

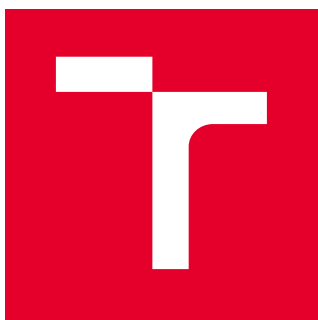
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Petr Musil



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DEMONSTRACE METOD SNIŽOVÁNÍ PRAVDĚPODOBNOSTI CHYBNÉHO PŘÍJMU

DEMONSTRATION OF OPTIMAL RECEIVERS FOR THE AWGN CHANNEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Musil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Číž, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Petr Musil

ID: 161835

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Demonstrace metod snižování pravděpodobnosti chybného příjmu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte principy metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu a seznamte se s možnými způsoby realizace příslušných přijímačů. V prostředí MATLAB-SIMULINK vytvořte jejich simulační modely. Dále navrhnete koncepci a podrobné schéma zapojení laboratorního přípravku napájeného ze symetrického zdroje o napětí $\pm 12V$, který by umožnil názornou demonstraci přijímače s přizpůsobeným filtrem a vybíjeným integrátorem. Tento přípravek zhotovte a proveďte měření, kterými prokážete jeho správnou funkci. Vypracujte vzorovou laboratorní úlohu s tímto přípravkem, která prakticky ukáže účinnost jednotlivých metod snižování pravděpodobnosti chybného příjmu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DOBEŠ, J., ŽALUD, V. Moderní radiotechnika. Praha : BEN, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.

[2] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR - ATmega16 . Praha : BEN, 2006. 320 s. ISBN 80-730-174-8.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Radim Číž, Ph.D.

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá demonstrací metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu. V rámci teoretické části práce jsou rozebrány metody snižující pravděpodobnost chybného příjmu, problematika přenosového kanálu a parametry přenosových systémů. Jednotlivé metody jsou simulovány v prostředí Matlab Simulink, model je realizován pomocí přenosového kanálu rušeného aditivním bílým Gaussovým šumem. Výstupem jsou simulační oscilogramy zachycující napěťové průběhy v jednotlivých fázích zpracování signálu. Praktickým výstupem této práce je funkční laboratorní přípravek demonstrující přenos: přímou signálovou cestou, signálovou cestou s korelačním přijímačem a signálovou cestou s přizpůsobeným filtrem. Jednotlivá obvodová zapojení jsou podrobně popsána, pro názornost jsou přiloženy i oscilogramy napěťových průběhů bloků zpracujících signál. Součástí praktické části je návrh desky plošných spojů, kompletní dokumentace pro výrobu, výsledky měření a vzorově vypracovaná laboratorní úloha.

KLÍČOVÁ SLOVA

aditivní bílý Gaussův šum, bitová chybovost, binární posloupnost, pravděpodobnost chybného příjmu, přizpůsobený filtr, vybíjený integrátor

ABSTRACT

This thesis deals with the demonstration of bit error rate reduction techniques. In the theory section, different techniques of bit error rate reduction are presented, followed by the introduction of the communication channel and the communication system parameters. Each technique is simulated in Matlab Simulink environment using the additive white Gaussian noise channel model. The simulations are captured in waveform oscillograms of all the signal processing stages. The practical section of this thesis offers a functional laboratory solution demonstrating different ways of transmission: a direct-path signal, a path with a cross-correlation receiver and a path using matched filtering. The individual circuits are described in detail, including waveform oscillograms of the signal processing blocks for illustration. Furthermore, the practical section presents printed circuit boards designs, comprehensive documentation for production, measurement results and a sample laboratory protocol.

KEYWORDS

AWGN, BER, binary sequence, bit error probability, cross-correlation receiver, matched filter

MUSIL, Petr. *Demonstrace metod snižování pravděpodobnosti chybného příjmu*. Brno, Rok, 86 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Radim Číž, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Demonstrace metod snižování pravděpodobnosti chybného příjmu“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radimovi Čížovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsaný v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Teoretický rozbor	13
1.1 Typy signálů v přenosových systémech	13
1.1.1 Parametry přenášených signálů	13
1.2 Šum	14
1.2.1 Dělení šumů	14
1.2.2 Aditivní bílý Gaussův šum	16
1.3 Přenosový kanál	16
1.3.1 Kvalitativní hodnocení přenosového kanálu	17
1.4 Stanovení pravděpodobnosti přijetí chybného bitu	18
1.5 Simulace metod v prostředí Matlab Simulink	19
1.5.1 Simulační model pro přímou cestu	20
1.5.2 Simulační model využívající přizpůsobeného filtru	20
1.5.3 Simulační model využívající korelační přijímač	21
1.5.4 Stanovení pravděpodobnosti chybného příjmu	23
2 Řešení a dosažené výsledky	26
2.1 Návrh obvodového zapojení	26
2.1.1 Napájení aplikace	26
2.1.2 Mikroprocesor a periferie	27
2.1.3 Generování binární posloupnosti	29
2.1.4 Úprava úrovní generované posloupnosti unipolárního NRZ signálu na bipolární NRZ signál	29
2.1.5 Filtrace AWGN - aktivní dolní propust	31
2.1.6 Lineární součet bipolární posloupnosti s AWGN	32
2.1.7 Volba signálové cesty – integrátor	34
2.1.8 Metody snižující pravděpodobnost chybného příjmu využívající integrátor	35
2.1.9 Vzorkování - obvod Sample and Hold	38
2.1.10 Úprava napěťových úrovní pro analogově-digitální převodník	42
2.1.11 Úprava napěťové úrovně vyhodnoceného bitu	42
2.2 Program laboratorního přípravku	43
2.2.1 Správa časovačů	43
2.2.2 Stisk tlačítka	44
2.2.3 Výpis dat na displej	45
2.2.4 Vizualizace signalizace	45

2.3	Konstrukce laboratorního přípravku	45
2.3.1	DPS s měřicími zdírkami, BNC konektorem a tlačítky	46
2.3.2	DPS s mikroprocesorem a obvody zpracování signálu	46
2.3.3	Výroba prototypové DPS	47
2.3.4	Osazení prototypové DPS	48
2.3.5	Ovládací panel laboratorního přípravku	50
2.3.6	Zakázková výroba DPS	50
2.3.7	Osazení zakázkově vyrobené DPS	52
2.3.8	Programování mikroprocesoru	52
2.4	Ovládání laboratorního přípravku	55
2.5	Výsledky měření	57
3	Závěr	60
	Literatura	61
	Seznam zkratk	64
	Seznam příloh	65
A	Seznam použitých součástí	66
B	Schémata zapojení funkčních bloků	67
C	Podklady pro výrobu a osazení DPS	70
D	Výkres vrtacích otvorů, potisk přípravku	76
E	Vypracovaná laboratorní úloha	78
F	Obsah přiloženého CD	86

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Gaussův šum modelovaný v prostředí Matlab.	15
1.2	Základní komunikační schéma dle Shannon-Weavera.	17
1.3	Model přímé cesty v programu Matlab Simulink.	19
1.4	Oscilogram přímé cesty v programu Matlab Simulink.	21
1.5	Blokové schéma přizpůsobeného filtru.	21
1.6	Model přizpůsobeného filtru v programu Matlab Simulink.	22
1.7	Oscilogram přizpůsobeného filtru v programu Matlab Simulink.	22
1.8	Blokové schéma korelačního přijímače.	23
1.9	Model korelačního přijímače v programu Matlab Simulink.	23
1.10	Oscilogram modelu korelačního přijímače v programu Simulink.	24
1.11	Posloupnosti: 0x0000h, 0xFFFFh, 0xAAAAh, 0xA54Eh, 0xE253h, 0xBA87h a 0x5D6Dh	25
2.1	Schéma napájecího zdroje laboratorního přípravku s ochranami.	26
2.2	Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega 16A a základních periférií.	28
2.3	Oscilogram mikroprocesorem generované unipolární posloupnosti A54Eh.	29
2.4	Obvodové zapojení realizující převod unipolárního signálu na signál bipolární.	30
2.5	Oscilogram unipolární binární posloupnosti generované mikroprocesorem (oranžově) a oscilogram signálu typu NRZ se sníženým rozkmitem (zeleně).	31
2.6	Obvod realizující dolní propust přiváděného AWGN se zesílením v propustném pásmu.	32
2.7	Oscilogram vstupního AWGN šumu (oranžově) a šumu filtrovaného dolní propustí (zeleně)	33
2.8	Zapojení OZ realizující součet bipolárního signálu s vyfiltrovaným šumem a zapojení realizující rozdíl dvou signálů zpožděných vůči sobě o jednu bitovou periodu.	33
2.9	Oscilogram na vstupu (oranžově) a na výstupu (zeleně) zapojení 2.8 realizujícího součet binárního signálu (posloupnost 0xBA87) s vyfiltrovaným šumem efektivní hodnoty $1 V_{RMS}$	34
2.10	Zapojení integrátoru s analogovými přepínači.	35
2.11	Převod unipolárního signálu zpožděného o jednu signálovou periodu na signál bipolární.	36
2.12	Oscilogram výstupů zapojení 2.8 realizujících zpoždění dvou signálů vůči sobě o jednu symbolovou periodu pro posloupnost 0xBA87h.	37

2.13	Oscilogram součtu signálů NRZ a NRZD (oranžově) posloupnosti 0xBA87 (oscilogram 2.12) a výstup (zeleně) přizpůsobeného filtru po provedení integrace vstupního signálu.	38
2.14	Oscilogram vstupu (oranžově) a výstupu (zeleně) zapojení 2.10 při použití vybíjeného integrátoru.	39
2.15	Obvodové zapojení realizující vzorkování - Sample and Hold.	40
2.16	Oscilogram řídicího signálu vzorkování SH (zeleně) a výstupního signálu SAMPLE s aktuálně udržovanou hodnotou napětí (oranžově) . . .	40
2.17	Oscilogram řídicího signálu vzorkování SH (oranžově) a generované binární posloupnosti (zeleně) při rychlosti 1 kbit/s.	41
2.18	Oscilogram řídicího signálu vzorkování SH (oranžově) a generované binární posloupnosti (zeleně) při rychlosti 12 kbit/s.	41
2.19	Obvodové zapojení simulující výstup rozhodovacího obvodu.	42
2.20	Oscilogram vyslané NRZ posloupnosti (oranžově) a posloupnosti přijaté (zeleně).	43
2.21	Zakázkově vyrobená DPS (vlevo) a prototypová DPS (vpravo).	51
2.22	Osazená zakázkově vyrobená DPS (vlevo) a osazená prototypová DPS (vpravo).	52
2.23	Detail uchycení lineárního stabilizátor LM7805.	53
2.24	Tovární nastavení pojistek mikroprocesoru vlevo, nastavení nutné pro správné naprogramování je vyobrazeno na pravém snímku.	53
2.25	přípravek1	55
2.26	přípravek1-2	55
2.27	Výpis parametrů přenosu a počtu chybně přijatých bitů na displej. . .	56
2.28	Grafické znázornění závislosti relativní odchylky pravděpodobnosti chybně přijatého bitu na efektivní hodnotě šumu.	58
B.1	Schéma zapojení ovládací desky s kontakty pro připojení LCD displeje	67
B.2	Schéma zapojení mikroprocesoru, napájecího zdroje a konektoru . . .	68
B.3	Schéma zapojení obvodů zpracujících signál	69
C.1	Předloha horní strany DPS ovládacího panelu	70
C.2	Předloha dolní strany DPS ovládacího panelu	70
C.3	Osazovací plán horní strany DPS ovládacího panelu	71
C.4	Osazovací plán dolní strany DPS ovládacího panelu	71
C.5	Předloha horní strany DPS pro zpracování signálu	72
C.6	Předloha dolní strany DPS pro zpracování signálu	73
C.7	Osazovací plán horní strany DPS pro zpracování signálu	74
C.8	Osazovací plán dolní strany DPS pro zpracování signálu	75
D.1	Výkres vrtacích otvorů ovládacího panelu, horní a čelní pohled.	76
D.2	Potisk laboratorního přípravku	77

SEZNAM TABULEK

1.1	Pravděpodobnost chybně přijatého bitu pro zadaný rozsah efektivní hodnoty šumu.	24
2.1	Tabulka počtu chybně přenesených bitů pro přenosovou rychlost 1 kbit/s	57
2.2	Tabulka počtu chybně přenesených bitů pro přenosovou rychlost 8 kbit/s	57
2.3	Tabulka počtu chybně přenesených bitů pro přenosovou rychlost 12 kbit/s	58
2.4	Počet chybně přijatých bitů a výsledná chybovost při opakovaném přenosu.	59

ÚVOD

Při přenosu datových zpráv telekomunikačním kanálem může vlivem vnějších okolností dojít k pozměnění obsahu přenášených dat. Nejvýznamněji ovlivňuje přenášený signál nežádoucí rušení, které může pocházet jak ze zdrojů přírodních (slunce, atmosférické jevy), tak také z antropogenní činnosti. Jedná se zejména o interferenci vysílacích zařízení a o šumové jevy, které vznikají v každém elektronickém obvodu.

Cílem této práce je teoreticky a následně prakticky demonstrovat metody, které jsou v telekomunikační praxi využívány ke snižování pravděpodobnosti chybného příjmu. Praktickým výstupem je laboratorní přípravek, pomocí kterého se studenti v rámci laboratorní výuky s těmito metodami seznámí a experimentálně ověří efektivitu jednotlivých metod snižování pravděpodobnosti chybného příjmu.

V teoretické části je práce zaměřena na základní parametry přenosových systémů a na fyzikální vztahy, které spolu při šíření signálu působí. Pozornost je také věnována šumu, jeho vlastnostem a principům vzniku. Závěr teoretické části rozebírá metody snižující pravděpodobnost chybného příjmu a obsahuje také výsledky simulace jednotlivých metod v programu Matlab Simulink.

Praktická část je zaměřena na realizaci kompletního návrhu laboratorního přípravku. Tento přípravek je založen na mikroprocesoru Atmel AVR. Použitím tohoto laboratorního přípravku je možné názorně demonstrovat závislost bitové chybovosti přenosu na efektivní hodnotě napětí bílého Gaussova šumu při přenosu: přímou signálovou cestou, za použití korelačního přijímače (vybíjeného integrátoru) a přizpůsobeného filtru. Praktická část obsahuje návrhy jednotlivých obvodových zapojení, popis programu laboratorního přípravku, postup konstrukce a vzorově vypracovanou laboratorní úlohu.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

1.1 Typy signálů v přenosových systémech

Posloupnost informačních bitů v základním pásmu je v praxi realizována pomocí časové posloupnosti napěťových úrovní na výstupu vysílače. V praxi jsou využívány signály unipolární (napěťová úroveň 0 a napěťová úroveň +A) a signály bipolární (napěťové úrovně mohou nabývat stavu 0, +A a -A). Tyto signály jsou dále děleny na signály typu RZ (return to zero) a typu NRZ (non return to zero). Signály typu return to zero se vyznačují návratem zpět k referenční hodnotě napětí v intervalu mezi dvěma vyslanými bity. Signál NRZ je charakteristický pouze změnou napěťové úrovně mezi dvěma stavy, nedochází tedy k návratu na referenční hodnotu napětí, nejčastěji k nulové hodnotě napětí. Při samotné realizaci této komunikace však nastávají potíže s nenulovou stejnosměrnou složkou, příliš velkou šířkou spektra daného signálu a mimo jiné i s příliš dlouhými posloupnostmi signálu jedné napěťové úrovně, které zapříčiňují např. problémy se synchronizací. Pro přenosy na větší vzdálenosti jsou tedy vhodnější tzv. linkové kódy [6], [21].

1.1.1 Parametry přenášených signálů

Modulační rychlost

Modulační rychlost je vyjádřena jako počet přenesených symbolů (signálových prvků) za sekundu [6].

$$M = \frac{1}{T_s} \quad [\text{Bd}] \quad (1.1)$$

T_s ... doba trvání jednoho signálového prvku.

Přenosová rychlost

Přenosová rychlost je definována počtem přenesených bitů za sekundu.

$$M = \frac{1}{T_b} \quad [\text{bit/s}] \quad (1.2)$$

T_b ... doba trvání jednoho bitu.

Za podmínky, kdy $T_s > T_b \cdot n$, kde $n \in \{1,2,3,4,\dots\}$ určuje počet bitů na jeden symbol, můžeme využít vztahu [6]:

$$R = M \cdot \log_2 Q = n \cdot M \quad [\text{bit/s}] \quad (1.3)$$

Q ... počet všech stavů, kterých signál nabývá.

1.2 Šum

Termínem šum je v případě přenosových kanálů chápán jakýkoliv náhodný signál, který může vést k narušení procesu zpracování signálu užitečného. Pro šum není možné v daném časovém okamžiku predikovat jeho hodnotu, ani jej není možné vyjádřit jednoznačnou funkcí času. Náhodné signály, tedy i šum, bývají popsány statistickými parametry, nejčastěji jsou využívány střední hodnoty těchto signálů – momenty. Jedná se zejména o střední hodnotu prvního řádu (stejnoseměrnou složku signálu), střední kvadrát (efektivní hodnota signálu) a rozptyl (variance), který odpovídá efektivní hodnotě střídavé složky daného signálu [12], [28].

1.2.1 Dělení šumů

Šum je rozlišen dle kmitočtové závislosti na:

- šum bílý s rovnoměrným rozložením kmitočtových složek spektra,
- šum barevný s nerovnoměrným rozložením kmitočtových složek spektra.

V elektrotechnické praxi je také rozlišován šum podle umístění zdroje a to na:

- šum externí (šum produkovaný průmyslovými zařízeními, atmosférický a vesmírný šum),
- šum interní (v rámci elektronických obvodů).

Šum interní je dále dělen dle principu vzniku na:

- tepelný šum,
- výstřelový šum,
- blikavý šum,
- praskavý šum.

