz. Po tomto zjištění byl stejný program napsán v jiném programovacím jazyce, kde ve snaze dosažení maximální možné frekvence mikrokontroleru došlo k aktivaci pinů procesoru pomocí binárního kódu.



Obr. 42 Upravený program pro aktivaci pinu

Při tomto měření se použila stejná deska Arduino UNO osazena celkem 8 vodiči, které byly připojeny na výstup 7 digitálních pinů a GND pinu. Před samotným měření EMI v laboratoři se po nahrání kódu opět provedla kontrola pomocí osciloskopu, který byl připojen k jednomu z výstupních pinů. Tato programová změna měla za následek zvýšení frekvence na hodnotu 4 MHz, jak je již patrné z Obr. 42. Po tomto zjištění mohlo dojít k měření EMI v laboratoři a výsledek měření je k nahlédnutí na Obr. 35.



Obr. 43 Výsledné měření EMI – úloha číslo 1

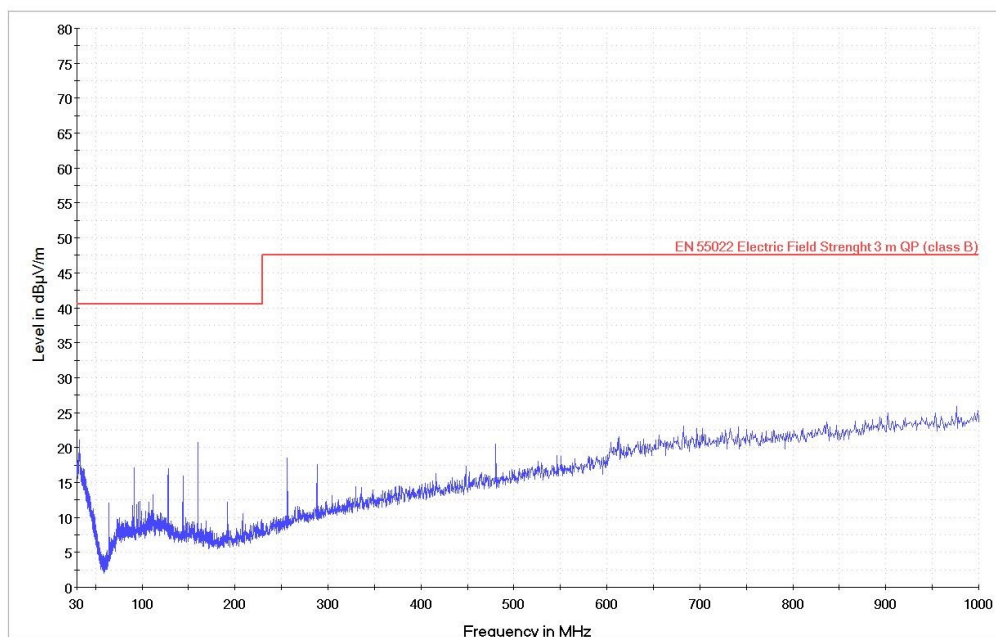
Vzhledem k tomu, že se jedná o poměrně nízkofrekvenční zařízení s procesorem dosahující maximálního taktu 16 MHz, posunul se frekvenční rozsah mimo rozsah udávaný normou. Konkrétně se upravil frekvenční rozsah měření od 10 MHz do 1 GHz. Tato úprava vedla k lepšímu pochopení rušivých signálů vycházejících z Arduina, pracujícího na 16 MHz.

Největší naměřená hodnota rušení dosahovala cca 56 dB μ V v měřícím pásmu mimo předepsané EMI normy (část bez červené limitní čáry). Druhé maximum bylo již v rámci měřené oblasti, a to na frekvenci 55 MHz s hodnotou cca 52 dB μ V. Dle naměřených výsledků je patrné, že tato hardwarová kombinace s nahráním kódem již zkouškami EMI neprošla.

6.2 Měřící úloha 2

Nyní bylo možné přejít k testování samostatné vývojové desky Arduino. V tomto případě byl nahrán program č. 2 pro obsluhu LCD shieldu. Po nahrání programu se na LCD displeji postupně vypisují různé řetězce simulující zadávání bezpečnostního hesla. Cílem tohoto měření bylo ověřit, zda poměrně jednoduchý a velmi často používaný modul bude produkovat měřitelné rušení. Tento modul obsahuje svou vlastní desku s poměrně krátkými obvody, u kterých je předpoklad, že mohou sloužit jako vhodný zdroj vyzařování.

V tomto případě již bylo měření poměrně úspěšné a bylo možné vidět mírné vyzařování na několika frekvencích. Dle obrázku. Č. 44 je patrné, že vyzařování v tomto případě nebylo příliš vysoké. Nejvyšší naměřená špička dosahuje hodnoty 21 dB μ V cca 160 MHz.



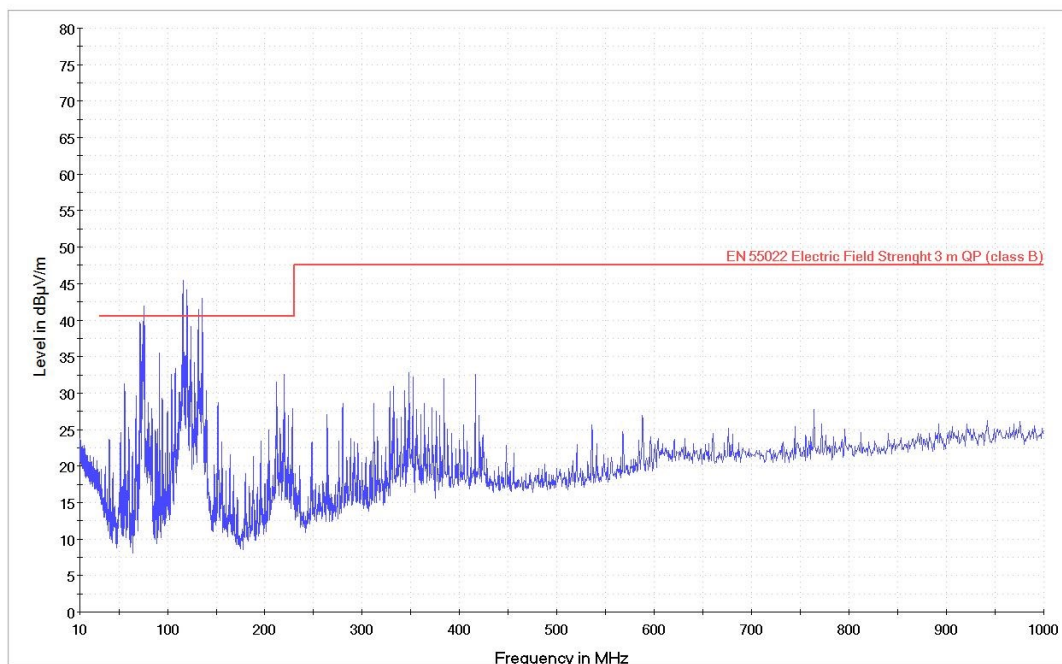
Obr. 44 Měření Arduina s LCD shieldem

Nutno podotknout, že při tomto testu byly použity 4 desky Arduino s totožným kódem kvůli docílení lepších měřitelných výsledků.

6.3 Měřící úloha 3

Nejvíce frekvenčně náročné moduly se připojují k Arduino prostřednictvím SPI sběrnice. Tato sběrnice se používá pro rychlostně náročné aplikace s možností využívat více periférií na krátké vzdálenosti. Komunikace probíhá prostřednictvím čtyř linek, kde první z nich SCK (Serial Clock) slouží pro nastavení hodinových pulzů komunikace. Dalšími linkami jsou MISO (Output) a MOSI (Input) kde probíhá komunikace, a poslední je linka pro označení konkrétní připojené periferie CS (Chip select).

Cílem tohoto programu je co nejvíce vytižít procesor Arduina, neboť lze nastavit přenosová rychlost na lince CLK až polovinou maximální frekvence procesoru. V případě desky Arduino UNO R3 disponující procesorem 16 MHz se jedná o maximální přenosovou frekvenci cca 8 MHz.



Obr. 45 Měření dvou modulů Arduino komunikující přes SPI

Při tomto pokusu je vidět na obr. Č 45, že je naměřené rušení, které překračuje normou požadovanou mez. Je nutné předpokládat, že na frekvenci kolem 90 až 100 MHz je měření ovlivněné stanicemi FM radií, ale dle naměřených výsledků v tomto pásmu nejsou žádné vysoké hodnoty rušení. Nejvyšší naměřená špička dosahuje hodnoty 45 dBµV na frekvenci 120 MHz. Další významnou hodnotou je 43 dBµV na 140 MHz a 41 dBµV na 60 MHz.

Jedním z hlavních cílů této diplomové práce je navrhnout a sestavit vhodný PZTS systém prostřednictvím modulů Arduino. Vybrané komponenty pro tuto sestavu jsou detailněji popsány v Tab. Č 2.

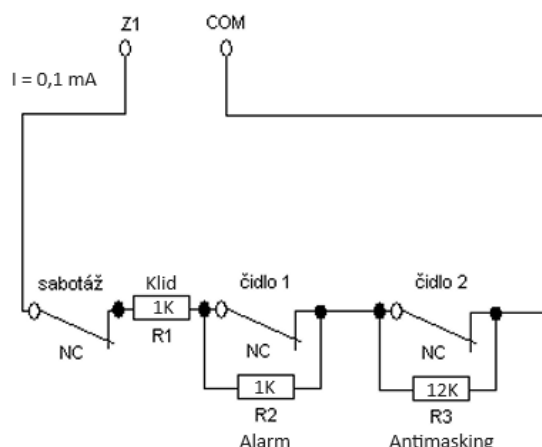
Tab. 2. Seznam použitých součástek

Název položky	Popis	Počet kusů
Arduino Uno	UNO R 3 s ATmega328P (16 MHz)	2 x
LCD Shield	2 x 16 s tlačítky	1 x
Klávesnice	maticová 4 x 4	1 x
Propojovací vodiče	délka cca 15 cm	xx
Detektor	pohybový s možností PIR i MW	1 x

6.3.1 Návrh ústředny

Navržená ústředna obsahuje hlavní řídicí modul Arduina, který slouží ke komunikaci s klávesnicí, vyhodnocuje výstup detektoru a v poslední řadě zobrazuje informace prostřednictvím LCD shieldu. Kvůli zjednodušení byla zapojena jen jedna zabezpečovací smyčka. Tato smyčka představovala pohybový detektor značky Pyronix, který se běžně používá k zabezpečení bytových nebo komerčních prostor. Jedná se o poměrně kvalitní duální detektor disponující detekcí prostřednictvím IR nebo MW technologie. Případně lze tyto technologie provozovat současně.

Nejprve bylo nutné vhodně nastavit detektor pohybu dle manuálu, který byl součástí příruční krabice. Následně došlo k nastavení velikostí odporů smyčky. To se u tohoto typu detektoru nastavovalo pomocí připravených pinů uvnitř detektoru. Velikosti odporů byly zvoleny následovně (1 K Ω Klid, 1 K Ω alarm a 12 K Ω tamper). V dalším kroku došlo k aktivaci funkcí ústředny prostřednictvím cca 7 přepínačů. Zde stačilo nastavit pouze aktivaci PIR detektoru a funkci Antimasking. Následovalo jen přizpůsobení krabice snímače vyvrtáním otvorů pro připojení napájecích a komunikačních vodičů.



Obr. 46 Schéma zapojení smyčky detektoru

Tímto krokem byl detektor plně nastaven a otestován připojením napájecích vodičů společně s digitálním multimetrem připojeným na komunikační vodiče (zelený, bílý), aby se ověřilo, zda detektor reaguje dle zvoleného nastavení.

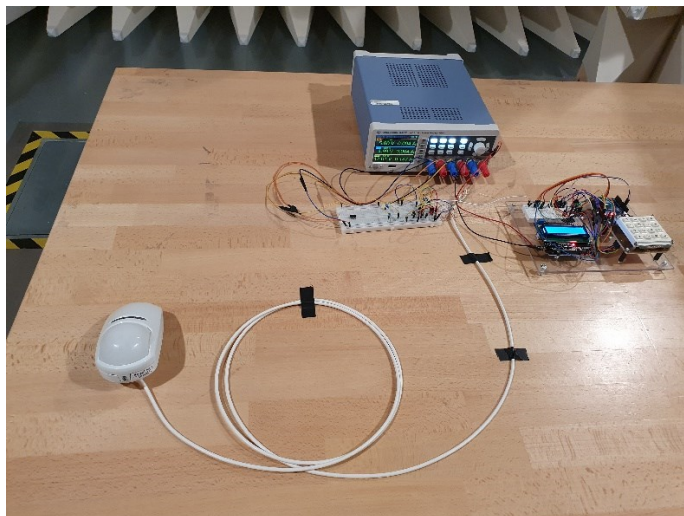
Pro přehlednost při návrhu ústředny byla vytvořena tabulka č. 3 popisující stav detektoru a následný výstup z detektoru, který bude dále vyhodnocovat Arduino.

Tab. 3. Stav ústředny a hodnota pinu A5

Stav ústředny	U - pin A5	hodnota na pin A5
Klid	100 mV	20
Alarm	200 mV	41
Animasking	1,2 V	246
Tamper	> 2 V	> 410

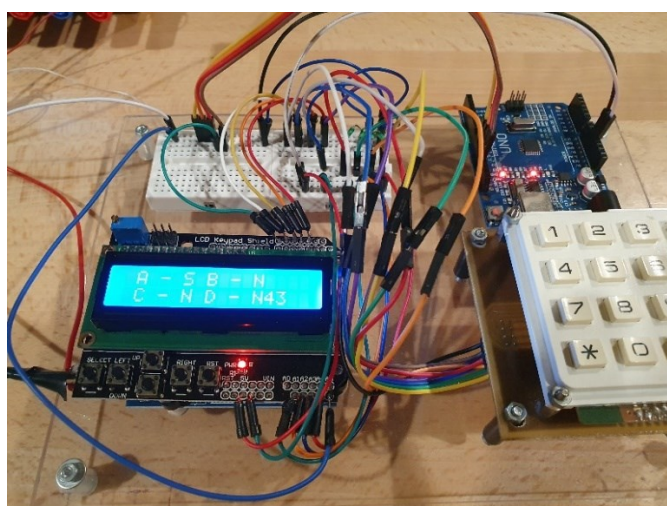
Hodnota U představuje fyzikální veličinu elektrického napětí měřitelnou na výstupu detektoru, která je následně připojená na jeden z analogových vstupů Arduina. Zde byl vybrán analogový pin A5. Hodnota v tabulce na pinu A5 je dále vypočítaná na základě naměřeného napětí dle rozsahu. Moduly Arduino na svých analogových vstupech mohou pracovat s napětím v rozmezí od 0 V do 5 V. Následně tuto hodnotu napětí převádí prostřednictvím 10bitového analogově digitálního převodníku. Znamená to, že bude mapovat vstupní napětí mezi 0 a provozním napětím 5 V na celočíselné hodnoty mezi 0 až

1024. Převod je nutný kvůli mikropočítači, neboť se jedná o digitální přístroj, který zpracovává pouze digitální signál (jedničky a nuly).



Obr. 47 Ústředna PZTS s detektorem

Po tomto nastavení stačilo jen sestavit použité komponenty mezi sebou prostřednictvím vodičů a nepájivých polí. Pro danou sestavu bylo nutné použít dva zdroje stejnosměrného napětí, v tomto případě 5 V a 12 V. Zdroj 12 V sloužil pro napájení Arduino a zároveň detektoru. Zdroj 5 V napájel pouze operační zesilovač. Při finálním měření v anechoické komoře byl použit zdroj dostupný v laboratoři z důvodu přehlednosti o napájení více komponent. Tento zdroj však lze později nahradit jednou 12 V akumulátorem, který byl používán i v předchozích měření.



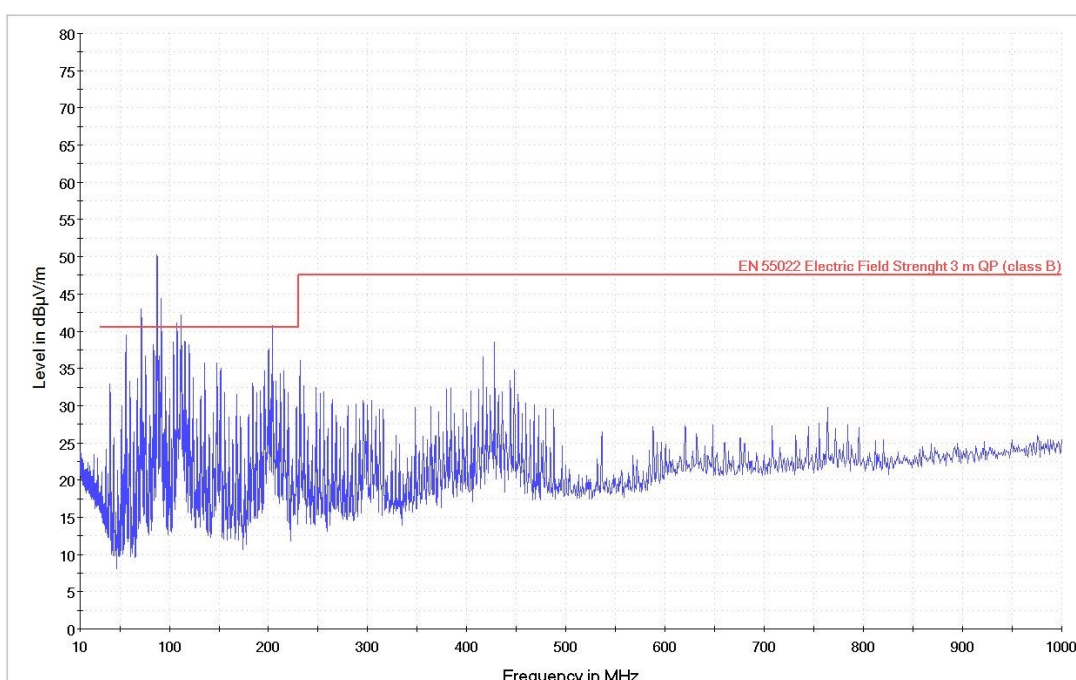
Obr. 48 Detail na výběr střežené zóny

Zde je již kompletní sestava PZTS ústředny před konečným EMI testováním s nahaným programem.