Tepelný šum

Tepelný šum, někdy označován také jako Johnsonův šum, vzniká stochastickým tepelným pohybem nosičů náboje (elektronů) ve vodičích i polovodičích při teplotě nad 0 K [20].

$$U_T^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot R \quad [\text{V}] \quad (1.4)$$

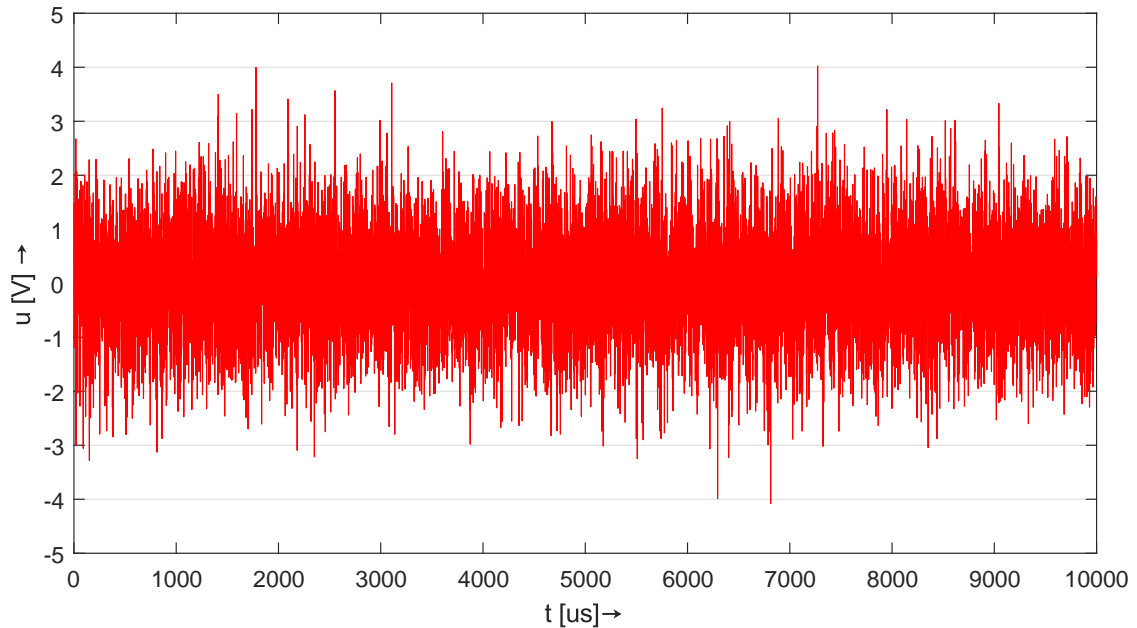
k ... Boltzmannova konstanta

T ... teplota daného objektu s nosiči náboje

R ... hodnota rezistivity

Ze vztahu 1.4 je zřejmé, že šumová hodnota napětí s rostoucí teplotou a s vyššími hodnotami rezistivity roste.

Spektrální hustota tepelného šumu je v celém spektru téměř konstantní [6], [12].



Obr. 1.1: Gaussův šum modelovaný v prostředí Matlab.

V rámci návrhu elektronických zařízení je třeba dbát také na vhodnou volbu materiálu použitých součástek, např. uhlíkový kompozitní rezistor v obvodu produkuje větší šumové napětí než rezistor metaloxidový.

Výstřelový šum

Výstřelový šum (Schottkyho šum) je typický pro součástky, které obsahují PN přechod. Principem vzniku je kvantová generace a rekombinace náboje.

Blikavý šum

Blikavý šum, někdy znám jako kmitavý šum či šum $1/f$, je typ šumu, jehož spektrální hustota výkonu s rostoucím kmitočtem klesá. Vzniká v místě poruch krystalové mřížky.

Praskavý šum

Praskavý šum je opět typický pro přechod mezi emitorem a bází, je způsoben kontaminací ionty těžkých kovů. Praskavý šum se řadí do skupiny šumu $1/f$ [20].

1.2.2 Aditivní bílý Gaussův šum

Aditivní bílý Gaussův šum je typ stochastického signálu, který je využíván v teorii informace. V praxi je využíván pro modelování, simulaci při návrhu a testování elektronických obvodů přenosových kanálů a systémů [12], [6]. Průběh Gaussova bílého šumu je zachycen na simulačním oscilogramu 1.1.

Pojem bílý má analogii se spektrem viditelného bílého světla, kde jednotlivé spektrální výkonové složky jsou kmitočtově nezávislé. Dle centrální limitní věty z teorie pravděpodobnosti má součet velkého množství náhodných procesů charakter Gaussova rozdělení hustoty pravděpodobnosti, tomu tedy odpovídá i rozložení okamžitých hodnot amplitud tohoto šumu. Při simulaci a návrhu je předpokládáno, že užitečný signál je s šumem sčítán lineárně, nedochází tedy ke vzniku intermodulací [21], [28].

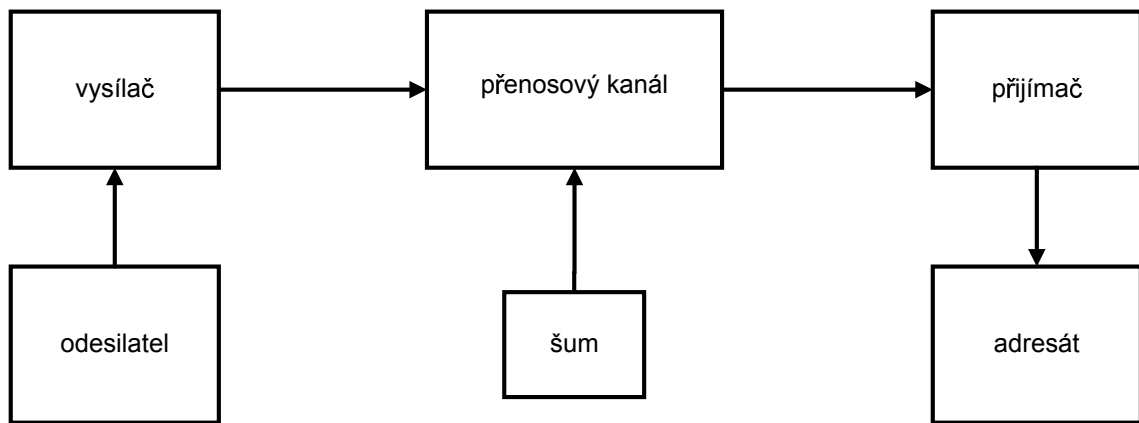
1.3 Přenosový kanál

Přenosový kanál je v oboru telekomunikací chápán jako přenosové médium, kde jeden nebo více vysílačů přenáší data k jednomu či více příjemcům. Přenosovým médiem tak může být metalické vedení, optická linka nebo bezdrátový rádiový spoj. Přenosový kanál je definován svými fyzickými parametry, přenosovou kapacitou, přenosovou rychlostí a šířkou pásma. Z matematické teorie komunikace a lineárního modelu komunikace autorů Shannona a Weavera je přenosový kanál 1.2 definován pěti základními prvky [7], [22] :

- odesílatel,
- vysílač,
- přenosový kanál zatížený šumem,
- přijímač,
- adresát.

V rámci digitální komunikace může za určitých okolností dojít k výskytu chyby v přenosu. Charakter chyby je ovlivněn způsobem, jakým je přenášený signál rušen. Jedná se o ovlivnění přenosového kanálu způsobem deterministickým a neterministickým [12].

Mezi deterministické ovlivnění přenášeného signálu patří vlivy, které jsou dány charakterem vysílače/přijímače, přenosovým médiem nebo například také fyzikálními limity použité technologie. Ve většině případů se jedná o jevy v čase neměnné (např. fázový posuv, zpoždění signálu, útlum signálu), a proto nemají na vznik chyby příliš velký vliv. Vzhledem k faktu, že se jedná o jevy známé, je možné jejich případný negativní dopad redukovat tak, aby byla pravděpodobnost vzniku chyby snížena na nejnížší možnou míru [28].



Obr. 1.2: Základní komunikační schéma dle Shannon-Weavera.

V případě nedeterministického ovlivnění kanálu, nejčastěji nežádoucím šumem, není možné chování těchto jevů predikovat a opatření snižující pravděpodobnost chyby bývají spíše obecného charakteru.

Po lineárním součtu aditivního bílého Gaussova šumu může dojít na straně přijímače k chybnému vyhodnocení přijatého bitu. Nejčastěji k tomu dochází vlivem okamžité amplitudy působícího šumu, který má polaritu opačnou než právě vysílaný binární signál.

1.3.1 Kvalitativní hodnocení přenosového kanálu

Kvalita přijímaného signálu může být vyhodnocována například podle hodnoty odstupů signál/šum (signal-to-noise ratio). Toho je nejčastěji využíváno v případě analogových přenosů. V obecném tvaru je hodnota SNR definována jako poměr výkonu přijatého užitečného signálu vůči výkonu pozadí, tedy šumu. Každý přenosový systém klade různé vysoké nároky na hodnotu odstupů signál/šum, v případě dostatečně vysoké hodnoty odstupů signál/šum bývá přenos dat téměř bez výskytu chyb. S klesající kvalitou přenosového kanálu (hodnoty SNR), například vlivem silného rušení, dochází k nárůstu počtu chyb. V technické praxi je tedy nutné použitím vhodných metod snížit pravděpodobnost chybně přenesených dat na minimum [28].

$$SNR = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \quad [-] \quad (1.5)$$

V rovině digitálních systémů je poměrně vhodné sledovat kvalitu v určitém časovém horizontu a nevyhodnocovat ji pouze jako individuální hodnotu. V tomto ohledu je tedy vhodné vyhodnocovat chybovost přenosového kanálu pomocí BER (Bit Error Rate) 1.6. Tato bitová chybovost je určena poměrem chybně přenesených

elementů vůči všem přeneseným elementům v rámci sledovaného segmentu. Chybovost bývá pro lepší přehlednost a rychlé vyhodnocení často vyjádřena v procentuální formě. Analogický vztah 1.7 platí i pro symbolovou chybovost [6].

$$BER = \frac{N_{be}}{N_b} = \frac{N_{be}}{R \cdot t} \quad [-] \quad (1.6)$$

N_{be} ... počet chybně přenesených bitů

N_b ... počet všech přenesených bitů

R ... přenosová rychlost daného segmentu [bit/s]

t ... sledovaný časový úsek [s]

$$SER = \frac{N_{se}}{N_s} \quad [-] \quad (1.7)$$

1.4 Stanovení pravděpodobnosti přijetí chybného bitu

Po průchodu signálu přenosovým kanálem dochází na straně přijímače k určení binární hodnoty bitu na základě okamžité hodnoty přijímaného signálu v rozhodovacím okamžiku [6], [10]:

$$x_h = s_b + n_{AWGN} \quad (1.8)$$

s_b ... okamžitá amplituda přenášeného binárního signálu

n_{AWGN} ... okamžitá amplituda aditivního bílého Gaussova signálu.

Pravděpodobnost chybného příjmu bitu je při aditivním bílém Gaussově šumu určena vztahem:

$$P_e = P(0) \cdot F_0\left(-\frac{h - A_0}{\sigma}\right) + P(1) \cdot F_0\left(\frac{h - A_1}{\sigma}\right) \quad [-] \quad (1.9)$$

h ... rozhodovací úroveň přijímače

F_0 ... hodnota distribuční funkce normovaného normálního rozdělení

$P(0)$... pravděpodobnost vyslání bitu hodnoty 0

$P(1)$... pravděpodobnost vyslání bitu hodnoty 1

V praxi se nejvíce vyskytuje případ, kdy je hodnota pravděpodobnosti přijetí 0 a 1 shodná, tedy rovna hodnotě 0,5 [9].

V tomto případě je pak možné pravděpodobnost přijetí chybného bitu po úpravě vztahu 1.9 stanovit:

$$P_e = F_0\left(\frac{A_0 - A_1}{2\sigma}\right) \quad [-] \quad (1.10)$$

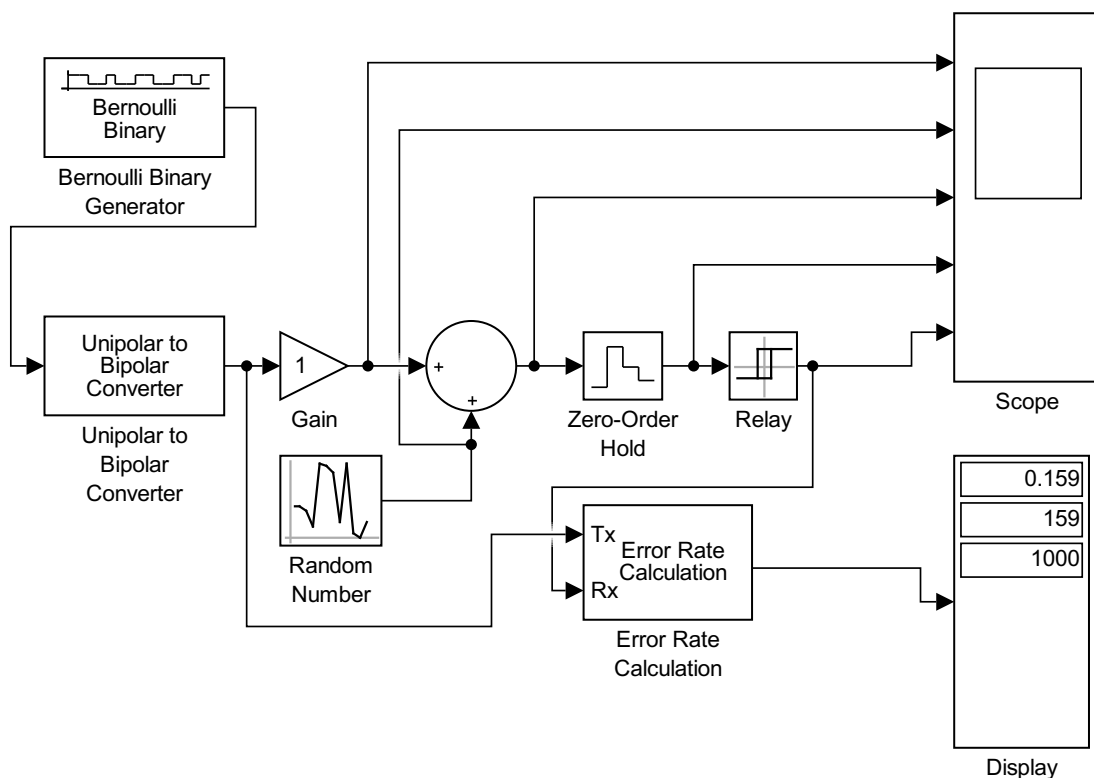
Optimální rozhodovací úroveň h je pak určena:

$$h = \frac{A_0 + A_1}{2} \quad (1.11)$$

V praxi je pravděpodobnost chybného příjmu snižována např. použitím korelačního přijímače (vybíjený integrátor) nebo přizpůsobeného filtru.

1.5 Simulace metod v prostředí Matlab Simulink

Výše uvedené metody snižování pravděpodobnosti chybného příjmu byly podrobeny simulaci v programu Matlab Simulink 1.3.



Obr. 1.3: Model přímé cesty v programu Matlab Simulink.

Zdroj signálu je v rámci jednotlivých modelů reprezentován prvkem **Bernoulli Binary Generator**, tento prvek generuje unipolární binární náhodnou posloupnost s Bernoulliho rozdělením. V dalším kroku je pomocí prvku **Unipolar to Bipolar Converter** unipolární binární signál převeden na signál bipolární. V rámci tohoto prvku je možné nastavit počet stavů signálu, ten je v tomto případě nastaven na hodnotu 2. Prvek **Gain** určuje zesílení signálu, tato hodnota je u všech modelů nastavena na hodnotu 1, rozkmit výsledného signálu tedy není ovlivněn. Náhodný

šum je v prostředí Simulinku generován pomocí členu `Random Number`, hlavním parametrem je zde hodnota `Variance`. Tato hodnota odpovídá efektivní hodnotě AWGN. Užitečný bipolární signál je sečten s AWGN šumem s určenou efektivní hodnotou pomocí prvku `Sum`. Signál je dále vzorkován pomocí bloku `Zero-Order Hold`, blok komparátoru je v rámci modelu realizován prvkem `Relay` se zadanou rozhodovací úrovní, která odpovídá polovině zadaného intervalu. Hodnota chybovosti je stanovena v bloku `Error Rate Calculation`. Tento blok má dva vstupy – výstup bloku `Unipolar to Bipolar Converter` a výstup z bloku `Relay`. Porovnáním aktuálních hodnot těchto dvou bloků je rozhodnuto, zdali byla na výstupu komparátoru stejná logická úroveň jako na výstupu bloku `Unipolar to Bipolar Converter`. Blok `Error Rate Calculation` vypisuje na displej počet všech přijatých bitů, počet chybně přijatých bitů a z těchto dvou hodnot je poměrem stanovena hodnota chybovosti, viz 1.6, [9].

1.5.1 Simulační model pro přímou cestu

Model pro přímou cestu 1.3 je nejtriviálnějším způsobem přenosu. Tento přenosový model nevyužívá žádného z výše uvedených principů snížení pravděpodobnosti chybného příjmu.