6.3.2 Naměřené hodnoty

Po napsání a následném odladění programu pro správnou základní funkci sestavené ústředny byl později nahrán program, který je k nahlédnutí v příloze pod č. 5. Tento program byl následně několikrát před testováním vyzkoušen, aby byla ověřena správná funkce všech součástí ústředny.

Měření v laboratoři proběhlo tentokrát se zdrojovým generátorem, který byl před testem otestován, jestli jeho zapojení neovlivní testované zařízení. Na použitém generátoru nebylo naměřené žádné významné vyzařování a mohl být zařazen do sestavy.



Obr. 49 Měření EMI ústředny

Finální výsledek měření ústředny je k nahlédnutí na Obr. 49. Naměřené rušení není příliš vysoké, přesto ve frekvenčním pásmu do 100 MHz jsou jasně viditelné špičky, které překračují požadavky normy 55022. Největší špička dosahuje hodnoty cca 50 dBµV na frekvenci 89 MHz. Další normu nesplňující špičky dosahují hodnoty 43 dB na 70 MHz, 42 dBµV na 110 MHz a 40 dBµV na frekvenci cca 200 MHz. Podle těchto výsledků tato ústředna neprošla zkouškou EMI.

7 NÁVRH STÍNĚNÍ

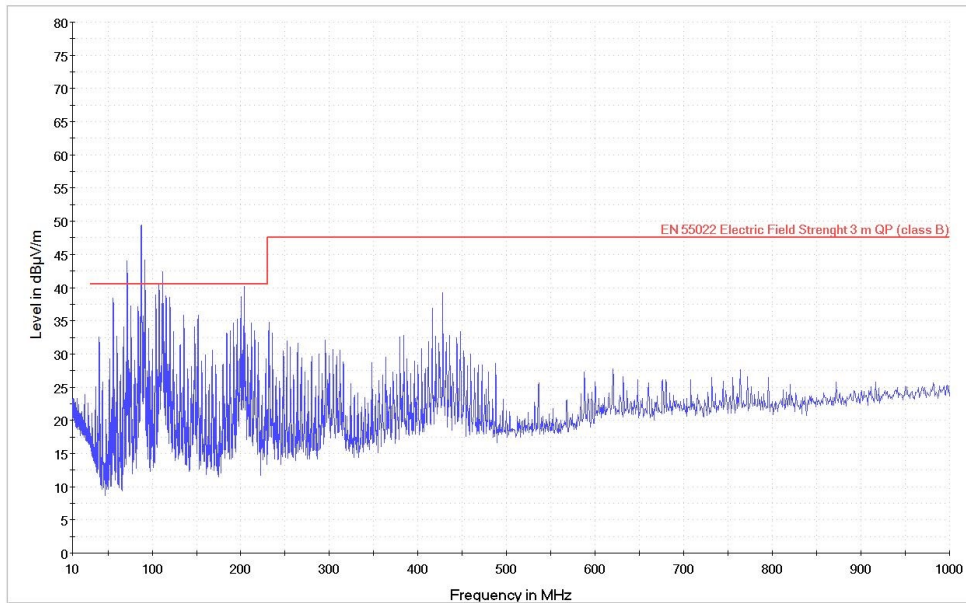
Jelikož bylo zařízení PZTS konstruováno ze dvou modulů pro Arduino a dalších součástek, bylo rozhodnuto použítí otevírací plastové krabice používané pro elektroinstalace. Tato krabice splňovala konstrukční požadavky a bylo možné do ní vložit všechny dílčí součásti navržené ústředny. Pro její praktické využití v reálné situaci stačí jen umístit otvor pro čtení LCD displeje a vyvést klávesnici z krabice nebo k ovládací části ústředny přistupovat otevřením dvířek.



Obr. 50 Příprava stínící krabice

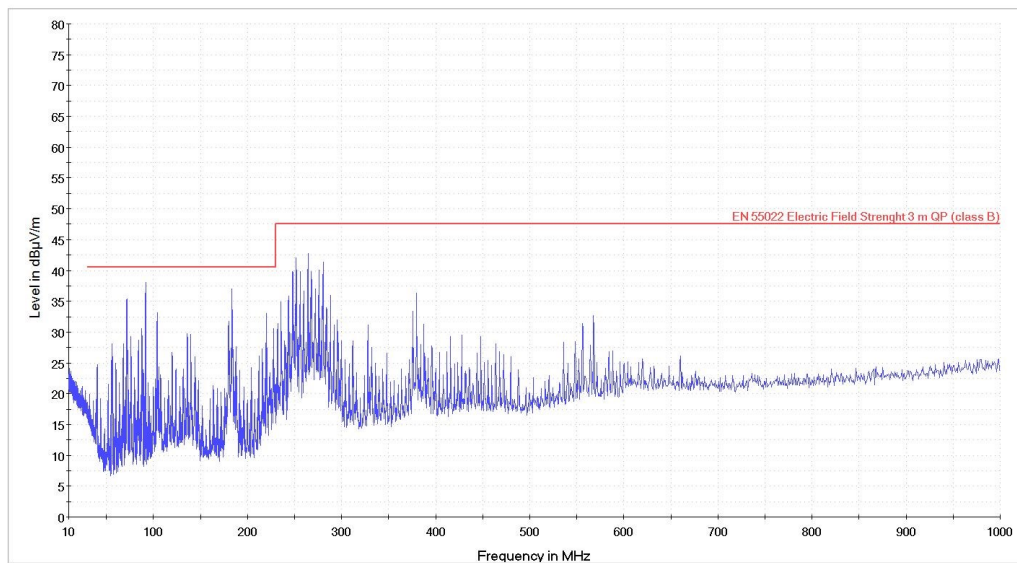
Při návrhu stínění došlo k otestování celkem dvou konečných variant. První variantou bylo použití pryžového materiálu kvůli jeho vhodným stínícím vlastnostem. Zvolila se tedy elektrikářská pryžová páska, která účelně slouží k izolaci elektrických zařízení. Výhodou této pásky je její poměrně velká šířka 50 mm a tloušťka 3 mm. Další výhodou je taky samolepící strana pásky, která měla výborné vlastnosti a poměrně snadno se nanášela a uchytla na vnitřní stěny krabice.

Stínící účinnost použitého pryžového materiálu však nespĺnila očekávání. Při testech EMI na reálné aplikaci došlo k poklesu rušivého signálu řádově o cca 2 dB μ V. Konkrétně se maximální úroveň vyzařování pohybovala na cca 49 dB μ V na frekvenci 75 MHz, což znamenalo poměrně velký neúspěch, protože požadavky dle norem jsou na úrovni 40 dB μ V od frekvence 30 MHz do 230 MHz a na úrovni 48 dB μ V do 1 GHz.



Obr. 51 Měření ústředny ve stínící krabici s pryžovou výplní

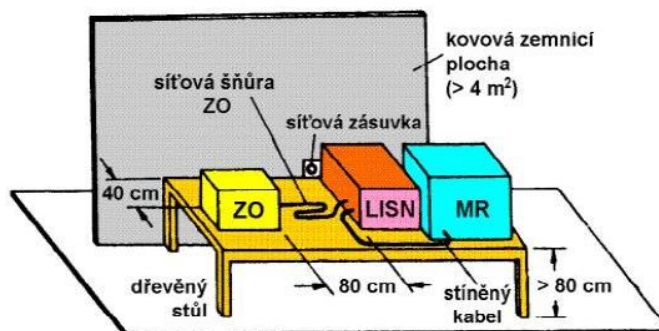
Následovala změna stínícího materiálu, konkrétně se použila kuchyňská hliníková fólie. Tento druh stínícího materiálu se nanasla opět z vnitřní strany, aby došlo k celému pokrytí krabice. Jediným místem, kde se dají předpokládat horší stínící účinky jsou dvířka skříňky. Zde se nanasla hliníková fólie pouze na samotná dvířka a vznikla tímto způsobem menší mezera mezi samotnými dvířky a tělem krabice. Před jejím nanesením byla do krabice nanasena samolepící páska, aby tato výplň dokonale držela na stěnách krabice a bylo možné do ní vložit všechny součásti měřené ústředny.