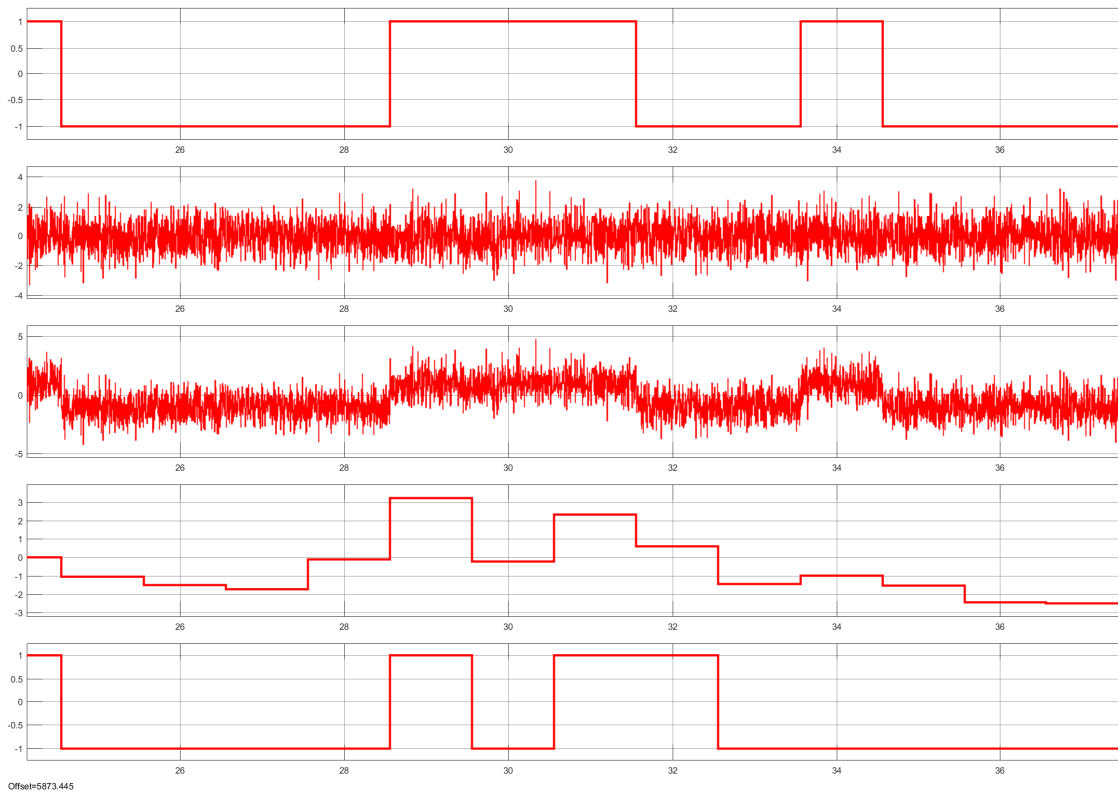
Oscilogram 1.4 zobrazuje průběhy napětí v jednotlivých měřicích bodech daného modelu. První řádek tak odpovídá náhodné binární posloupnosti, druhý řádek reprezentuje AWGN, na třetím řádku je patrný lineární součet náhodné binární posloupnosti s AWGN, na čtvrtém řádku je zobrazeno vzorkování šumem narušené binární posloupnosti, na posledním řádku oscilogramu pak pozorujeme výstupní logické úrovně komparátoru. Z porovnání prvního a posledního řádku je možné stanovit přímo samotnou chybovost přenášeného bitu.

Jednou z metod využívaných pro snížení pravděpodobnosti chybného příjmu je opakovaný přenos. Tato metoda je založena na opakovaném vyslání toho samého bitu, přijatý bit je pak vyhodnocen na základě největšího výskytu detekovaného bitu (0 nebo 1) na straně přijímače. Tato metoda je zvláště při větším počtu opakování poměrně účinná, dochází však k výraznému poklesu přenosové rychlosti.

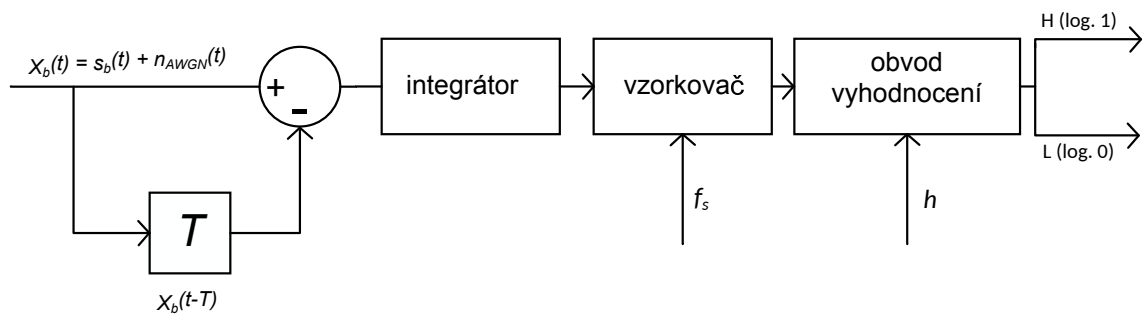
1.5.2 Simulační model využívající přizpůsobeného filtru

Model 1.6, který je založen na použití přizpůsobeného filtru, je oproti přijímači s přímou signálovou cestou 1.3 doplněn o funkční blok `Transport Delay` a blok `Integrator` [9]. Princip tohoto přijímače je založen na kmitočtové filtraci, kdy během každé bitové periody je dosaženo maximální hodnoty SNR.

Oscilogram 1.7 je oproti oscilogramu přímé cesty 1.4 doplněn o průběh napětí za výstupem integrátoru (čtvrtý řádek).



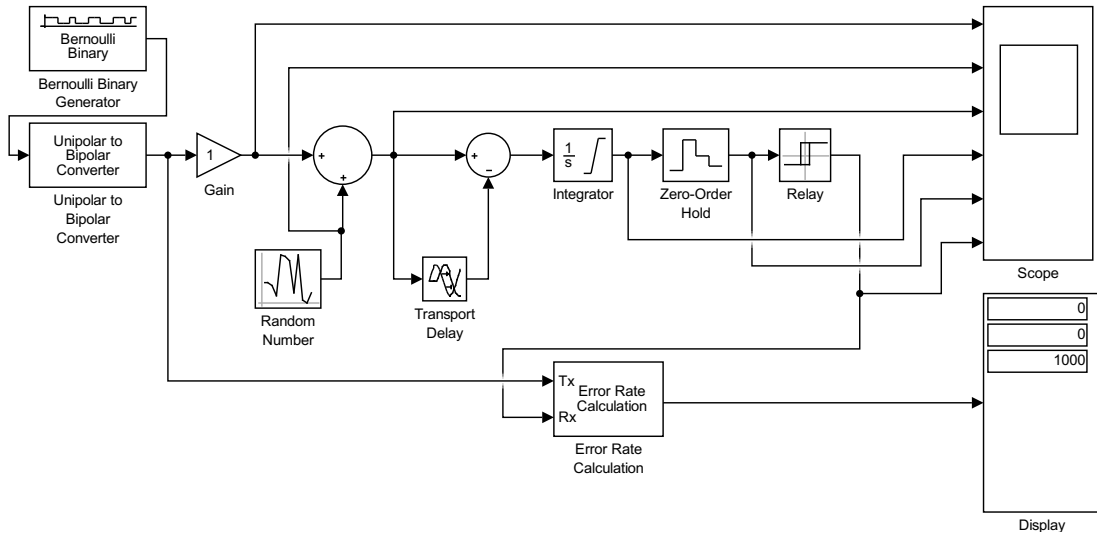
Obr. 1.4: Oscilogram přímé cesty v programu Matlab Simulink.



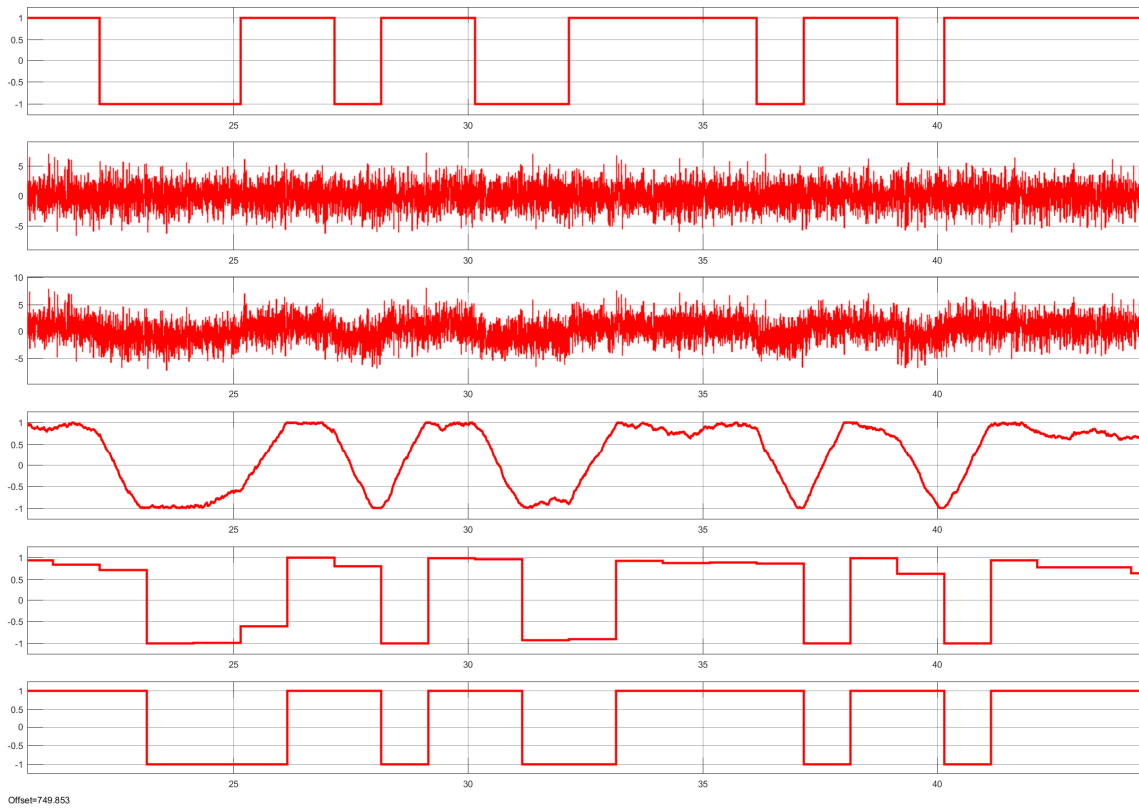
Obr. 1.5: Blokové schéma přizpůsobeného filtru.

1.5.3 Simulační model využívající korelační přijímač

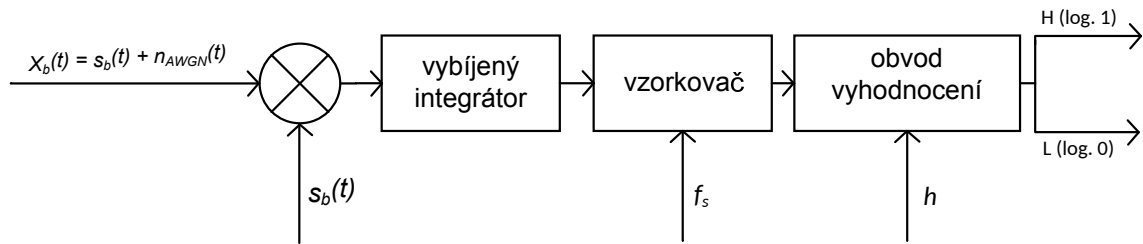
Model 1.9 je oproti přijímači pouze s přímou cestou 1.3 doplněn o funkční bloky Pulse Generator a Integrator. Princip tohoto přijímače je založen na využití paměti, kde vstupní signál je průběžně korelován se signálem uloženým v paměťovém prvku. Paměťový prvek bývá obvykle realizován pomocí paměťového kondenzátoru. Oscilogram 1.10 zachycuje na třetím řádku výstup bloku Pulse Generator, čtvrtý řádek pak zobrazuje výstup bloku Integrator s průběhem, který je typický pro kapacitní prvek - nabíjený/vybíjený kondenzátor [9].



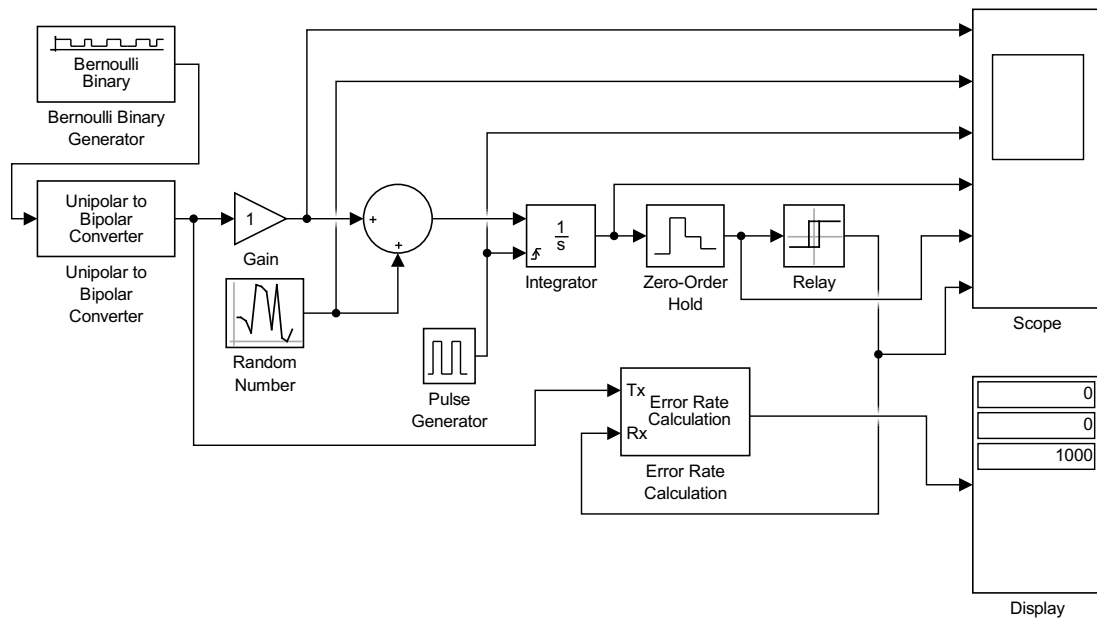
Obr. 1.6: Model přizpůsobeného filtru v programu Matlab Simulink.



Obr. 1.7: Oscilogram přizpůsobeného filtru v programu Matlab Simulink.



Obr. 1.8: Blokové schéma korelačního přijímače.

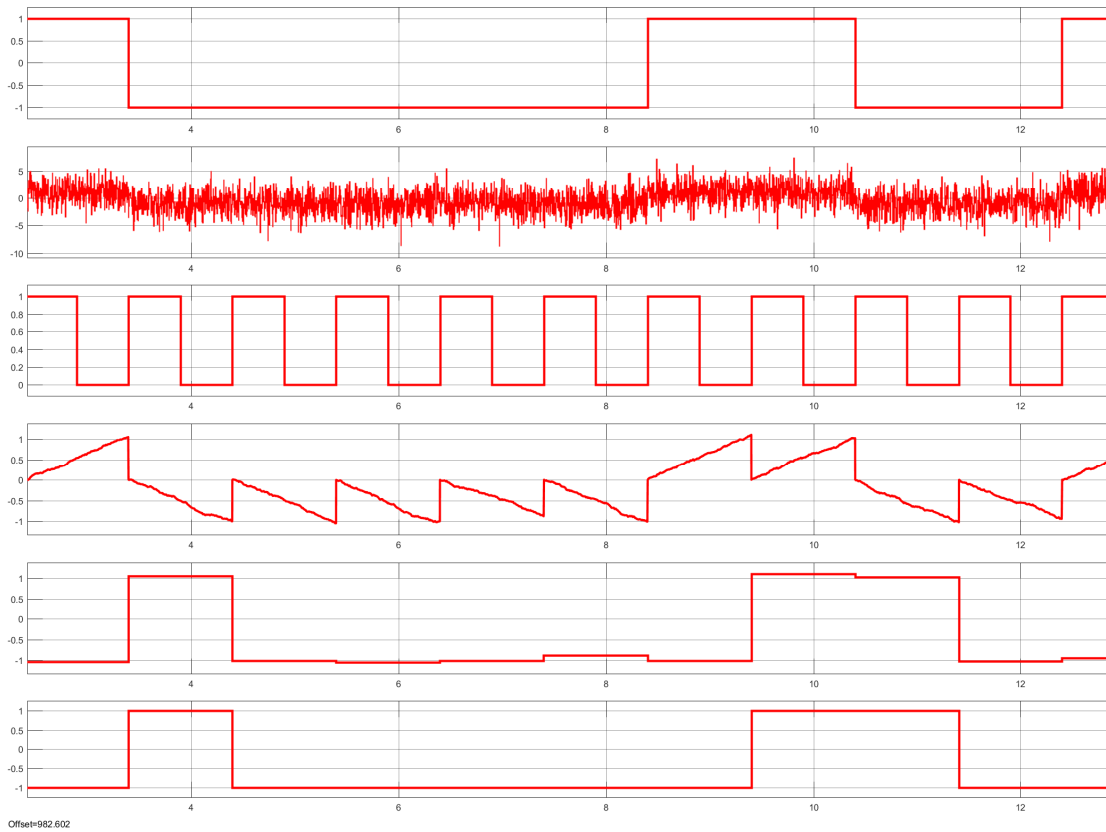


Obr. 1.9: Model korelačního přijímače v programu Matlab Simulink.

1.5.4 Stanovení pravděpodobnosti chybného příjmu

Využitím Statistic Toolbox programu Matlab byly stanoveny teoretické hodnoty chybovosti, kde $A_0 = -0,5$ V, $A_1 = +0,5$ V a efektivní hodnota šumu nabývá hodnot 0,2 – 2,2 V [8], [15]. Hodnoty pravděpodobnosti chybného příjmu při přenosu binárního signálu kanálem, který je zarušený AWGN, jsou vyneseny v tabulce 1.1.