Obr. 52 Měření ústředny ve stínící krabici stíněnou hliníkovou fólií

8 MĚŘENÍ NA VEDENÍ

Před samotným měřením elektromagnetické interference na stejnosměrném vedení je nutné v první řadě navrhnout vhodný způsob měření. Z dostupné literatury se vycházelo z následujícího obrázku.



Obr. 53 Měření interference na vedení [3]

ZO představuje měřící zařízení, které je v tomto konkrétním případě sestava dvou modulů Arduino společně se zdrojem napětí (akumulátor 12 V). Do testovaných zařízení byl nahrán stejný program, jako v případě testování PZTS ústředny. Zkratka MR na obrázku představuje měřící zařízení. Tím byl zpočátku testování digitální osciloskop, ale výsledné měření se provedlo na spektrálním analyzátoru značky Rohde & Schwarz.

Hlavní problém však nastal při výběru vhodné LISN. V laboratoři byla k dispozici pouze LISN pro napájení ze sítě tedy z 230 V, což v případě měření Arduino napájeného ze stejnosměrného 12 V zdroje použít nelze. Z toho důvodu bylo nutné sestavit vlastní LISN, aby bylo možné měřené zařízení připojit k spektrálnímu analyzátoru a nedocházelo k ovlivnění měření rušivými signály ze zdroje.

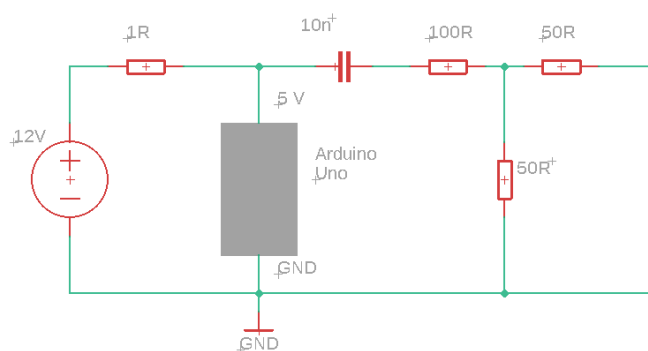
Tab. 4. Kritéria měření interference na DC vedení

Vstup/výstup (port)	Kmitočtový rozsah	Meze	Základní norma
Stejnoseměrné napájení	0,15 MHz - 0,50 MHz	79 dB (μ V) kvazivrcholová hodnota 66 dB (μ V) střední hodnota	CISPR 16-2-1
	0,50 MHz - 30 MHz	60 dB (μ V) střední hodnota 73 dB (μ V) kvazivrcholová hodnota	
Telekomunikační/síťový	0,15 MHz - 0,5 MHz	84 dB (μ V) - 74 dB (μ V) kvazivrcholová 74 dB (μ V) - 64 dB (μ V) střední hodnota	CISPR 22
	0,5 MHz - 30 MHz	64 dB (μ V) střední hodnota 74 dB (μ V) kvazivrcholová hodnota	

Tab. 4 obsahuje akceptovatelnou mez pro měření na vedení při použití stejnosměrného zdroje napětí. Konkrétně tabulka obsahuje požadavky norem CISPR 16 a CISPR 22. Nutno podotknout, že námi testované zařízení spadá pod testovací zařízení dle aktuálně platných norem CISPR 32 určená pro multimediální zařízení. Tato norma vychází z CISPR 22 a lze předpokládat, že se její parametry příliš neliší. Při měření se tedy vycházelo dle mezí normy CISPR 22, která byla dostupná k nahlédnutí v EMC laboratoři.

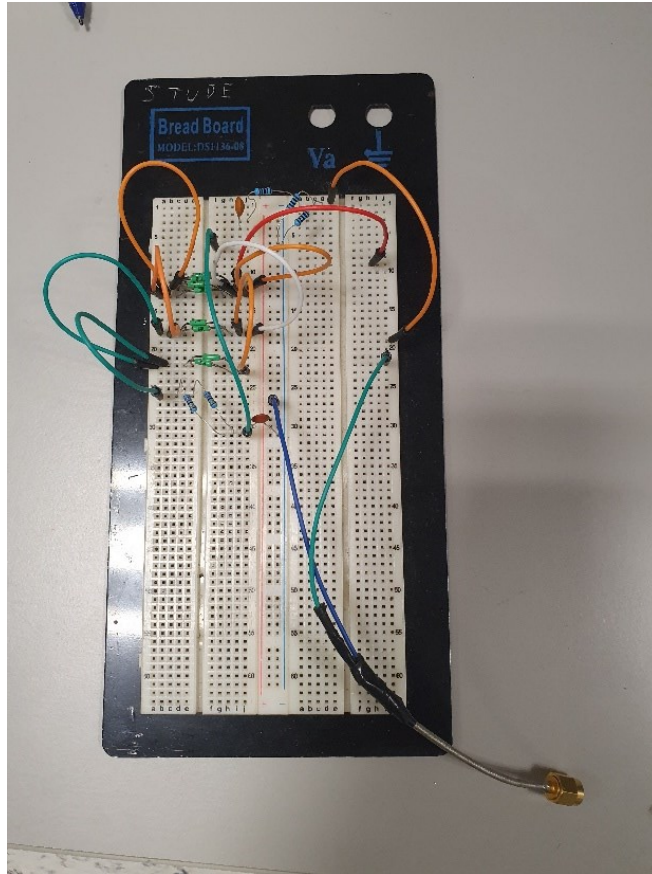
8.1 Příprava na měření

Nejprve je nutné nalézt vhodný způsob měření tohoto nízkofrekvenčního zařízení. Po nastudování problematiky z internetových zdrojů byla vybrána metoda 150 ohmů, která byla testována pro měření na vedení v případě integrovaných obvodů. Jedná se o sestavu kondenzátoru a rezistoru, které byly v tomto konkrétním případě pro účely měření dle schématu na obr. 53 sestaveny na nepájivém poli. Na výstup tohoto filtru stačilo už jen opatřit vhodný konektor, aby bylo možné danou sestavu následně připojit k spektrálnímu analyzátoru.



Obr. 54 Schéma konstrukce a zapojení vlastní LISN

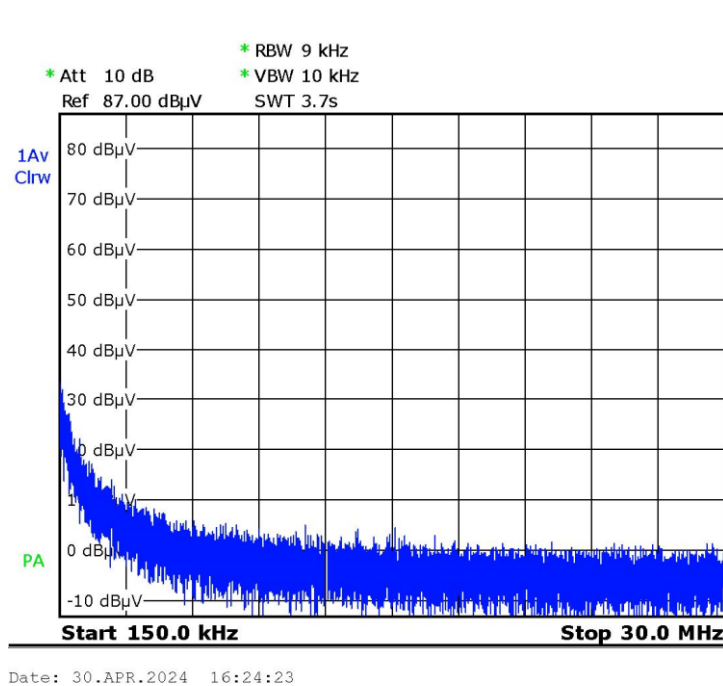
Tento poměrně jednoduchý obvod byl sestaven dle schématu. Bohužel nebylo možné z časového hlediska použít stejné součástky, jak bylo doporučeno, ale bylo nutné parametry součástek mírně poupravit a použít dle dostupnosti v laboratoři EMC. Aby bylo možné dosáhnout požadovaných hodnot elektrických součástek, zapojily se součástky se shodnou hodnotou paralelně kvůli docílení požadovaných hodnot.