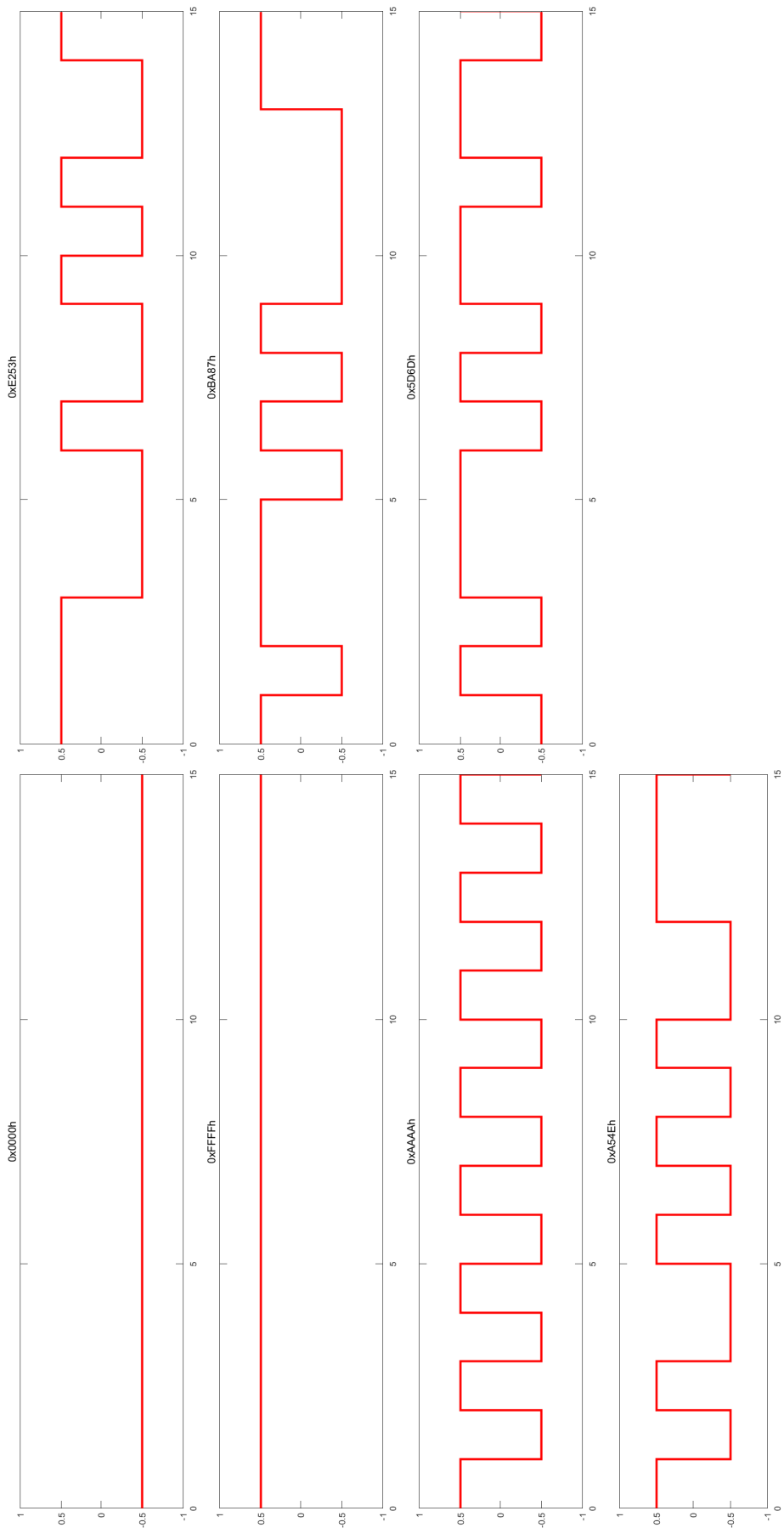
Na snímku 1.11 jsou vyobrazeny průběhy binárních posloupností, které bude laboratorní přípravek vysílat.



Obr. 1.10: Oscilogram modelu korelačního přijímače v programu Simulink.

Tab. 1.1: Pravděpodobnost chybně přijatého bitu pro zadaný rozsah efektivní hodnoty šumu.

$U_{ef}[V]$	$P_e[-]$
0,2	0,0062
0,4	0,1056
0,6	0,2023
0,8	0,2659
1	0,3085
1,2	0,3385
1,4	0,3605
1,8	0,3906
1,8	0,4013
2,2	0,4101



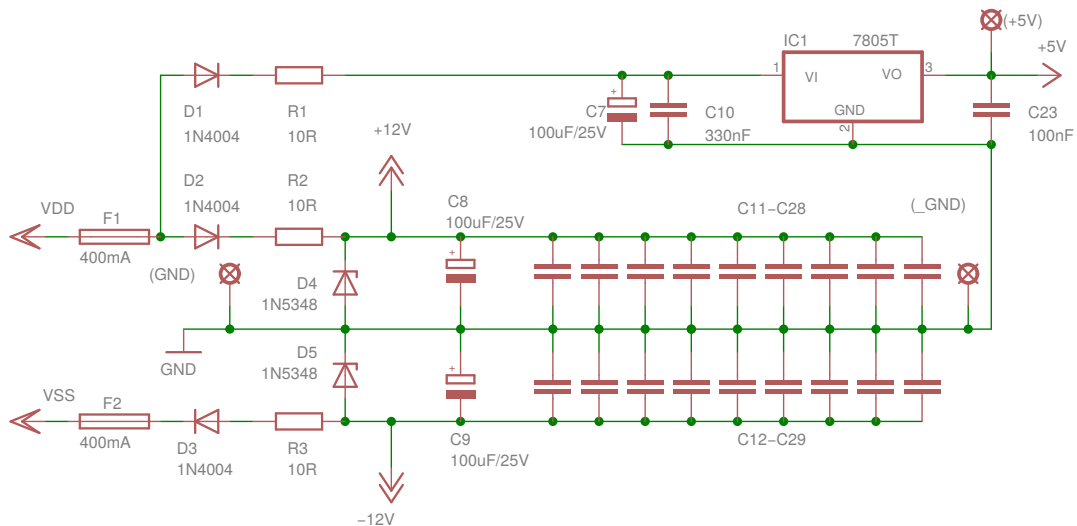
Obr. 1.11: Posloupnosti: 0x0000h, 0xFFFFh, 0xAAAAh, 0xA54Eh, 0xE253h, 0xBA87h a 0x5D6Dh

2 ŘEŠENÍ A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

2.1 Návrh obvodového zapojení

2.1.1 Napájení aplikace

Zadání této práce stanovuje symetrické napájecí napětí ± 12 V, které bude v rámci této laboratorní úlohy zajišťovat stabilizovaný zdroj Z12.1A výrobce ZPA. Tento zdroj poskytuje napětí v požadovaném rozsahu s maximálním proudovým zatížením 1 A na každé napájecí větvi. Napájení celé aplikace je rozděleno do tří hlavních větví: +12 V, -12 V a +5 V. Všechny tři napájecí větve jsou vztaženy k společné zemní větvi. Vzhledem k charakteru tohoto přípravku je nutné zajistit ochranu napájecích větví před nežádoucím vstupním napětím (přepólování, nadpětí). Nadproudová ochrana je zajištěna dvojicí tavných pojistek F_1 a F_2 , jedná se o rychlé tavné pojistky s nominální hodnotou přetavení při 250 mA. Ochrana před přepólováním je realizována pomocí univerzálních D_1 , D_2 , D_3 . Další fází ochrany je kombinace výkonových rezistorů R_1 , R_2 , R_3 a Zenerových diod D_4 a D_5 s hodnotou Zenerova napětí 11 V. Vstupní filtrace jednotlivých větví je zajištěna elektrolytickými kondenzátory C_7 (+5V větev), C_8 (+12V větev) a C_9 (-12 V větev). Tyto kondenzátory mají shodnou kapacitu – 100 μ F. Keramické kondenzátory $C_{11} - C_{28}$ a $C_{12} - C_{29}$ slouží jako lokální blokovací kondenzátory pro integrované obvody umístěné na napájecích větvích +12 V a -12 V [5].



Obr. 2.1: Schéma napájecího zdroje laboratorního přípravku s ochranami.

Na výstupu tohoto napájecího bloku je stabilní napětí ± 12 V s ochranou proti přepólování, nadpětí a nevratnou proudovou ochranou.

Mikroprocesor ATmega 16A je provozován při napájecím napětí maximálně 5,5 V. Stabilní výstupní napájení tak zajišťuje lineární stabilizátor LM7805 v doporučeném zapojení 2.1, ten je doplněn keramickými kondenzátory $C_{10} = 330$ nF na vstupu a $C_{23} = 100$ nF na výstupu stabilizátoru, které zajišťují filtraci vstupního a výstupního napětí a ochranu před rozkmitáním [24]. +5V větev je dále také využívána pro napájení LED a LCD.

2.1.2 Mikroprocesor a periferie

Pro realizaci tohoto přípravku byl zvolen mikroprocesor z rodiny megaAVR firmy Atmel, konkrétně model ATmega 16A PU. Mikroprocesor byl zvolen z důvodu značného rozšíření v rámci přípravků laboratorní výuky, a tedy i snadné nahraditelnosti v případě poruchy.

Tento procesor je založen na 8bitové architektuře harvardského typu, využívá instrukční sadu Advanced RISC. Mikroprocesor je vybaven 16kilobajtovou flash pamětí pro program, 512bajtovou pamětí EEPROM a 1kilobajtovou vnitřní pamětí SRAM. Mikroprocesor ATmega 16A má také poměrně široké spektrum periferií, pro účely konstrukce tohoto zařízení to jsou konkrétně:

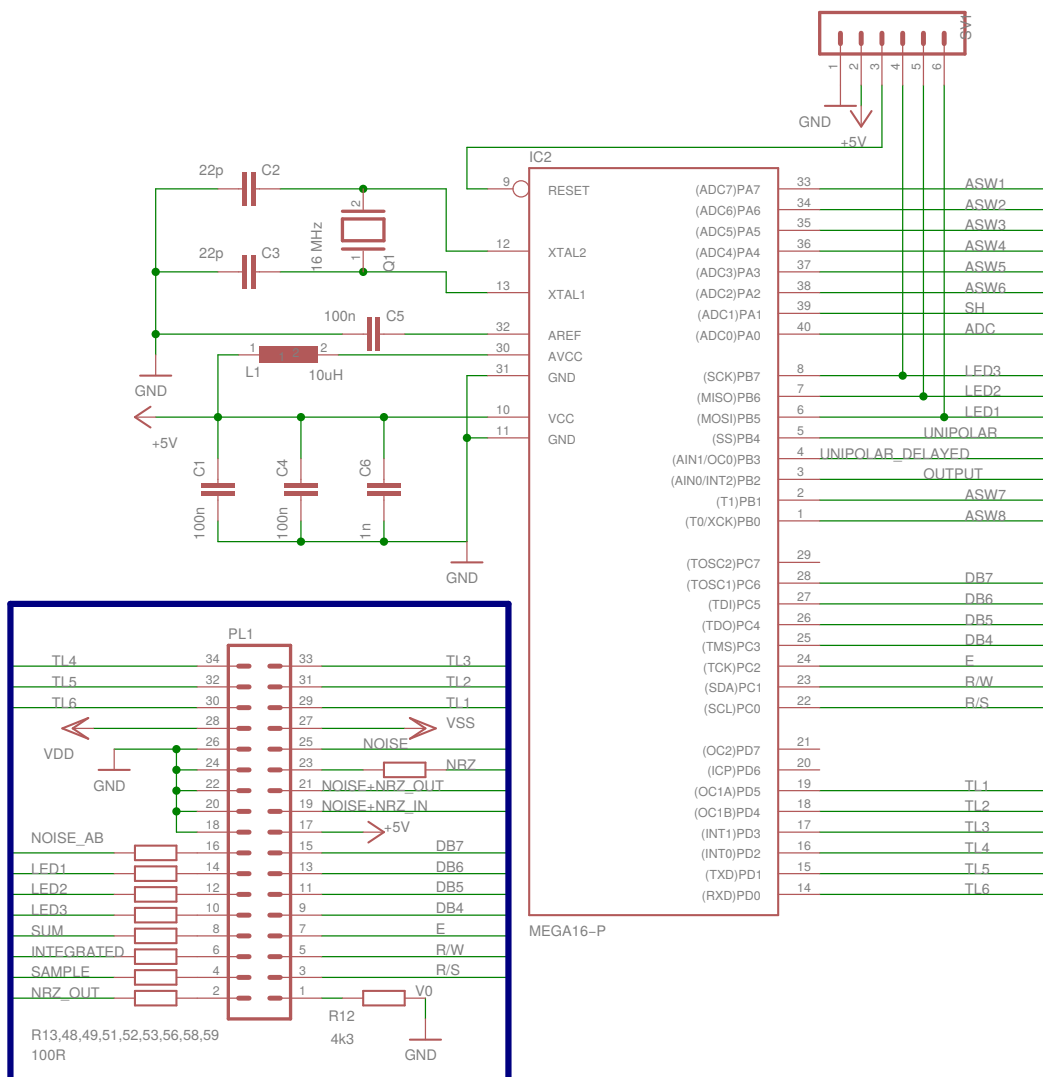
- dva 8bitové časovače s vlastními předděličkami,
- jeden 16bitový časovač,
- počítadlo reálného času,
- 8 ADC kanálů s 10bitovým rozlišením,
- integrovaný analogový komparátor,
- interní a externí možnost vyvolání přerušení.

Maximální pracovní frekvence je omezena na 16 MHz [3], pro konstrukci tohoto přípravku byl zvolen mikroprocesor v pouzdře PDIP40.

Zapojení mikroprocesoru je v rámci návrhu 2.2 doplněno o součástky zajišťující stabilní provozní podmínky.

Kondenzátory C_1 , C_4 a C_6 zajišťují stabilizování a filtraci zámků na hlavní napájecí větvi. Rozdílné hodnoty kapacit jsou voleny s ohledem na filtrovaný kmitočet, kondenzátory s nižší hodnotou kapacity jsou umístěny blíže ke kontaktům mikroprocesoru [11]. Kondenzátor C_5 zastupuje roli externího kondenzátoru stabilizace napětové reference. Cívka L_1 slouží jako filtrační člen napájení A/D převodníku.

Ke správnému rozběhu krystalového oscilátoru jsou v blízkosti jeho kontaktů připojeny kondenzátory C_2 a C_3 , hodnota kapacity je zvolena dle doporučení výrobce mikroprocesoru [3].



Obr. 2.2: Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega 16A a základních periférií.

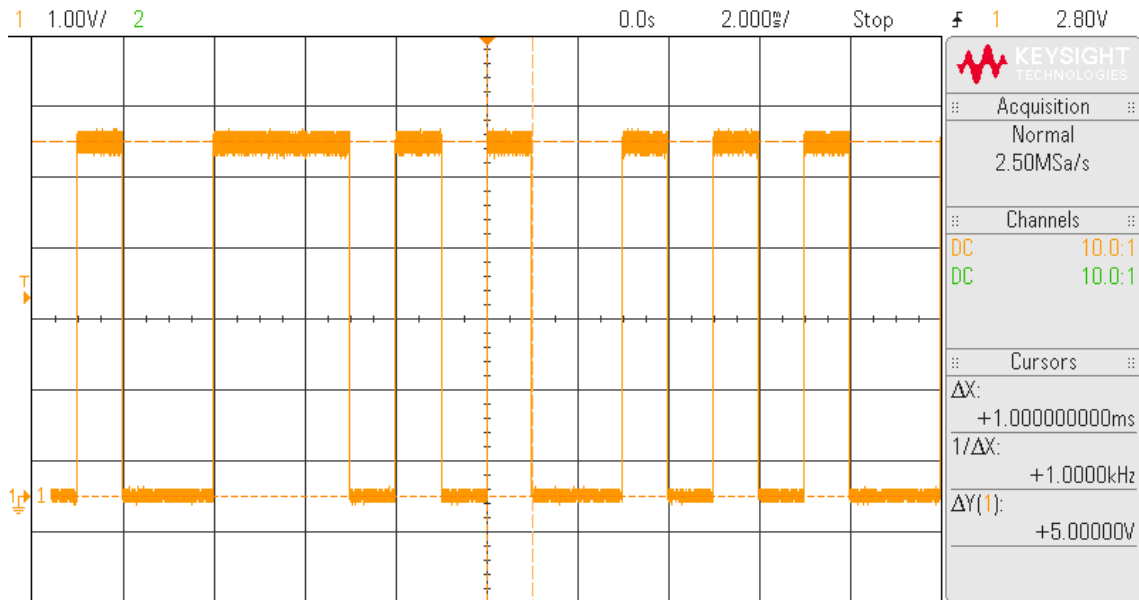
V rámci tohoto návrhu je mikroprocesor programován pomocí ISP konektoru, který je připojen na piny: VCC, GND, RESET, SCK, MISO a MOSI. K programování mikroprocesoru je využito univerzálního programátoru ASIX Presto [2].

Mikroprocesor v rámci tohoto laboratorního přípravku zajišťuje:

- výběr ze zadaných posloupností pomocí tlačítka,
- změnu rychlosti vysílání pomocí tlačítka,
- změnu doby přenosu pomocí tlačítka,
- výběr počtu opakování pomocí tlačítka,
- generování vybrané posloupnosti unipolárním signálem na výstupním pinu,
- vyhodnocování hodnoty přijatých bitů pomocí A/D převodníku,
- výpis chybně přijatých bitů na displej,
- výpis doby přenosu na displej.

2.1.3 Generování binární posloupnosti

Pomocí tlačítka „výběr posloupnosti“ je možné vybrat z následujících binárních posloupností: 0000h, FFFFh, AAAAh, A54Eh, A253h, BA87h, 5D6Dh a pseudonáhodné binární posloupnosti. Aktuální hodnota (log.1 nebo log.0) je nastavována na výstupním pinu 4 PORTu B (signál UNIPOLAR). Na oscilogramu 2.3 je zachycena unipolární binární posloupnost A54Eh s dvěma napěťovými stavy: 0 V a +5 V.



Obr. 2.3: Oscilogram mikroprocesorem generované unipolární posloupnosti A54Eh.

2.1.4 Úprava úrovní generované posloupnosti unipolárního NRZ signálu na bipolární NRZ signál

Unipolární signál generovaný mikroprocesorem je nutné vhodně převést na signál bipolární s rozkmitem $\pm 0,5$ V. Tento převod zajišťuje obvod 2.4, [19]. Jedná se o zapojení OZ v konfiguraci rozdílového zesilovače, kde jsou využity rezistory R_{16} , R_{18} , R_{21} , R_{22} a R_{28} .