Obr. 55 Konstrukce LISN s výstupním konektorem

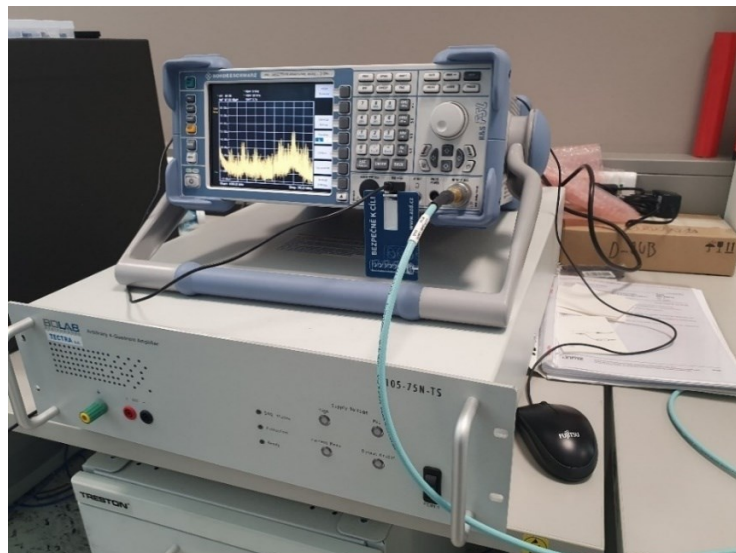
8.2 Měření spektrálním analyzátozem

Po sestavení všech součástek tohoto obvodu bylo možné provést měření na spektrálním analyzátoru. Konkrétně byl při této zkoušce použit analyzátor od firmy Rohde & Schwarz, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole. Před prvním měřením bylo nutné tento analyzátor nejprve nastavit dle manuálu a nastavit frekvenční rozsah měření. Tyto hodnoty se zvolily na základě předešlé tabulky s parametry pro měření na vedení dle normy ČSN 50022 (Tab. 4), a to od 150 kHz do 30 MHz.



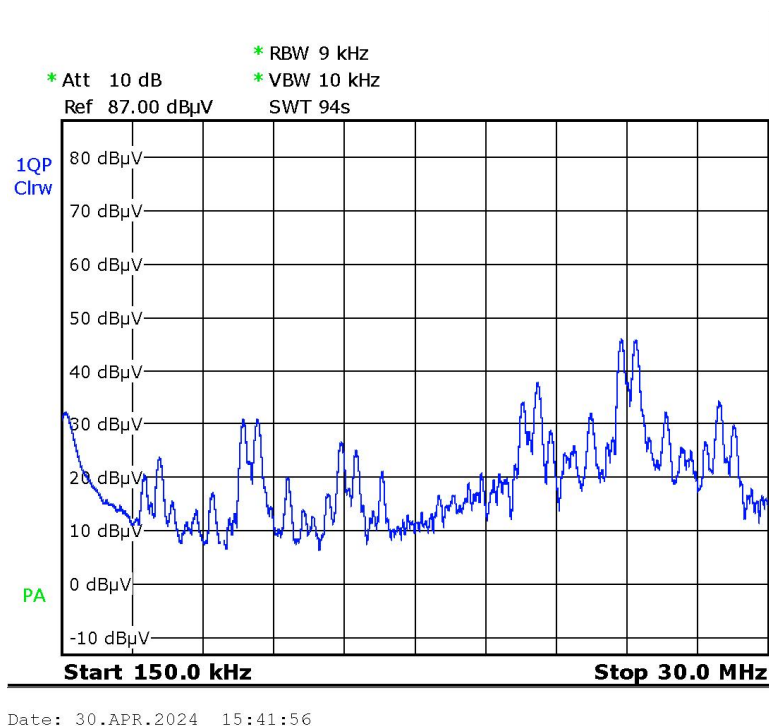
Obr. 56 Zkušební měření 12 V akumulátoru

Zde je možné vidět výstup měření pouhého pozadí. Během tohoto testování nebylo připojeno Arduino do vytvořené sestavy a měřilo se pouze případné vyzařování ze zdroje, v tomto případě na 12 V akumulátoru. Kontrolní měření je možné považovat za úspěšné, neboť na Obr. 56 nejsou viditelné žádné výrazné špičky rušivého signálu.



Obr. 57 Ústředna PZTS po připojení k analyzátoru

Nyní se mohlo přistoupit k hlavnímu měření vyzařování po vedení. Během tohoto měření bylo nutné přepnout typ měřícího detektoru na kvazivrcholový dle požadavků normy 55022.



Obr. 58 Ústředna – měření EMI na vedení

Na Obr. 58 lze pozorovat naměřené výsledky, pomocí spektrálního analyzátoru. Jelikož tento přístroj disponuje i USB rozhraním pro paměťová média, mohlo dojít k vytisknutí výsledků měření v adekvátním rozlišení.

Ovšem při porovnání dle předchozí tab. 4 zde nejsou naměřeny žádné hodnoty nesplňující meze pro elektromagnetické vyzařování na vedení. Konkrétně zde není žádná naměřená hodnota, která by překračovala mez pro měření kvazivrcholovým detektorem a to $74 \text{ dB}\mu\text{V}$ v kmitočtovém pásmu od 150 kHz do 30 MHz. Nejvyšší naměřené špičky měly hodnotu $45 \text{ dB}\mu\text{V}$ na 23 MHz, $38 \text{ dB}\mu\text{V}$ na 19.5 MHz a $30 \text{ dB}\mu\text{V}$ na 5 Mhz. Tímto výsledkem lze považovat zařízení za vyhovující.

8.3 Eliminace rušení po vedení

Při použití napájení 12 V stejnosměrného akumulátoru bylo zjištěno, že nedochází u vytvořeného systému k žádnému významnému vyzařování na vedení, které by nesplňovalo EMI normy. Přesto v následující části bude prezentován návrh o snížení úrovně naměřeného rušení.

8.3.1 Použití feritové perličky

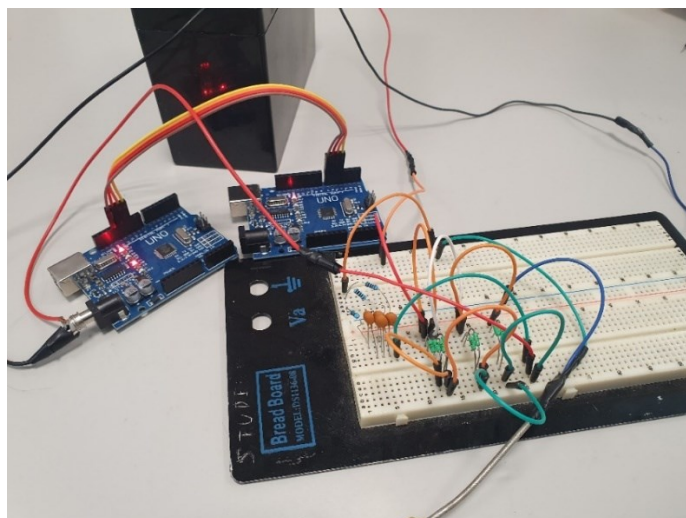
Vzhledem k celkové rychlosti měření, které umožňoval spektrální analyzátor došlo k odzkoušení účinnosti stínění prostřednictvím EMC perliček. Tyto perličky byly součástí základního vybavení EMC laboratoře, a proto bylo vhodné tento druh stínění také vyzkoušet. Bohužel tento pokus nebyl velmi úspěšný a nepovedlo se výrazně ovlivnit úroveň vyzařování. Výsledek měření byl téměř totožný s tím bez použití této perly. Z tohoto důvodu zde nejsou prezentovány výsledky. Vyzařování na některých frekvencích kleslo zhruba o 2 dB μ V, ale špičky na jiných frekvencích naopak se o jednotky dB μ V zvýšily.



Obr. 59 Perlička s děleným jádrem [26]

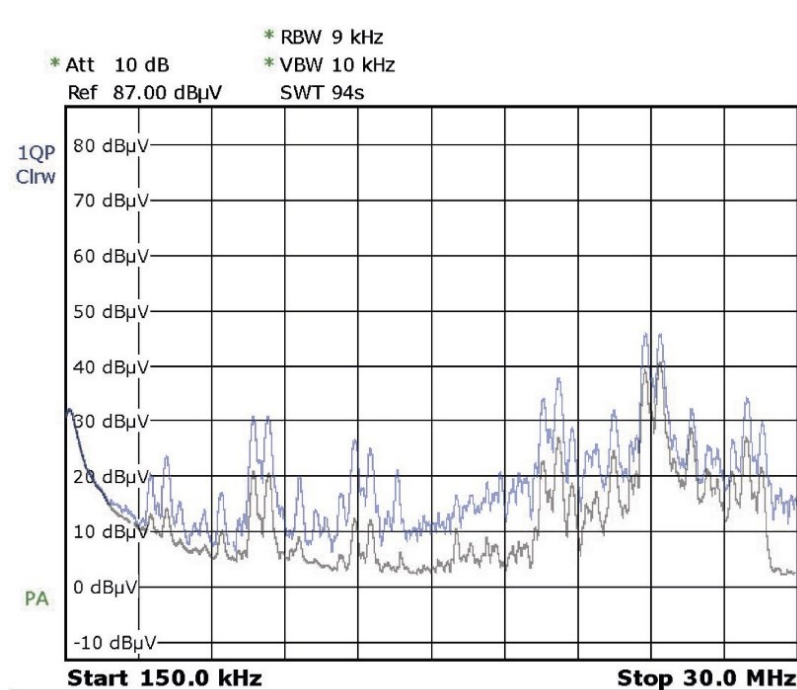
8.3.2 Použití RC filtru

Kvůli nežádoucím naměřeným výsledkům, které byly odzkoušeny na dvou perličkách s odlišnými parametry, bylo rozhodnuto eliminovat vyzařování po vedení spíše pomocí vhodného filtru. Filtr byl navržen z dostupných elektrosoučástek dostupných v laboratoři a skládal se ze dvou paralelně zapojených 77 Ω rezistorů a 10 nF kondenzátoru.