Vstupní napětí nabývá dvou stavů: 0 V a +5 V, na výstupu je však požadováno napětí s rozkmitem $-0,5$ V až $+0,5$ V. Z poměru výstupního a vstupního napětí je možné stanovit zisk obvodu:

$$A_U = \frac{U_{\text{UNIPOLAR}}}{U_{\text{NRZ}}} \quad [-] \quad (2.1)$$

Rozkmit signálu původního je 5 V, rozkmit bipolárního NRZ signálu pak 1 V, po dosazení:

$$A_U = \frac{1 \text{ V}}{5 \text{ V}} = 0,2 \quad [-] \quad (2.2)$$

Tento obvod může být analyzován na základě jeho přenosové funkce:

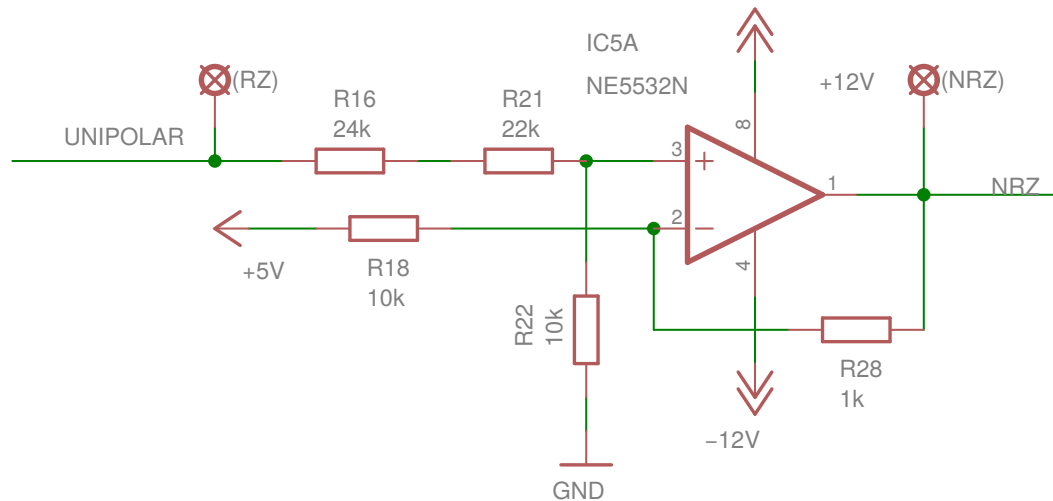
$$U_{\text{NRZ}} = U_{\text{UNIPOLAR}} \cdot A_U + U_{\text{offset}} \quad [\text{V}] \quad (2.3)$$

Výstupní signál je však nutno stejnosměrně posunout o $-0,5 \text{ V}$. Po dosazení:

$$U_{\text{NRZ}} = U_{\text{UNIPOLAR}} \cdot -0,5 \quad [\text{V}] \quad (2.4)$$

Po dosazení poměrů rezistorů do vztahu 2.4:

$$U_{\text{NRZ}} = 0,2 \cdot \frac{R_{22}}{(R_{16} + R_{21}) + R_{22}} \cdot \left(1 + \frac{R_{28}}{R_{18}}\right) - (U_{\text{ref}} \cdot \frac{R_{28}}{R_{18}}) \quad [\text{V}] \quad (2.5)$$



Obr. 2.4: Obvodové zapojení realizující převod unipolárního signálu na signál bipolární.

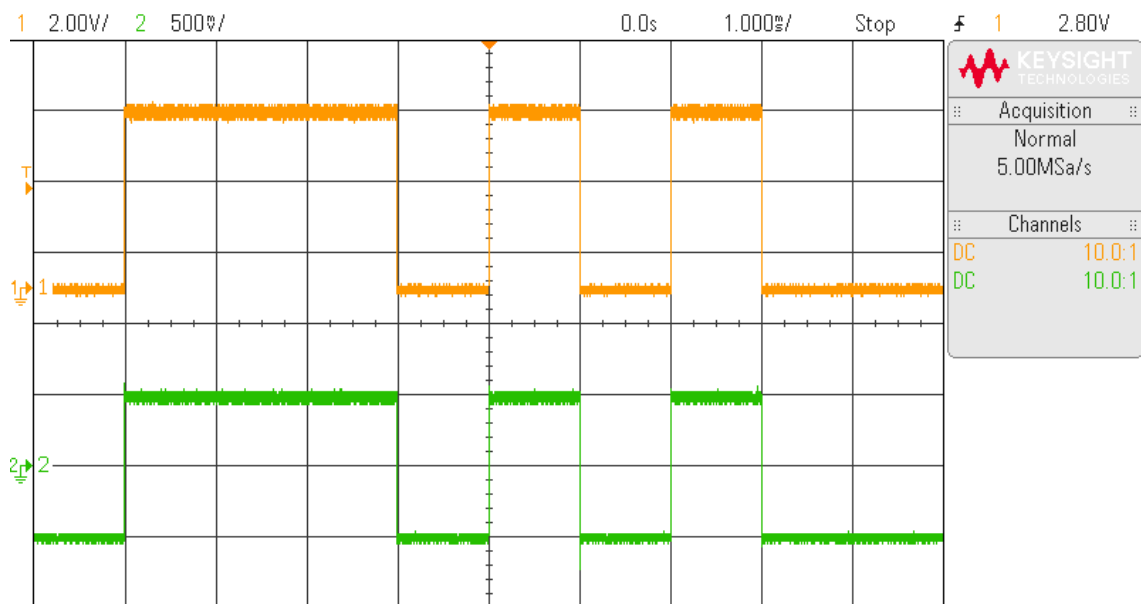
Stejnoseměrně má být signál posunut o $-0,5 \text{ V}$ ($V_{\text{ref}} = +5 \text{ V}$). Poměr rezistorů R_{28} a R_{18} je roven hodnotě 0,1. Hodnoty rezistorů tedy zvolíme ve stanoveném poměru a to $R_{28} = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_{18} = 10 \text{ k}\Omega$. Stanovíme hodnotu rezistoru R_{22} , v tomto případě $10 \text{ k}\Omega$. Upravením části vztahu 2.5 a dosazením poměru R_{28} a R_{18} je stanoven poměr hodnot rezistorů R_{16} a R_{21} :

$$\frac{R_{22}}{(R_{16} + R_{21}) + R_{22}} \cdot \left(1 + \frac{R_{28}}{R_{18}}\right) = 0,2 \quad (2.6)$$

Po úpravě:

$$R_{16} + R_{21} = 44000 \quad \Omega \quad (2.7)$$

Hodnoty rezistorů R_{16} a R_{21} jsou shodné – 22 k Ω . Praktickým měřením navrženého obvodu bylo zjištěno, že je signál mírně stejnosměrně posunut. Tato odchylka vznikla pravděpodobně v zaokrouhlení hodnoty napětí výstupu lineárního stabilizátoru na +5 V, ve skutečnosti je však na jeho výstupu naměřeno +5,07 V. Dodatečnou úpravou byla tedy hodnota rezistoru R_{16} zvýšena na 24 k Ω . Oscilogram 2.5 zobrazuje napěťový průběh na vstupu a výstupu tohoto obvodu, změna rozkmitu je patrná z rozdílného vertikálního měřítka.



Obr. 2.5: Oscilogram unipolární binární posloupnosti generované mikroprocesorem (oranžově) a oscilogram signálu typu NRZ se sníženým rozkmitem (zeleně).

2.1.5 Filtrace AWGN - aktivní dolní propust

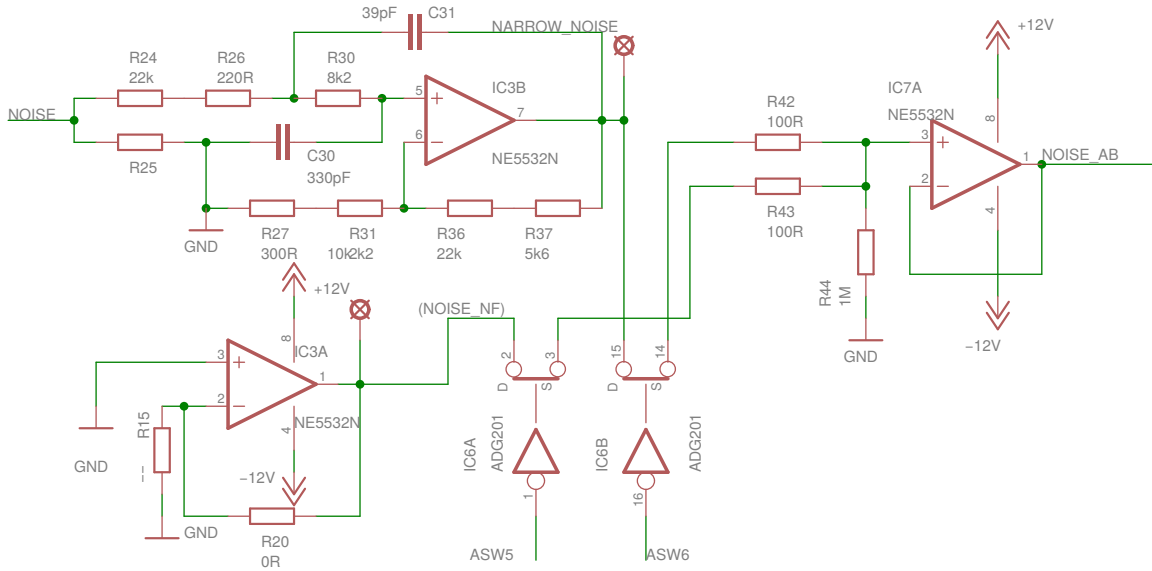
Signálový generátor Agilent 33220A, který je součástí výbavy výukové laboratoře, bude v rámci měření sloužit jako zdroj AWGN. Tento signálový generátor je schopen generovat šum s rozkmitem 0 – 2,2 V_{RMS} a šířce pásma 10 MHz [16]. V rámci návrhu je však poměrně těžké pracovat s takto vysokými frekvencemi – zvýšené nároky na kvalitu DPS, parazitní vlastnosti součástek, velmi drahé a konstrukčně náročné OZ. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke kmitočtovému omezení dolní propustí. Pro tento účel bylo převzato a upraveno již navržené zapojení aktivní dolní propusti druhého řádu se zesílením v propustném pásmu 2.6, [5]. Zisk propustného pásma je určen vztahem 2.10:

$$A_U = 1 + \frac{R_{36} + R_{37}}{R_{27} + R_{31}} \quad [-] \quad (2.8)$$

Po dosazení:

$$A_U = 1 + \frac{22000\Omega + 5600\Omega}{300\Omega + 2200\Omega} [-] \quad (2.9)$$

$$A_U \approx 12,04 [-] \quad (2.10)$$



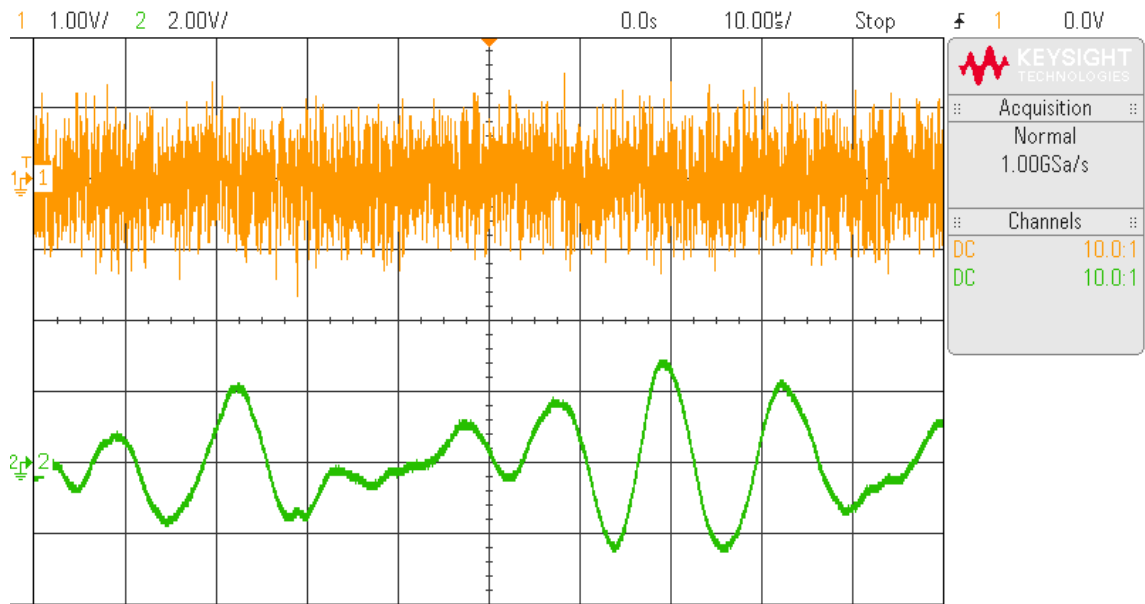
Obr. 2.6: Obvod realizující dolní propust přiváděného AWGN se zesílením v propustném pásmu.

V rámci druhého OZ daného pouzdra 2.6 byl realizován pokusný obvod pro odladování. Tyto šumové signálové cesty je možno programově spínat pomocí řídicích signálů analogových přepínačů (ASW5 a ASW6). Toto odladovací zapojení je ve finální verzi deaktivováno tak, aby nedefinované napětové úrovně vstupů nezpůsobovaly napětový posun či saturaci výstupu.

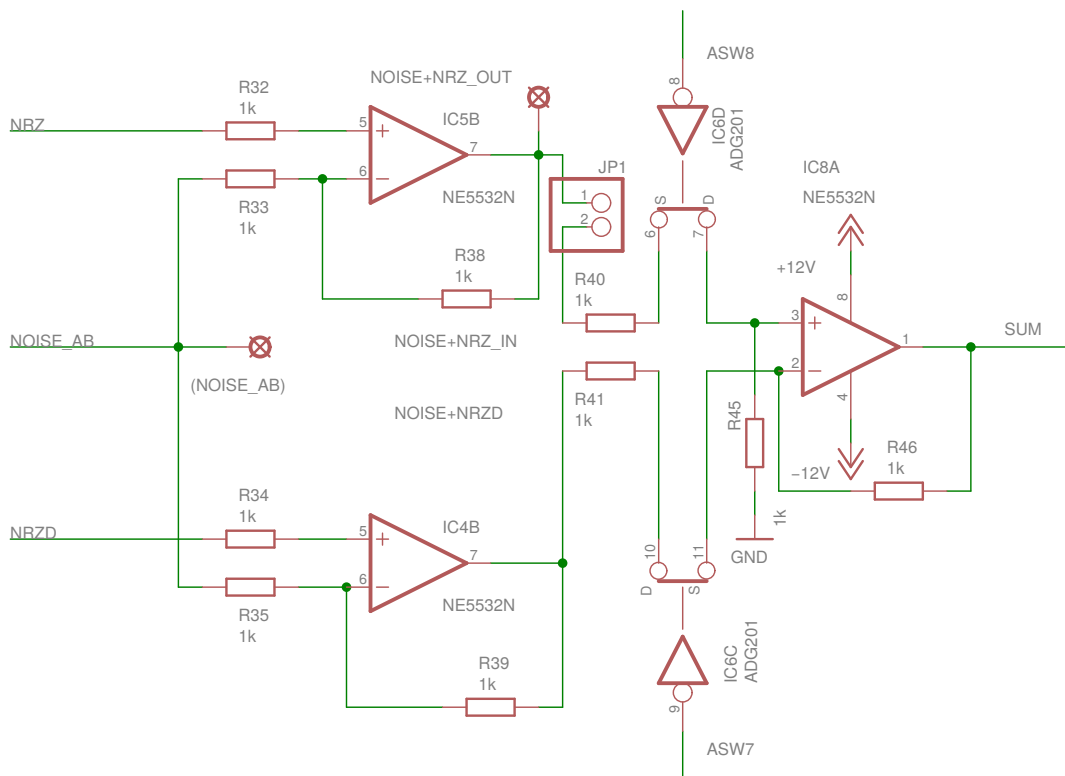
Z oscilogramu 2.7 kanálu 2 (zeleně) je patrné výrazné snížení zastoupení vyšších kmitočtů vůči signálovému generátoru (oranžově).

2.1.6 Lineární součet bipolární posloupnosti s AWGN

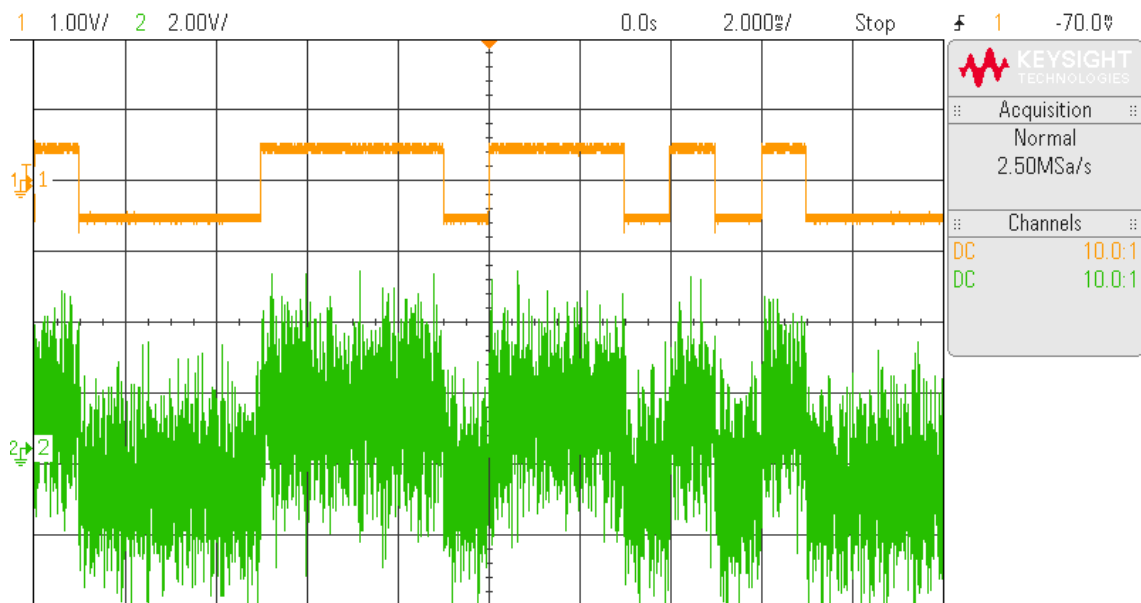
Lineární součet bipolární datového signálu s vyfiltrovaným šumem provádí obvod na schématu 2.8. Bylo opět vybráno zapojení rozdílového zesilovače s OZ [26]. Vzhledem k stochastickému charakteru šumu je tedy irelevantní fakt, že tento šum je invertován. Vhodným výběrem hodnoty rezistorů $R_9 = R_{10} = R_{11} = 1 \text{ k}\Omega$, zde již nedochází k úpravě napětových úrovní. Přenos tohoto obvodového zapojení je tedy jednotkový.



Obr. 2.7: Oscilogram vstupního AWGN šumu (oranžově) a šumu filtrovaného dolní propustí (zeleně)



Obr. 2.8: Zapojení OZ realizující součet bipolárního signálu s vyfiltrovaným šumem a zapojení realizující rozdíl dvou signálů zpožděných vůči sobě o jednu bitovou periodu.



Obr. 2.9: Oscilogram na vstupu (oranžově) a na výstupu (zeleně) zapojení 2.8 realizujícího součet binárního signálu (posloupnost 0xBA87) s vyfiltrovaným šumem efektivní hodnoty $1 V_{\text{RMS}}$.

2.1.7 Volba signálové cesty – integrátor

Cílem tohoto laboratorního přípravku je demonstrovat možnosti metod, které snižují pravděpodobnost chybného příjmu. V rámci realizace je tedy nutné vyřešit přepínání mezi jednotlivými signálovými cestami:

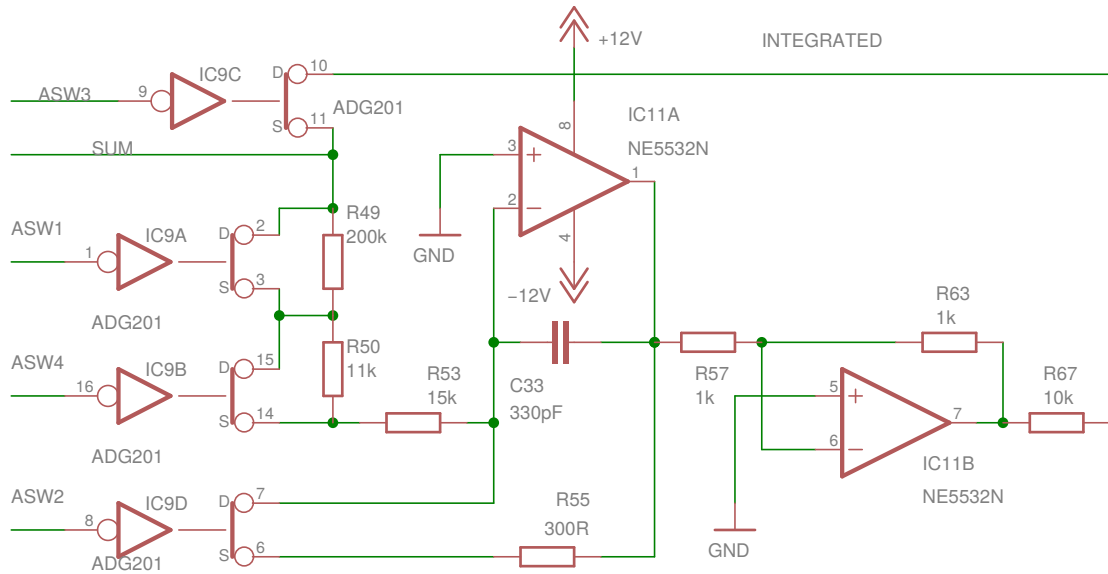
- přenos přímou signálovou cestou,
- signálová cesta využívající přizpůsobený přijímač,
- signálová cesta využívající vybíjený integrátor.

K tomuto účelu slouží blok 2.10, který je tvořen analogovým přepínačem ADG201 AKNZ a operačním zesilovačem NE5532 [26] v zapojení integrátoru. Návrh tohoto bloku byl s drobnými úpravami převzat [5].

Analogový přepínač v sobě integruje čtyři jednotlivé přepínače, které jsou ovládnány napětovou úrovní na svém řídicím vstupu. Přepínač je navržen tak, že je sepnut logickou úrovní 0 a rozepnut při logické úrovni 1 [1].

Přenos přímou signálovou cestou

V rámci tohoto přenosu není využita žádná z metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu, generovaná posloupnost je tedy lineárně sečtena s vyfiltrovaným šumem o efektivní hodnotě v rámci zadaných mezí ($U_{\text{ef}} = 0,2 - 2,2 V$). Při výběru přímé signálové cesty je sepnut analogový přepínač ASW3. Přepínače ASW1, ASW2, ASW4



Obr. 2.10: Zapojení integrátoru s analogovými přepínači.

a ASW7 jsou ve stavu log 1 – tedy rozepnuty. Díky nízkému odporu analogového přepínače v sepnutém stavu je NRZ bipolární signál se sečteným vyfiltrovaným šumem přenesen přímo na výstup OZ IC11B, v tomto případě tedy není signál nikterak integrován. Tento signál poté prochází dalšími bloky bez úpravy napěťových úrovní a je přiveden na vstup A/D převodníku (PORT A, pin 0).

2.1.8 Metody snižující pravděpodobnost chybného příjmu využívající integrátor

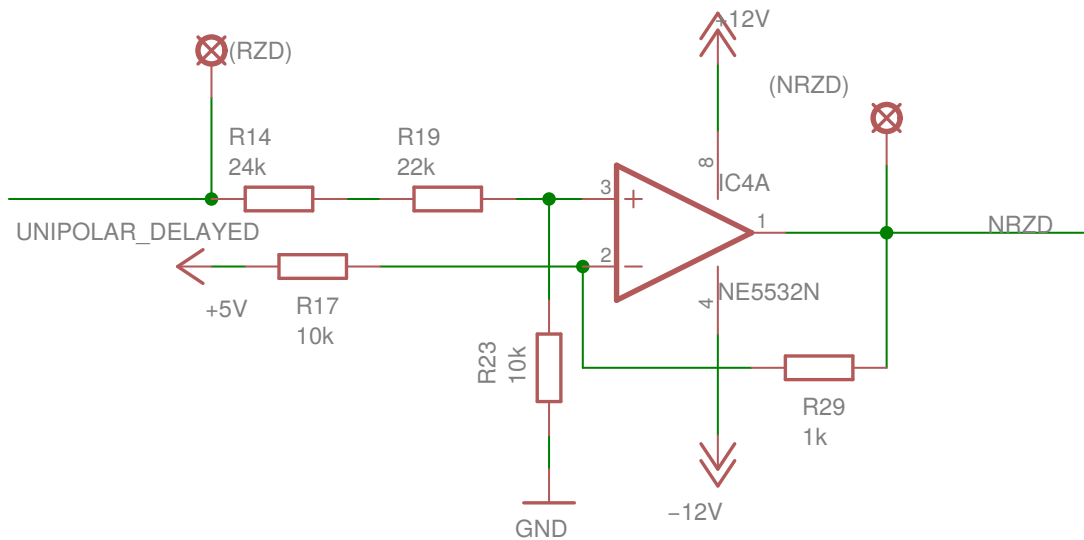
Integrátor využívá invertujícího vstupu (fázový posun o 180 stupňů) pro integrovaný signál, vstup neinvertující je uzemněn. Integrovaný signál SUM je přiveden na síť přepínaných rezistorů, které tvoří společně s kondenzátorem C_{33} integrační RC článek. Ovládním řídicích vstupů analogového přepínače ASW1 a ASW4 je možné dva z těchto rezistorů přemostit a vlivem nízkého odporu v sepnutém stavu analogového přepínače je tak možné měnit dobu integrace. Hodnoty obvodových součástek ovlivňujících dobu integrace jsou vhodně zvoleny tak, aby bod zlomu integrace nastal na hraně saturace integrátoru. Pro přenos rychlostí 1 kbit/s jsou oba řídicí vstupy ASW1 a ASW4 ve stavu log.1, integrační doba je tak určena sériovou kombinací $R_{49} + R_{50} + R_{53}$ a hodnotou kondenzátoru C_{33} . Při zvýšení přenosové rychlosti na hodnotu 8 kbit/s je rezistor R_{49} přemostěn přepínačem IC9A nastavením logické úrovně 0 na řídicí vstup ASW1, stav řídicího vstupu ASW4 zůstává beze změny. Inte-

grační doba je tak určena sériovou kombinací $R_{50}+R_{53}$ a kapacitou kondenzátoru C_{33} . Při maximální rychlosti (12 kbit/s) je nastavena logická úroveň 1 i na přepínač IC9B a dochází tak k přemostění rezistoru R_{50} , integrační doba je určena kombinací R_{53} a C_{33} .

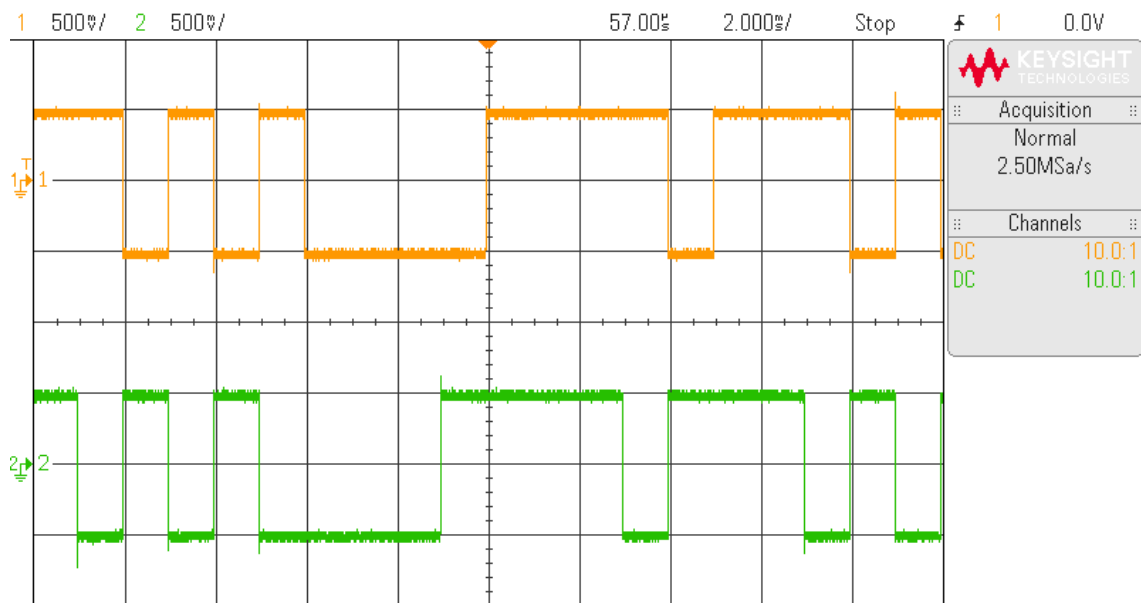
Operační zesilovač IC11B plní funkci invertujícího zesilovače s jednotkovým ziskem (dáno poměrem R_{57} a R_{63}). Tento invertující zesilovač tak uvádí signál opět do původní fáze – v předchozím bloku byl použitím invertujícího zapojení integračtoru fázově posunut o 180 stupňů. Celkový posun signálu, který je zpracován tímto integračním blokem (IC11A a IC11B), je posunut o celou symbolovou periodu vůči signálu generovanému.

Přijímač s přizpůsobeným filtrem

Tento typ přijímače ke své funkci využívá součtu generované posloupnosti a generované posloupnosti zpožděné o jednu symbolovou periodu. Zpoždění o jednu symbolovou periodu je realizováno pomocí identických obvodových zapojení tak, jak je uvedeno v kapitole 2.1.4 a 2.1.6. Obvodové zapojení odpovídá schématu 2.11, kde signál UNIPOLAR DELAYED (RZD) je posloupnost generovaná mikroprocesorem zpožděná o jednu symbolovou periodu (tato možnost vyplývá ze znalosti zadaných posloupností). Situace je zachycena na průběhu 2.12.



Obr. 2.11: Převod unipolárního signálu zpožděného o jednu signálovou periodu na signál bipolární.



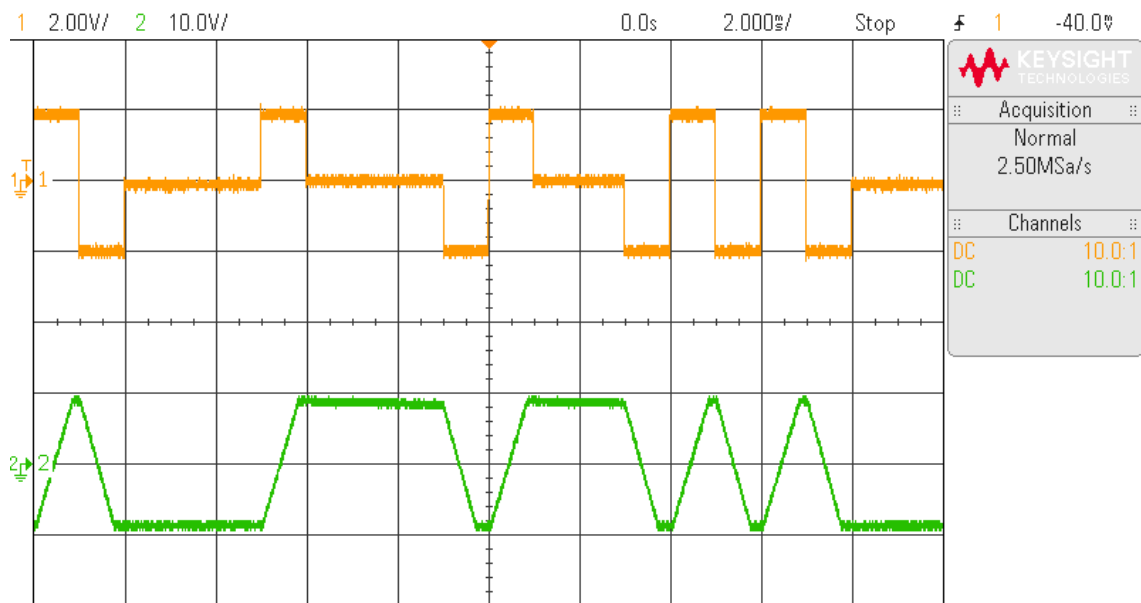
Obr. 2.12: Oscilogram výstupů zapojení 2.8 realizujících zpoždění dvou signálů vůči sobě o jednu symbolovou periodu pro posloupnost 0xBA87h.

Oscilogram 2.9 zachycuje binární NRZ signál (oranžově), který je následně lineárně sečten s šumem efektivní hodnoty 1 V_{RMS} . Na zachyceném průběhu 2.13 je patrný součet NRZ signálu a NRZD signálu (zeleně). Při přenosu takto sečtených signálů mohou nastat tyto tři stavy:

- V případě, že nastává přechod stavu, na výstupu přizpůsobeného filtru detekujeme dvojnásobnou amplitudu výstupního napětí. Při přechodu ze stavu $-0,5 \text{ V}$ do stavu $+0,5 \text{ V}$ bude amplituda nabývat kladné hodnoty.
- Při přechodu ze stavu $+0,5 \text{ V}$ do stavu $-0,5 \text{ V}$ bude amplituda naopak nabývat dvojnásobné záporné hodnoty.
- Pokud bude právě generovaný bit stejný jako bit předchozí, napětí na výstupu bude mít nulovou hodnotu amplitudy.

Výše popsané stavy jsou zachyceny na oscilogramu 2.13.

Takto sečtený signál SUM je přiveden na vstup integrátoru, kde je dále zpracován. Integrační dobu je možné měnit ve třech krocích tak, jak je uvedeno v 2.1.8. Řídící vstupy ASW2 (vybíjení integrátoru) a ASW3 (volba přímé cesty) jsou nastaveny do stavu log. 1, řídicí vstup ASW7 je pak nastaven do úrovně log. 0 (zapnutí zpožďovacího článku). Zelený průběh oscilogramu 2.13 odpovídá výstupu tohoto integračního bloku při volbě přizpůsobeného filtru.



Obr. 2.13: Oscilogram součtu signálů NRZ a NRZD (oranžově) posloupnosti 0xBA87 (oscilogram 2.12) a výstup (zeleně) přizpůsobeného filtru po provedení integrace vstupního signálu.

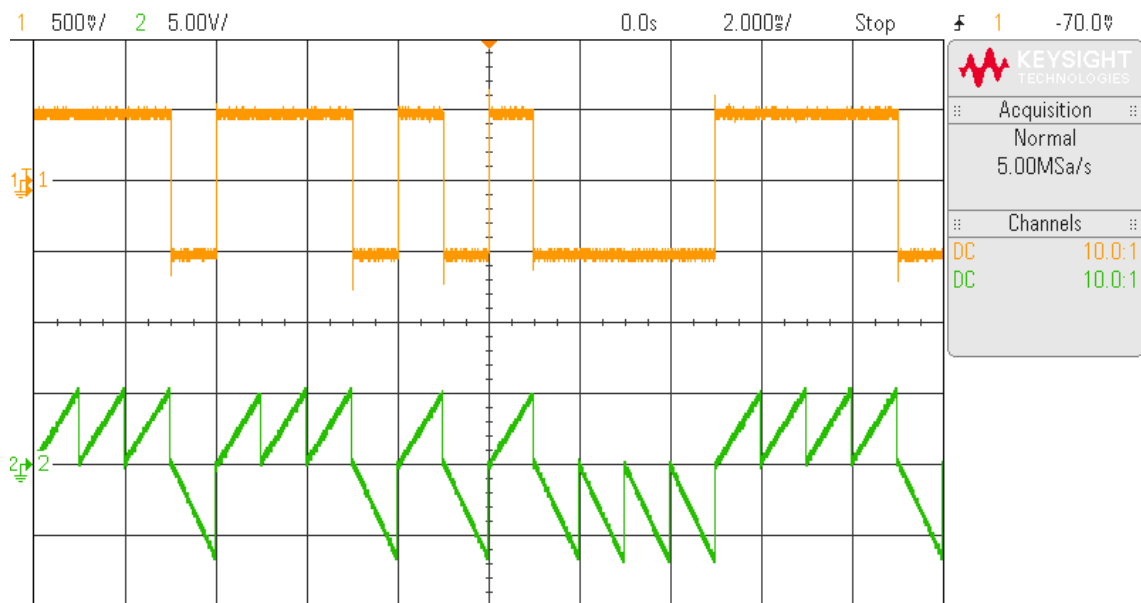
Přijímač s vybíjeným integrátorem

Při volbě signálové cesty využívající vybíjený integrátor je na řídicí vstup ASW3 nastavena úroveň log. 1, tímto krokem je zajištěno, že zpracovávaný signál bude přiveden na vstup integrátoru, nikoliv na jeho výstup. Na řídicí vstup ASW7 je nastavena logická úroveň 0 (odpojení výstupu zpoždovacího článku). Přijímač s vybíjeným integrátorem využívá stejný princip volby doby integrace, tak, jak je uvedeno v 2.1.8. Metoda vybíjeného integrátoru je založena na periodickém vybíjení integrátoru přes ochranný rezistor R_{55} . Toto vybíjení je realizováno analogovým přepínačem, kdy na konci každé symbolové periody je na řídicí vstup ASW2 nastavena po dobu 5 μ s logická úroveň 0 – dochází k vybití integrátoru, viz 2.14.