Obr. 60 Ukázka měření na vedení

Během zapojování v nepájivém poli se často musela daná sestava kontrolovat prostřednictvím digitálního multimetru, neboť kontakty na nepájivém poli nejsou příliš spolehlivé. Po kontrole všech komponent mohlo dojít k dalšímu testování EMI vyzářování.



Obr. 61 Porovnání měřených výsledků

Při porovnání předchozího a aktuálního stavu po aplikaci RC článku lze pozorovat mírný pokles rušivého vyzářování. Konkrétně se tímto způsobem povedlo snížit vyzářovací úroveň zhruba o 10 dBuV na frekvenci 8 MHz, 14 dBuV na 12 MHz a přibližně 5 dBuV na 24 MHz. Dle naměřených výsledků lze tento pokus o stínění rušivého vyzářování na vedení považovat za úspěšný.

ZÁVĚR

Primárním cílem praktické části této diplomové práce bylo zjistit, zda levné vývojové sady Arduino UNO osazené mikrokontrolerem ATmega328P splňují základní požadavky elektromagnetické interference pro multimediální zařízení CISPR 32. Tyto Arduinové platformy neobsahují žádný startovní program, proto bylo nutné nejprve navrhnout hardwarovou i softwarovou část před měřením EMI. Následně byla Arduino testovaná vždy po nahrání naprogramovaného kódu od těch nejjednodušších po náročné, aby byla odhalena slabina těchto zařízení z pohledu vyzařování. Produkty Arduino jsou nejčastěji programovány v softwaru Arduino IDE, kde se využívá knihovna Wring. Tato knihovna je proti programovacímu jazyku C nebo C++ daleko jednodušší, a z toho důvodu je i více oblíbená. Bohužel se ukázalo, že programy napsané pomocí knihovny Wiring i při snaze o docílení maximální frekvence na výstupních pinech nejsou příliš vhodné. Po tomto zjištění bylo zřejmé, že bude nutné k Arduino přidat vhodné komponenty, a nejlépe využít i speciální komunikační sběrnici. Následně byla zvolena a otestována komunikace prostřednictvím rychlé impedančně neukončené sběrnice SPI. Tato sběrnice byla vybrána jako součást systému, který odpovídá jednoduché poplachové ústředně založené na platformě Aduino. Následně dle výsledků EMI měření v laboratoři, bylo upraveno měřicí pásmo oproti zadání diplomové práce z rozsahu od 30 MHz do 6 GHz na 30 MHz až 1 GHz. Důvodem je zjištění, že platformy Arduino s mikrokontrolerem s maximální frekvencí 16 MHz v pásmu nad 1 GHz nic nevyzařují. V případě některých měření bylo posunuto spodní měřicí pásmo na 10 MHz, aby bylo ověřeno, zda testované zařízení vyzařuje na 16 MHz.

Navržený systém byl výstupem praktické části a následně se na této sestavě provedl finální test EMI. Výsledek testu dopadl negativním výsledkem s maximální naměřenou úrovní 50 dB μ V na frekvenci 89 MHz. Z tohoto důvodu se mohlo přistoupit k navazujícímu návrhu o eliminaci elektromagnetického vyzařování prostřednictvím vhodného stínícího materiálu.

Ve snaze o eliminaci nežádoucího vyzařování došlo k návrhu dvou variant stínění, které byly implementovány do systému způsobem, aby neovlivnily primární funkci ústředny. Byly navrženy celkem dva typy stínění, a to pomocí pryžové výplně a následně hliníkové. Dle naměřených výsledků pryžová varianta nedokázala dosáhnout vhodných stínících účinků, aby se mez vyzařování snížila pod úroveň udávanou normou (40 dB μ V do 240 MHz a 48 dB μ V od 240 MHz). Jednalo se o pokles vyzařovací úrovně přibližně o cca 2 dB μ V. Následovala druhá varianta stínění, která již měla pozitivní výsledek s poklesem vyzařovací

úrovně zařízení na některých frekvence až o cca 10 dB μ V na zhruba 46 dB μ V. Což stačilo na splnění EMI normy a navržená ústředna po odstínění prošla zkouškami.

Poslední úlohou diplomové práce je měření vyzařování tohoto systému po vedení a návrh eliminace rušení pomocí vhodných filtrů. Zde došlo opět k návrhu dvou způsobů eliminace. Prvním způsobem, jak eliminovat vyzařování po vedení se nabízelo použití feritové perličky s děleným jádrem. Stačilo pouze vybrat perličku s vhodnými parametry a provléct ní přívodní napájecí vodiče na vstup do Arduina. Výsledek následného měření pomocí spektrálního analyzátoru vyšel negativní, tedy s téměř žádným podstatným rozdílem oproti původnímu vyzařování. Druhým způsobem bylo využití RC filtru, jehož sestavení záviselo na dostupnosti elektrických součástek v laboratoři EMC. Zvolenými komponenty RC článku byly dva paralelně zapojené 77 Ω rezistory a jeden 10 nF kondenzátor. Tímto způsobem byla snížena vyzařovací úroveň zhruba o 10 dBuV na frekvenci 8 MHz, 14 dBuV na 12 MHz a přibližně 5 dBuV na 24 MHz. Dle naměřených výsledků lze tento pokus o stínění rušivého vyzařování na vedení považovat za úspěšný.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PAUL, Clayton R. *Introduction to electromagnetic compatibility*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0471755001.
- [2] POSPÍŠILÍK, Martin. *Introduction to Electromagnetic Compatibility for Electronic Engineers ... and not only for them*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2019. ISBN 978-80-7454-876-5.
- [3] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky. Připojujeme se k Evropské unii*. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-21418737.
- [4] VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil. *Elektronická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vřrušení: ČSN-ČSN EN-ČSN IEC-ČSN CISPR-ČSN ETS*. Praha: Grada, 1998. ISBN 80-7169-568-8.
- [5] DRŽÍNOVSKÝ, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2010. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [6] OTT, Henry W. *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken: Wiley, 2009. ISBN 978-0470189306.
- [7] B-2 Spirit. In: Armádní noviny [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.armadninoviny.cz/kdo-bude-nastupcem-bombarderu-b-2-spirit3f.html>
- [8] KÜNZEL, Karel a Jaroslav ŽÁČEK. *EMC v technické praxi II: Rušivé signály, jejich zdroje a šíření*. Automa [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/emc-v-technicke-praxi-ii-rusive-signaly-jejichzdroje-a-sireni-2006_03_30991_751/
- [9] ORFANIDIS, Sophocles J. *Electromagnetic Waves and Antennas*. Online. Rutgers University, 2016. Dostupné z: <https://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>. [cit. 2024-05-25]. ORFANIDIS, Sophocles.
- [10] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 259 s. ISBN 80-010-3032-6.
- [11] Semi Anechoic. In: *Faraday Defense* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://shop.faradaydefense.com/chamber-vector-class/>

- [12] EMC testovací komora. In: *GLOBAL EMC* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://globalemc.co.uk/anechoic-chambers/compliant/5m-semi-anechoic-emc-test-chambers/>
- [13] Bikónická anténa ETS-LINDGREN 3104 C. In: *Uživatelská* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://cs.manuals.plus/ets-lindgren/3104c-biconical-antenna-manual>
- [14] Logaritmicko-periodická anténa (LPA). In: *Logaritmicko-periodická anténa (LPA)* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.radio.feec.vutbr.cz/raida/multi-media/index.php?nav=10-8-A>
- [15] MICRONIX, spol. s r.o., c2024. In: *Micronix* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.micronix.cz/sada-emc-sond-rigol-nfp-3/>
- [16] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž, 2017. ISBN 978-80-87106-93-8.
- [17] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-110-1.
- [18] Co je Arduino, 2013. Robot klub Rychnov [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://robotika.vosrk.cz/guide/arduino/lesson00/cs>
- [19] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009. ISBN 978-80-7232-383-8.
- [20] Arduino mini. In: *DISTRELEC* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/arduino-pro-mini-328-16-mhz-5v-sparkfun-electronics-dev-11113/p/30145429>
- [21] Arduino Micro (A000053) | ARDUINO, 1991-2024. In: *SOS electronic* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.com/cz/products/arduino/arduino-micro-a000053-160123>
- [22] Arduino Fio. In: *SWITCHSCIENCE* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://international.switch-science.com/catalog/615/>
- [23] DRÁTEK.CZ. In: *DRÁTEK.CZ* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/899-lcd-shield-pro-arduino.html>
- [24] DRÁTEK.CZ. In: *DRÁTEK.CZ* [online]. [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1261-rtc-hodiny-realneho-casu-ds3231-at24c32-iic-pametovy-modul-pro-arduino.html>