2.1.9 Vzorkování - obvod Sample and Hold

Signál INTEGRATED z výstupu integračního bloku je přiveden na vstupní pin obvodu LF398N. Jedná se o obvod typu Sample and Hold, který je ovládán vstupním pinem SH.

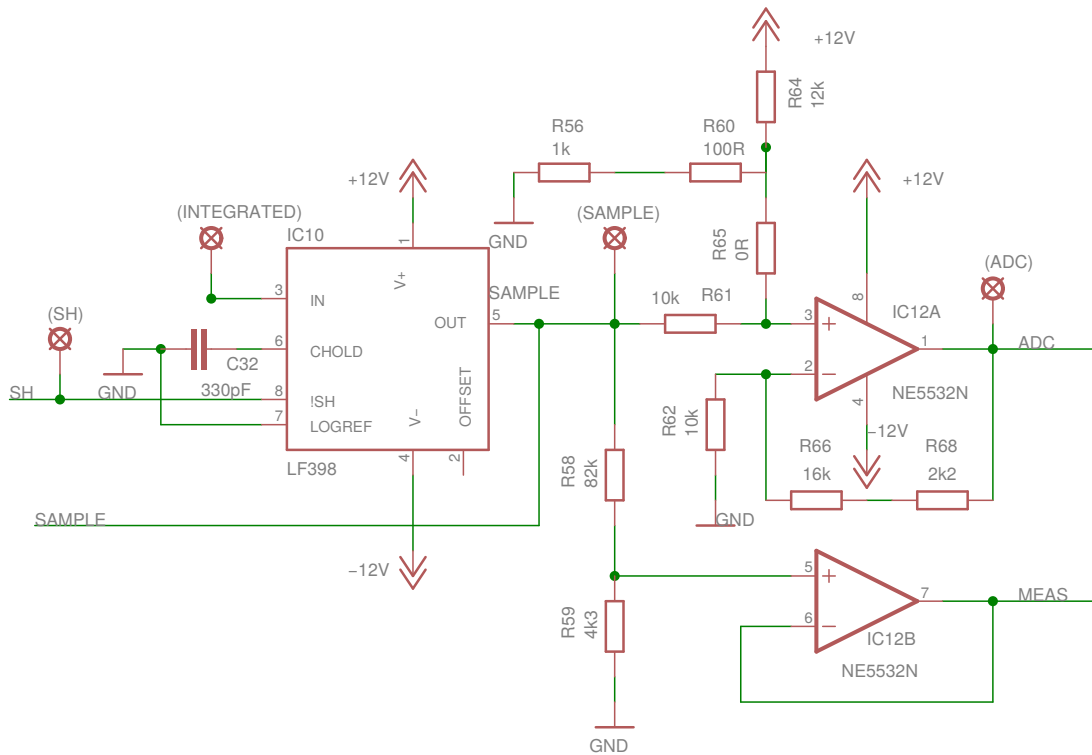
Při nastavení logické úrovně pinu SH do stavu logické úrovně 1 je obvod přepnut do stavu vzorkování (Sample), dochází k nabití externě připojeného kondenzátoru C_{32} na aktuální napětí vstupního pinu IN, viz oscilogram 2.16. Změnou stavu řídicího pinu SH na logickou úroveň 0 je obvod přepnut do stavu pamatování (Hold).



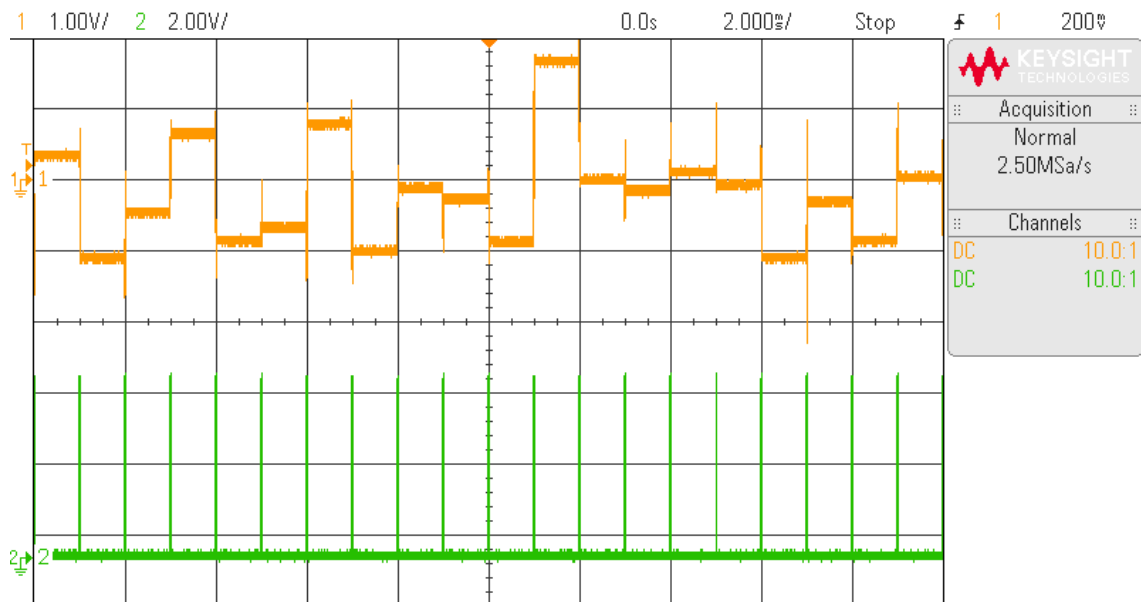
Obr. 2.14: Oscilogram vstupu (oranžově) a výstupu (zeleně) zapojení 2.10 při použití vybíjeného integrátoru.

Aktuální hodnota napětí je tedy udržována na výstupech kondenzátoru C_{32} . Volba kapacity kondenzátoru je závislá na poměru dob, kdy je kondenzátor ve stavu vzorkování a udržování napětí na výstupu [25]. Nižší kapacita umožňuje rychlejší nabití kondenzátoru na hodnotu vstupního napětí na pinu IN, příliš nízká kapacita však může způsobit, že kondenzátor nebude vlivem svodových proudů a dalších parazitních ztrát schopen uchovat vstupní napětí. Naopak kondenzátory s vyšší kapacitou se budou nabíjet po delší dobu, výhodou je však delší doba uchování hodnoty vstupního napětí [4]. Dobrým kompromisem ve volbě materiálu použitého kondenzátoru je keramika typu NPO (NP0,C0G) [11]. Výstupem tohoto obvodu je pak uchované vstupní napětí - signál **SAMPLE**.

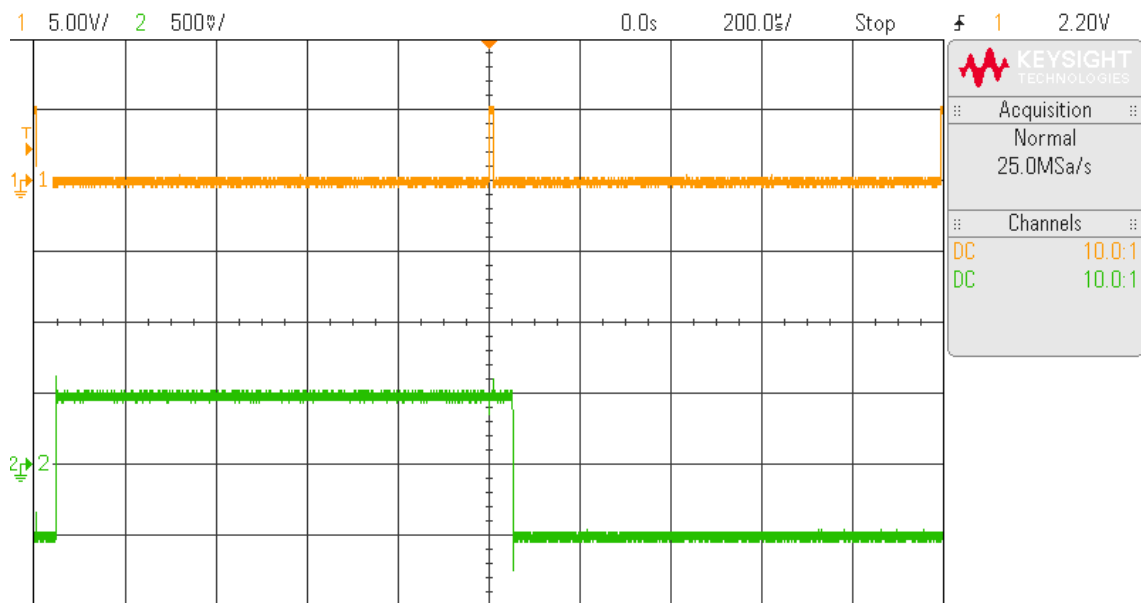
Vzhledem k sekvenci: vybití integrátoru (cca $5 \mu\text{s}$), spuštění signálu vzorkování (cca $10 \mu\text{s}$), spuštění A/D převodu (cca $15 \mu\text{s}$) a poměru těchto dob vůči periodě při vyšších přenosových rychlostech (8 kbit/s a 12 kbit/s), docházelo k příliš brzkému vybití integrátoru. Situaci zachycuje oscilogram 2.18. Výsledkem byla příliš nízká hodnota naintegrovaného napětí, napěťový průběh byl deformován a bit byl tedy vyhodnocen jako chybový. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k elektronickému odpojení šumu analogovým přepínačem a k deaktivaci A/D převodníku v případě volby vybíjeného integrátoru. S ohledem na demonstrativní charakter tohoto laboratorního přípravku je vhodnější zobrazit výstup integrátoru v nedeformované podobě. Při rychlosti 1 kbit/s fungoval integrátor správně, k navzorkování docházelo vždy až těsně před koncem periody, viz oscilogram 2.17.



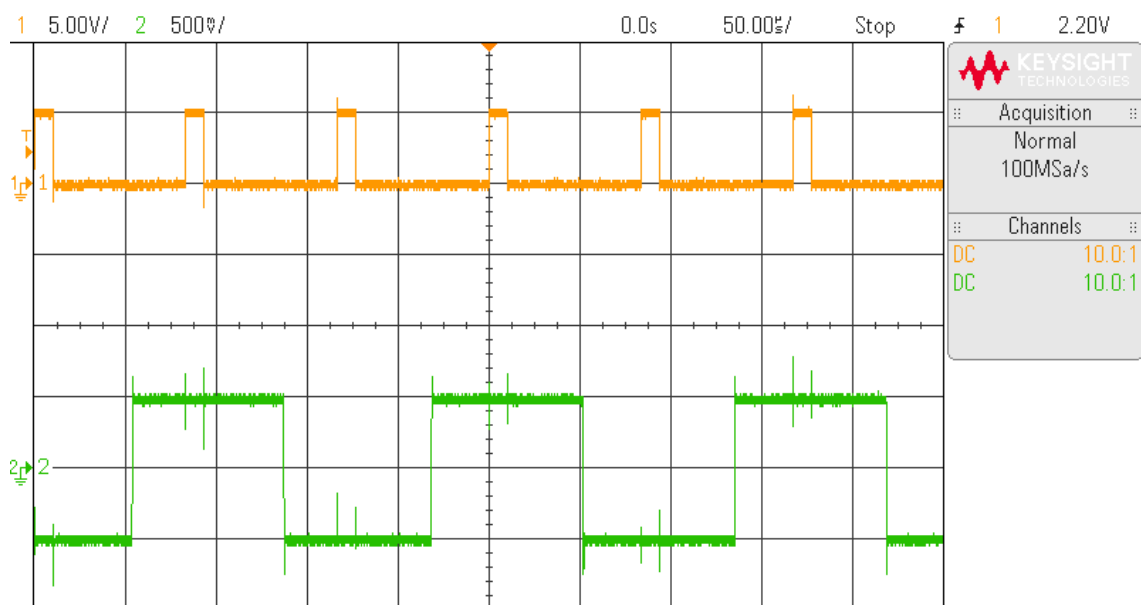
Obr. 2.15: Obvodové zapojení realizující vzorkování - Sample and Hold.



Obr. 2.16: Oscilogram řídicího signálu vzorkování SH (zeleně) a výstupního signálu SAMPLE s aktuálně udržovanou hodnotou napětí (oranžově) .



Obr. 2.17: Oscilogram řídicího signálu vzorkování SH (oranžově) a generované binární posloupnosti (zeleně) při rychlosti 1 kbit/s.



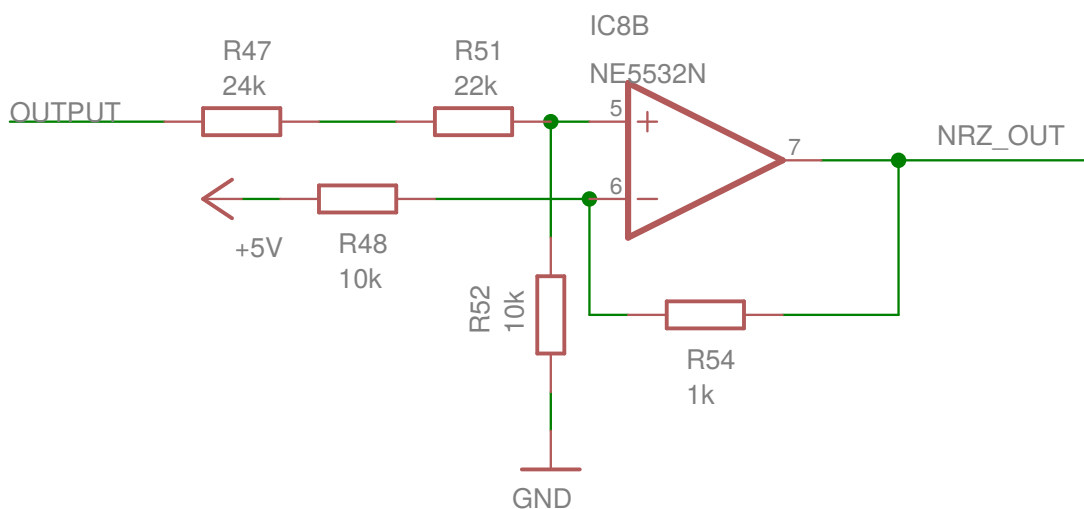
Obr. 2.18: Oscilogram řídicího signálu vzorkování SH (oranžově) a generované binární posloupnosti (zeleně) při rychlosti 12 kbit/s.

2.1.10 Úprava napěťových úrovní pro analogově-digitální převodník

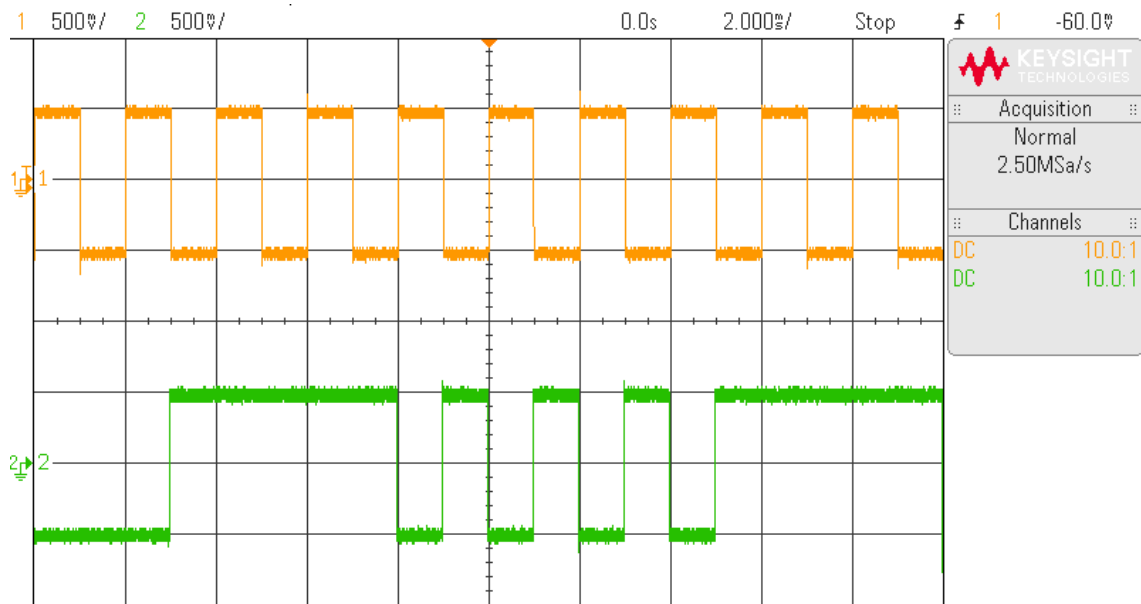
Výstupní signál **SAMPLE** obvodu Sample and Hold je přiveden na neinvertující vstup OZ IC12A 2.15. Toto zapojení převádí vstupní signál s maximálním rozkmitem rail-to-rail do rozsahu vstupního napětí na analogově-digitálním převodníku (0 až +5 V). Napěťový dělič R_{56} , R_{60} a R_{64} vytváří referenční hodnotu napětí + 0,88 V. V tomto případě se jedná o zapojení součtového zesilovače, které převádí bipolární NRZ signál s rozkmitem -10 V až + 10 V na unipolární NRZ signál s rozkmitem 0 až +5 V.

2.1.11 Úprava napěťové úrovně vyhodnoceného bitu

Vyhodnocení přijatého bitu je realizováno na základě aktuální hodnoty A/D převodníku a porovnáním s bitem, který byl vyslán vysílačem. Takto vyhodnocená úroveň (log.0 nebo log.1) je zpětně generována na pinu 2 PORTu B, kde je zpracovávána obvodem 2.19. Výstup tohoto obvodu je poté přiveden na měřicí svorku 6 přístrojového panelu. Na oscilogramu 2.20 je vyobrazeno srovnání mezi vyslanou posloupností (oranžově) a posloupností vyhodnocenou na straně přijímací (zeleně) při efektivní hodnotě šumu $1 V_{RMS}$.