- [25] Rohde & Schwarz: R&S®HZ-14 Probe Set for E and H Near field Measurements. [online]. 2014 [cit. 2024-05-25]. Dostupné z: <http://www.rohde-schwarz.com/>
- [26] Ferit s děleným jádrem. In: *ATD Elektronik, s. r. o.* [online]. [cit. 2024-05-26]. Dostupné z: https://www.atd-shop.com/x5874/emc-ferit-s-delenym-jadrem_-28a1507-0a2

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
EZ	Elektronické zařízení
EU	Evropská unie
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
CISPR	International Spécial des Perturbations Radioélectriques
FCC	Federal Communications Commission
VA	vyzařovací anténa
MA	měřicí anténa
ZO	zkoušený objekt
WiFi	skupina bezdrátových síťových protokolů
LISN	impedance stabilization network
LCD	liquid crystal display
SPI	Serial Peripheral Interface
SCK	Serial Clock
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
CS	Chip Select
PZTS	poplachové zabezpečovací a tísňové systémy
PIR	pasivní infračervené čidlo
MW	zkratka pro mikrovlnné vyzařování

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní dělení EMC [2].....	10
Obr. 2. Základní bloky EMC [3].....	11
Obr. 3 Definice úrovní a mezí vyzařování [3]	13
Obr. 4 Značka shody EU [2].....	17
Obr. 5 Armádní letoun Letoun Northrop B-2 Spirit [7]	19
Obr. 6 Interferenční zdroje [3].....	20
Obr. 7 Galvanická vazba [3].....	22
Obr. 8 Kapacitní vazba [3].....	22
Obr. 9 Induktivní vazba [3].....	23
Obr. 10 Vyzařovací vazba [3].....	24
Obr. 11 Měření dvou vodičů pomocí smyčkové antény [1]	24
Obr. 12 Schematické znázornění Huygensova principu [1]	26
Obr. 13 Přepočítání elektromagnetického pole z blízké do vzdálené zóny [13].....	27
Obr. 14 Konstrukce sondy [1].....	27
Obr. 15 Princip měření anténou na volném prostranství [Svačina]	29
Obr. 16 Měřené zařízení anténou [3]	30
Obr. 17 Schéma měřiče rušení [3]	31
Obr. 18 Částečně bezodrazová komora [11].....	34
Obr. 19 Bezodrazová komora [12]	34
Obr. 20 Bikonický dipól [13].....	36
Obr. 21 Logaritmicke-periodická anténa [14]	36
Obr. 22 Bilogaritmicke-periodická anténa [zdroj: vlastní].....	37
Obr. 23 Sondy pro měření rušení [15]	38
Obr. 24 Napěťová sonda Svačina [3].....	39
Obr. 25 Proudová sonda Svačina [3]	39
Obr. 26 Blokové schéma LISN [3]	40
Obr. 27 Elektrické schéma zapojení LISN [2].....	41
Obr. 28 Arduino Mini [20]	43
Obr. 29 Arduino Micro [21]	43
Obr. 30 Arduino Fio [22].....	44
Obr. 31 Arduino UNO [18].....	48
Obr. 32 Arduino LCD shield [23].....	48

Obr. 33 Arduino výukový shield [23].....	49
Obr. 34 Modul reálného času [24].....	49
Obr. 35 Napájecí konektor s propojovacími kabely [23].....	50
Obr. 36 Uživatelské rozhraní Arduino IDE [zdroj: vlastní]	50
Obr. 37 Jednotlivé bloky programu [zdroj: vlastní]	51
Obr. 38 RACK s Pc a měřicími přístroji.....	53
Obr. 39 Ukázka měření EMI vyzařování.....	54
Obr. 40 EMI test prádné laboratoře (měření pozadí).....	55
Obr. 41 Aktivace pinů měřená osciloskopem.....	56
Obr. 42 Upravený program pro aktivaci pinu.....	57
Obr. 43 Výsledné měření EMI – úloha číslo 1	57
Obr. 44 Měření Arduina s LCD shieldem.....	58
Obr. 45 Měření dvou modulů Arduino komunikující přes SPI	59
Obr. 46 Schéma zapojení smyčky detektoru	61
Obr. 47 Ústředna PZTS s detektorem.....	62
Obr. 48 Detail na výběr střežené zóny.....	62
Obr. 49 Měření EMI ústředny.....	63
Obr. 50 Příprava stínící krabice	64
Obr. 51 Měření ústředny ve stínící krabici s pryžovou výplní	65
Obr. 52 Měření ústředny ve stínící krabici stíněnou hliníkovou fólií.....	65
Obr. 53 Měření interference na vedení [3]	66
Obr. 54 Schéma konstrukce a zapojení vlastní LISN	67
Obr. 55 Konstrukce LISN s výstupním konektorem	68
Obr. 56 Zkušební měření 12 V akumulátoru	69
Obr. 57 Ústředna PZTS po připojení k analyzátoru	69
Obr. 58 Ústředna – měření EMI na vedení.....	70
Obr. 59 Perlička s děleným jádrem [26].....	71
Obr. 60 Ukázka měření na vedení	71
Obr. 61 Porovnání měřených výsledků.....	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Seznam měřících antén [3]	35
Tab. 2. Seznam použitých součástek	60
Tab. 3. Stav ústředny a hodnota pinu A5.....	61
Tab. 4. Kritéria měření interference na DC vedení.....	66

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: PROGRAM PRO AKTIVACI PINŮ V.1

Příloha P II: PROGRAM PRO AKTIVACI PINŮ V.2

Příloha P III: PROGRAM PRO VÝPIS NA LCD SHIELD

Příloha P IV: PROGRAM PRO KOMUNIKACI SPI

Příloha P V: PROGRAM ÚSTŘEDNÝ

PŘÍLOHA P I: PROGRAM PRO AKTIVACI PINŮ V.1

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  pinMode(2, OUTPUT);  
  pinMode(3, OUTPUT);  
  pinMode(4, OUTPUT);  
  pinMode(5, OUTPUT);  
  pinMode(6, OUTPUT);  
  pinMode(7, OUTPUT);  
  pinMode(8, OUTPUT);  
  pinMode(9, OUTPUT);  
  pinMode(10, OUTPUT);  
  pinMode(11, OUTPUT);  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  digitalWrite(2, HIGH);  
  digitalWrite(3, HIGH);  
  digitalWrite(4, HIGH);  
  digitalWrite(5, HIGH);  
  digitalWrite(6, HIGH);  
  digitalWrite(7, HIGH);  
  digitalWrite(8, HIGH);  
  digitalWrite(9, HIGH);  
  digitalWrite(10, HIGH);  
  digitalWrite(11, HIGH);  
  digitalWrite(12, HIGH);  
  digitalWrite(13, HIGH);  
  digitalWrite(2, LOW);  
  digitalWrite(3, LOW);  
  digitalWrite(4, LOW);  
  digitalWrite(5, LOW);  
  digitalWrite(6, LOW);  
  digitalWrite(7, LOW);  
  digitalWrite(8, LOW);  
  digitalWrite(9, LOW);  
  digitalWrite(10, LOW);  
  digitalWrite(11, LOW);  
}
```

PŘÍLOHA P 2: PROGRAM PRO AKTIVACI PINŮ V.2

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  DDRD=B01111100;  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  while(true) {  
    PORTD = B01111100;  
    PORTD = B00000000;  
  }  
}
```

PŘÍLOHA P 3: PROGRAM PRO VÝPIS NA LCD SHIELD

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
#define lcdSvit 10

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(lcdSvit, OUTPUT);
  lcd.begin(16, 2);
  digitalWrite(lcdSvit, HIGH);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("ahoj arduino...");
  delay(500);
  lcd.clear();
}

void loop() {
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("heslo: ");
  delay(500);
  // nastavení výpisu na třináctý znak, první řádek
  lcd.setCursor(6, 0);
  lcd.print("1234");
  delay(500);
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("zamitnuto");
  delay(500);
  lcd.clear();

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("heslo: ");
  delay(500);
  lcd.setCursor(6, 0);
  lcd.print("data");
  delay(500);
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("zamitnuto");
  delay(500);
  lcd.clear();

  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("heslo: ");
  delay(500);
  lcd.setCursor(6, 0);
  lcd.print("heslo");
  delay(500);
  lcd.setCursor(3, 1);
  lcd.print("zamitnuto");
  delay(100);
  lcd.clear();
}
```

PŘÍLOHA P 4: PROGRAM PRO KOMUNIKACI SPI

```
#include <SPI.h>

SPISettings spi_setting(16000000, MSBFIRST, SPI_MODE0);

void setup() {
  SPI.begin();
  pinMode(0, OUTPUT);
  pinMode(1, INPUT);
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  pinMode(4, INPUT);
  pinMode(5, INPUT);
  pinMode(6, INPUT);
  pinMode(7, INPUT);
}

void loop() {
  uint8_t data[] = { 0x55, 0xAA, 0x55, };

  SPI.beginTransaction(spi_setting);

  digitalWrite(SS, LOW);
  SPI.transfer(data, sizeof(data));
  digitalWrite(SS, HIGH);

  SPI.endTransaction();
}
```

PŘÍLOHA P 5: PROGRAM ÚSTŘEDNY

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <SPI.h>
// inicializace LCD displeje
LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7);
#define lcdSvit 10

SPISettings spi_setting(16000000, MSBFIRST, SPI_MODE0);

int sloupec1=12;    // sloupec1 maticove klavesnice bude na vystupu 2=D2
int sloupec2=11;    // sloupec2 maticove klavesnice bude na vystupu 11=D11
int sloupec3=3;     // sloupec3 maticove klavesnice bude na vystupu 12=D12
int sloupec4=2;     // sloupec4 maticove klavesnice bude na vystupu 13=D13

int GetZoneImpedance(int num_zone);
unsigned int cteni_cislic(void);    // cislice 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9
char cteni_pismen(void);           // ridici znaky # a *
String nactiTitlacitka(int analog);
int radek, sloupec;

void setup() {

SPI.begin();
lcd.begin(16, 2);
pinMode(lcdSvit, OUTPUT);

pinMode(sloupec1, OUTPUT);
pinMode(sloupec2, OUTPUT);
pinMode(sloupec3, OUTPUT);
pinMode(sloupec4, OUTPUT);

lcd.clear();
lcd.setCursor(0,0);

digitalWrite(lcdSvit, HIGH);

}

int r1,r2,r3,r4;
char pismeno;
int cislice;
int vala,valb,valc,valid;    // DBG

void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

char stavA, stavB, stavC, stavD, znak;           //jednotlive stavy zon, promenna znak pro *,#
unsigned long int PIN_OK, PIN, cislice;         //promenne pro spravny PIN,
int curs, zonaA, zonaB, zonaC, zonaD, alarm;    //promenna pro funkci ALARM

PIN_OK=6666;

znak='X'; //na zacatku programu je znak nastaven na 'X'

stavA='N';stavB='N';stavC='N';stavD='N';

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("**** Vita Vas ****");           //uvitaci napis po inicializaci displeje
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("**** USTREDNA **");
    delay(2000);
    lcd.clear();
    /*
pomoci znaku A,B,C a D výběr zony, kterou strezit/odstrejit
znak krizku (#) jako "ESC" nebo "EXIT"
znak hvездicky (*) jako potvrzeni nebo "ENTER"
*/
}
```



```

while (1>0)
{

    uint8_t data[] = { 0x55, 0xAA, 0x55, };

    SPI.beginTransaction(spi_setting);

    digitalWrite(SS, LOW);
    SPI.transfer(data, sizeof(data));
    digitalWrite(SS, HIGH);

    SPI.endTransaction();

    lcd.setCursor(0,0);           //vypis stavu zon
    lcd.print(" A - ");
    lcd.print(stavA);

    lcd.setCursor(6,0);         //vypis stavu zon
    lcd.print(" B - ");
    lcd.print(stavB);

    lcd.setCursor(0,1);        //vypis stavu zon
    lcd.print(" C - ");
    lcd.print(stavC);

    lcd.setCursor(6,1);        //vypis stavu zon
    lcd.print(" D - ");
    lcd.print(stavD);

    delay(2);

    zonaA=zonaB=zonaC=zonaD=1;   //rezim nastavovani zon
    cislice=10;                  //cislice je rovna 10 - neni na klavesnici, neutralni znak

    // test stiku klavesy A (tj. zastrezeni/odstrezeni zony A)
    digitalWrite(sloupec4,HIGH); // pismena A,B,C,D
    delay(1);
    vala=analogRead(A1);         // DBG
    lcd.setCursor(12,1);         // DBG
    lcd.print(vala);             // DBG

    delay(1000);

    if (vala>500)
    {
        digitalWrite(sloupec4,LOW);
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.clear();

        if(stavA=='N')
        {
            lcd.print("Pro strezeni A");
        }
        else
        {
            lcd.print("Pro odstrezeni A");
        }

        lcd.setCursor(0,1);
        lcd.print("PIN:");
        curs=5;
        lcd.setCursor(5,1);
        lcd.print(" "); //premazani ****
        PIN=0;
    }
}

```

```

lcd.print("      "); //premazani ****
PIN=0;
znak=' ';

delay(2000); // DBG

while(curs<11 && znak!='*' && znak!='#') // neustale nacitame cislice
{
    cislice=cteni_cislic(); // dokud jich neni 6 (maximalni delka PINu)
    if(cislice!=10)
    {
        PIN=(10*PIN)+cislice;
        lcd.setCursor(curs,1);
        //lcd.print('*'); // hvezdicka misto cislice protoze zadavame PIN
        lcd.print(cislice);
        //delay(100);
        curs++;
    }
    znak=cteni_pismen();

    lcd.setCursor(13,0); // DEBUG
    lcd.print(cislice); // DEBUG
    lcd.setCursor(13,1); // DEBUG
    lcd.print(znak); // DEBUG
    delay(100);
} // end of while pro cteni PINU

if ((znak=='*' || curs==11) && PIN==PIN_OK) //pokud je znak * nebo je zadano 6 cisel
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("PIN OK - zona A");
    lcd.setCursor(0,1);
    if(stavA=='N')
    {
        lcd.print("je strezena");
        stavA='S'; //zmena stavu
        zonaA=0; //jdeme pryč z rezimu nastavovani
        delay(2000);
        lcd.clear();
    }
    else
    {
        lcd.print("je odstrezena");
        stavA='N'; //zmena stavu
        zonaA=0; //jdeme pryč z rezimu nastavovani
        delay(2000);
        lcd.clear();
    }
    znak='X';
} // end of if ((znak=='*' || curs==11) && PIN==PIN_OK)

if ((znak=='#') && (PIN!=PIN_OK))
{
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("SPATNY PIN");
    delay(2000);
    lcd.clear();
}
} //end if (analogRead(A1)<300) - TEST STISKU KLAVESY A

else
    digitalWrite(sloupec4,LOW);

unsigned int cteni_cislic(void){

```

```

char cteni_pismen(void){          // FUNKCE PRO CTENI KLAVES * a #

    char pismenko;
    pismenko='X';
    int r4;
    int stisk_hv=0;

    digitalWrite(sloupecl,HIGH);
    delay(10);

    r4=analogRead(A4);
    lcd.setCursor(11,0);
    lcd.print("  ");
    lcd.setCursor(11,0);
    lcd.print(r4);

    if(r4>500)
    {
        pismenko='*';
        stisk_hv=1;
    }
    digitalWrite(sloupecl,LOW);
    digitalWrite(sloupec3,HIGH);
    delay(10);

    r4=analogRead(A4);
    if (stisk_hv==0)
    {
        lcd.setCursor(11,0);
        lcd.print("  ");
        lcd.setCursor(11,0);
        lcd.print(r4);
    }

    if(r4>500)
        pismenko='#';

    digitalWrite(sloupec3,LOW);

    return pismenko;
}

String nactiTlacitka(int analog) {
    // promenne pro ulozeni textu pro vypis
    String text;
    // postupna kontrola pomoci podminek if,
    // pro kazde tlacitko je uveden rozsah hodnot,
    if (analog < 50) text = "R";
    if ((analog > 700) && (analog < 1024)) text = "X";
    if ( (analog > 95) && (analog < 150) ) text = "U";
    if ( (analog > 250) && (analog < 350) ) text = "D";
    if ( (analog > 400) && (analog < 500) ) text = "L";
    if ( (analog > 600) && (analog < 750) ) text = "S";
    // vraceni textu jako vstup funkce
    return text;
}

int GetZoneImpedance(int num_zone)
{

    int val_a5;

    val_a5=analogRead(A5);
    delay(1);

    return val_a5;
}

```