Obr. 2.19: Obvodové zapojení simulující výstup rozhodovacího obvodu.



Obr. 2.20: Oscilogram vyslané NRZ posloupnosti (oranžově) a posloupnosti přijaté (zeleně).

2.2 Program laboratorního přípravku

Program laboratorního přípravku byl vytvořen v programovacím jazyku C, kód programu byl napsán ve vývojovém programu Atmel Studio 7.0, který poskytuje kompilátor a dobrou podporu při programování mikroprocesorů AVR. Jednou ze silných stránek mikroprocesorů AVR je použití časovačů a jejich vysoká přesnost[17]. V návrhu laboratorního přípravku tak byly využity všechny tři dostupné časovače mikroprocesoru [3].

2.2.1 Správa časovačů

TIMERO

Časovač TIMERO má v této aplikaci nastavenou předděličku hodinového taktu na hodnotu 8. Primární funkcí tohoto časovače je detekce stisku tlačítek. Při stisku mechanického tlačítka totiž dochází k sérii nežádoucích překmitů, které by mikroprocesorem byly vyhodnoceny jako série jednotlivých stisknutí. V praxi je možné této situaci předejít použitím pomocných obvodů (Schmittův klopný obvod, obvod s kondenzátorem) nebo metod programových (polling). Při prvotním testování přípravku byly překmity tlačítka ošetřeny externím připojením kondenzátoru. S ohledem na značnou nespolehlivost a zvyšování počtu součástek však bylo přistoupeno k ošetření zákmitů pomocí programu. Bylo využito knihovny [23], která obsahuje funkce

zjišťující stav sepnutí / rozepnutí kontaktů tlačítka. Velkou výhodou této knihovny je velmi nízké vytížení procesorového času. Funkce `debounce()` je volána v obsluze přerušení s frekvencí přibližně 120 Hz.

TIMER1

Tento časovač plní primární funkci laboratorního přípravku – generuje a následně vyhodnocuje vyslané posloupnosti. Časovač `TIMER1` je nastaven do módu `CTC` bez použití předděličky. Mezní hodnota, při které dojde k přerušení, je měněna stiskem tlačítka „rychlost přenosu“. Tímto způsobem je zajištěno vysílání signálu s maximální přesností délky periody. Na počátku obsluhy je v případě korelačního přijímače (metoda vybíjeného integrátoru) vybit integrační kondenzátor. Následuje vzorkování signálu obvodem `Sample and Hold`. Aktuální hodnota výstupního signálu obvodů zpracujících signál je navzorkována A/D převodníkem zavoláním funkce `adcRead()`. Hodnota A/D převodu je srovnána s vyslaným bitem a v případě neshody je inkrementováno počítadlo chybně přenesených bitů. Dalším krokem je zavolání funkce `sequenceGenerator()` [5]. Tato funkce navrácí aktuální hodnotu bitu k vyslání. Bit je poté vyslán do obvodů zpracujících signál na pinu 4 `PORTu B`. Vyhodnocená hodnota přijatého bitu (`log.0` nebo `log.1`) je zpětně vysílána na pinu 2 `PORTu B` (simulace rozhodovacího obvodu). V závěru obsluhy přerušení je inkrementováno počítadlo přenesených bitů a v případě, že je dosaženo nastaveného maximálního počtu přenášených bitů, dochází k přerušení vysílání zavoláním funkce `transmitStop()`. Maximální nastavený počet bitů k vyslání je určen násobkem přenosové rychlosti a doby přenosu.

TIMER2

Poslední časovač primárně zajišťuje počítadlo reálného času (odpočítávání zbývajících času přenosu), jeho sekundární funkcí je pak generování tzv. seedu pro pseudonáhodný generátor. Provedením operace `srand(act_timer_value)` je zajištěno, že v rámci jednoho měření přenosu pseudonáhodných posloupností je minimalizováno riziko jejich periodicity. Samotná pseudonáhodná posloupnost je pak generována funkcí `randomSequence()`.

2.2.2 Stisk tlačítka

Ovládací panel přípravku je osazen 6 tlačítky, z nichž každé nastavuje jeden z parametrů přenosu. Přibližně každých 8 ms, viz 2.2.1, je kontrolován stav stisku tlačítka. V případě, že je vyhodnoceno stisknuté tlačítko, je tomuto tlačítku nastaven příznak.

V hlavní smyčce programu je hodnota tohoto příznaku kontrolována. Při shodě je provedeno tělo dané podmínky – změna parametrů přenosu či zastavení přenosu.

2.2.3 Výpis dat na displej

Pro jednodušší ovládání přípravku a výpis naměřených hodnot je přípravek vybaven dvouřádkovým displejem. K obsluze displeje je použito souborů `lcd.c` a `lcd.h`, které poskytují nastavení určené pro komunikaci s řadičem displeje HD44780 [14]. Displej je s mikroprocesorem propojen v rámci redukováného 4 bitového módu. Hodnoty na displeji jsou aktualizovány pomocí funkcí `refresh_LCD()` a `refresh_LCD_error_time()`. Tyto funkce jsou volány při změně jednotlivých nastavení (při stisku tlačítek). V případě vysílání je výpis hodnot na displej prováděn každou sekundu přenosu. Při zvolení pseudonáhodné posloupnosti je pro názornost každou sekundu právě vysílaná posloupnost vypsaná na displej. Po dokončení či zastavení přenosu displej opět zobrazí výpis „pseudo“.

2.2.4 Vizuální signalizace

Pro jednoduchost a přehlednost je pro měření v rámci laboratorní výuky přípravek vybaven vizuální signalizací. Při spuštění, přenosu a dokončení přenosu je tak uživatel promptně informován o aktuálním průběhu měření. Při spuštění dochází k rychlému rozsvícení a zhasnutí všech LED jako signalizace správného spuštění. Při samotném přenosu dat dochází každou sekundu k rozsvícení a zhasnutí LED vybrané signálové cesty. Po dokončení přenosu přípravek informuje uživatele stejným způsobem jako při jeho spuštění. Signalizace je realizována funkcemi `ledFlash()` a `ledAlert()`.

2.3 Konstrukce laboratorního přípravku

Navržené obvodové zapojení bylo sestaveno, otestováno a změřeno na nepájivém poli. Po ověření správné funkčnosti bylo přistoupeno k návrhu DPS v programu Eagle 6.5.0. Vzhledem k charakteru předepsané konstrukční krabičky (KP22) bylo vhodné zapojení realizovat pomocí dvou DPS – DPS s obvody zpracujícími signál a DPS s měřicími zdírkami, BNC konektorem a tlačítky. Propojení těchto dvou funkčních celků je pak provedeno pomocí 36 žilového plochého kabelu. DPS jsou umístěny v horním a spodním dílu odděleně.

2.3.1 DPS s měřicími zdířkami, BNC konektorem a tlačítky

Tato DPS zajišťuje propojení přípravku s měřicím zařízením (osciloskop), zdrojem šumu (signálový generátor) a napájením ($\pm 12V$ zdroj). Z důvodu polohy tlačítek na ovládacím panelu bylo vhodné tuto DPS umístit do horního dílu konstrukční krabičky tak, aby byla s dílem pevně spojena a aby odolala i silnému stisku tlačítek. K tomuto účelu je také DPS opatřena velkým množstvím otvorů pro pevné přichycení k hornímu dílu. Tato DPS obsahuje kontakty určené k připojení LCD pro obsluhu a výpis dat, toto propojení je provedeno plochým 10 žilovým kabelem. DPS je navržena na oboustranné desce s rozlitou zemnicí plochou, celkové rozměry jsou 109 x 47 x 1,5 mm (d x š x v). Tato deska je k hornímu dílu přichycena pomocí šroubů M3 se zápusťnou hlavou a 6mm distančních podložek, ze strany DPS je toto spojení zakončeno maticí M3.

2.3.2 DPS s mikroprocesorem a obvody zpracování signálu

Účelem této DPS je generovat a zpracovávat veškeré signály, které jsou vyvedeny na měřicí zdířky. Napájení je na desce realizováno pomocí tří větví: +12V větev, -12V větev, +5V větev a společná zemnicí plocha pro všechny napájecí větve. Napájecí větve +12 V a -12 V jsou umístěny po třech stranách desky se vzájemným rozestupem přibližně 11,5 mm. Tento rozstup je použit z důvodu snadného umístění a následného napájení integrovaných obvodů vyžadujících symetrické napájecí větve. Napájecí spoje jsou umístěny na spodní straně DPS, šířka těchto spojů je přibližně 1,7 mm. Stabilizátor LM7805 je z důvodu pulzních odběrů mikroprocesoru umístěn v jeho těsné blízkosti, napájecí větev je provedena vylitou plochou pod mikroprocesorem z důvodu minimalizace impedance. Stabilizátor LM7805 je k desce přichycen šroubovým spojením, pod stabilizátorem je prokovená zemnicí plocha, která slouží k rychlému odvodu Jouleova tepla z horní strany desky do strany dolní. V blízkosti vstupní svorky stabilizátoru je umístěn filtrační elektrolytický kondenzátor C_7 a keramický kondenzátor C_{10} . Elektronické součástky, které tvoří část napájecího bloku, jsou z důvodu odvodu Jouleova tepla umístěny na dolní části desky pod konektorem tak, aby se minimalizoval přenos nežádoucího tepla směrem k integrovaným obvodům. Toto opatření vede ke zvýšení teplotní stability celého laboratorního přípravku. Jádrem návrhu je pak mikroprocesor ATmega 16A PU, který provádí řízení jednotlivých fází zpracování signálu. Z tohoto důvodu je také pro snadnější připojování ostatních bloků umístěn do středu desky. V těsné blízkosti jeho napájecích pinů jsou umístěny blokovací kondenzátory C_4 a C_6 . Kondenzátor C_5 je připojen externě k pinu AREF pro ustanovení a filtrování napěťové reference A/D převodníku. Pro filtraci napájení A/D převodníku je mezi pin AVCC a +5V větev umístěna cívka L_1 . Přesný pracovní takt mikroprocesoru zajišťuje externí krystalový rezonátor, který

pro svůj správný rozběh využívá dvojice keramických kondenzátorů C_2 a C_3 . Rezonátor je spolu s kondenzátory C_2 a C_3 umístěn v těsné blízkosti pinů XTAL1 a XTAL2. Tento mikroprocesor je do DPS z důvodu snadné výměny v případě poškození zasazen do precizní patice DIP40. Ze stejného důvodu byla volena i pouzdra dalších integrovaných součástek – NE5532P(DIP8), LF398N(DIP8), ADG201AKNZ(DIP16) a LM7805(TO-220). Mezi další vývodové součástky patří pouzdro pro nevratnou pojistku, univerzální diody, Zenerovy diody, výkonové rezistory a vstupní filtrační kondenzátory. Z ostatních součástek to je 36 pinový konektor, 6 pinový ISP konektor pro programování a měřicí body na DPS. Jednotlivé funkční celky a součástky jsou na desce umístěny s ohledem jak na logickou posloupnost procesů, tak také s ohledem na minimalizaci vodivých spojů mezi jednotlivými bloky zpracujícími signál. Integrovaný obvod v levém dolním rohu desky převádí unipolární generovanou posloupnost na signál bipolární, tento integrovaný obvod použitím druhého OZ takto upravený signál poté lineárně sčítá s vyfiltrovaným šumem. Integrovaný obvod směrem nahoru má identickou funkci, generovaná posloupnost je pouze zpožděna o jednu signálovou periodu. Další obvod v řadě je pak rozdílový zesilovač, který od sebe odčítá výstupní signály ze dvou předchozích integrovaných obvodů. Druhý operační zesilovač tohoto obvodu generuje výstupní posloupnost, která je určena aktuální hodnotou A/D převodníku (simuluje rozhodovací obvod na straně přijímače).

Napravo od mikroprocesoru se nachází analogový přepínač, který slouží k řízení integrátoru (obvod nad analogovým přepínačem). Tento analogový obvod také realizuje výběr signálové cesty. Analogový přepínač v pravém horním rohu slouží ke spínání výstupů signálů z IC4 a IC5. Prostřední integrovaný obvod pravé strany v sobě obsahuje dva zdroje šumu – šum širokopásmový a šum filtrovaný dolní propustí. Pod tímto obvodem je umístěn IC10 plnící funkci obvodu Sample and Hold. Posledním integrovaným obvodem je OZ, který upravuje napěťové úrovně pro A/D převodník do maximálního vstupního rozsahu (0–5 V).

S přihlédnutím k rozměrům krabičky KP22 neprošel návrh této DPS rozměrovou optimalizací.

2.3.3 Výroba prototypové DPS

Po dokončení návrhu obou DPS bylo přikročeno k jejich výrobě. První prototyp DPS byl zhotoven metodou laserového odpalování mědi na na Ústavu Telekomunikací FEKT VUT.

Metoda laserového odpalování je vhodná zejména pro prototypovou výrobu díky své všestrannosti a rychlosti výroby při malém objemu DPS – přímým zadáním souřadnic mědi, která má být odstraněna, odpadají některé dílčí kroky klasických výrobních postupů a dochází tak k urychlení celého procesu. Další výhodou této

metody je absence použití chemických prostředků, nenastává tak riziko přeleptání či podleptání, zároveň je minimalizováno i riziko povýrobní koroze. Před zahájením výroby jsou do zařízení nahrány Gerber data. Tyto soubory obsahují informace o výsledném rozložení vodivých ploch na desce. Po inicializaci procesu je založena základní deska opatřená dvěma stranami 35 μm mědi. Poté je zahájen samotný proces odpalování vč. vrtání otvorů. Po odstranění nežádoucích ploch mědi je deska umístěna do kartáčové čističky s dopravníkem. Pomocí kartáčů a zvýšené teploty jsou odstraněny rezidua po odpalování. Po důkladném vysušení desky je provedeno lakování pájitelným kalafunovým lakem FLUX SK10.

Před zahájením pájení je vhodné ještě provést optickou kontrolu kvality. Vlivem nerovnoměrné tloušťky desky či nepřesnosti v mikroposuvu laseru může dojít k zanechání nežádoucího proužku mědi na základním substrátu. Tenký, okem těžko pozorovatelný, kousek mědi může být příčinou nefunkčnosti celého navrženého zařízení. Jedním ze způsobů odstranění tohoto zkratového propoje může být např. obvodový ořez okolo všech signálových a napájecích cest. Jedná se o poměrně zdlouhavý proces, pro následnou spolehlivou funkčnost a odladění prototypu je však kardinální. Další metodou odstranění mikrozkratů může být také přiložení zdroje proudu. Kontaktováním mezi sousedními signálovými či napájecími cestami je zkrat odstraněn tepelným odpálením mědi od povrchu substrátu. Nevýhodou této metody je možné odpálení velmi tenkých signálových cest nadměrným proudem.

Prototypová deska byla vyrobena bez prokovů, veškeré prokovy tedy bylo nutno zhotovit ručně - protažením vodiče s pevným jádrem (průměr 0,4 – 0,6 mm) otvory pro prokovy a následným zapájením z obou stran.

2.3.4 Osazení prototypové DPS

S ohledem na první oživení tohoto prototypu bude deska zprovozněována po jednotlivých blocích tak, aby bylo možné co nejrychleji identifikovat případné místo poruchy. Osazování je zahájeno na DPS s tlačítky a připojeným LCD displejem. LCD displej je s DPS propojen pomocí 10 žilového plochého kabelu, poté je provedeno zapájení tlačítek a závěrem je zapájen 36 pinový konektor. Osazování desky s obvody zpracujícími signál začíná osazením součástek napájecího bloku. Postupně je zapájeno pojistkové pouzdro (zapojena nevratná pojistka), univerzální diody, Zenerovy diody a výkonové rezistory. Připojením napětí $\pm 12\text{ V}$ na vstupní svorky pojistek a provedením měření na výstupu Zenerových diod je ověřena funkčnost, napětí na výstupu Zenerových diod by mělo být cca $+10,55\text{ V}$ a $-10,55\text{ V}$. Po správném zprovoznění symetrických napájecích větví jsou tyto větve doplněny o filtrační kondenzátory. Tímto krokem je předcházeno možné explozi elektrolytických kondenzátorů při přepólování. Napájecí větev $+5\text{ V}$ je osazena stabilizátorem

a dvěma kondenzátory proti rozkmitání, po zapájení a připojení napájení na symetrické napájecí větve je na výstupu stabilizátoru udržováno napětí +5 V. Po ověření této hodnoty je možné zapájet i vstupní elektrolytický kondenzátor. Pro ověření funkčnosti dalších bloků je nutné zprovoznit mikroprocesor ATmega 16A. V této fázi je tedy do DPS zapájen krystalový rezonátor, kondenzátory pro rozběh rezonátoru a blokovací kondenzátory. Pomocí programovacího konektoru ISP je připojen programátor a do mikroprocesoru je nahrán program. Stiskem tlačítka je zvolena vhodná testovací posloupnost a spuštěn přenos. Na pinu 4 PORTu B je pak pomocí osciloskopu vidět vysílaná posloupnost v mezích 0 – 5 V. Po osazení mikroprocesoru přichází na řadu zprovoznění analogových spínačů, zapájením součástek a stiskem tlačítek „volba přijímače“ a „rychlost přenosu“ je ověřena správná funkce přepínání signálových řídicích vstupů ASW1 – ASW8. Ovládací vstupy nabývají pouze jednoho ze stavů přepnutí po celou dobu přenosu, výjimkou je pouze řídicí vstup ASW2, který je spínán vždy na konci periody každého vyslaného bitu. Přepínače IC9 A-D jsou využity v rámci bloku integrátoru, přepínače IC6 A-D pak při přepínání generovaných binárních posloupností a spínání šumového napětí. Ověřením správné funkce analogových přepínačů je možné realizovat dolní propust zapojení OZ pro AWGN. Zde je naprosto klíčová volba přesných součástek, zesílení tohoto zapojení totiž dosahuje stejného rozložení hustoty pravděpodobnosti jako šum nefiltrovaný. Zvýšením zisku by tak prudce vzrostla chybovost, jeho snížením by chybovost naopak klesla. Zapojení druhého OZ tohoto pouzdra ve funkci napěťového sledovače již nenachází v této realizaci uplatnění, bylo použito pouze při vývoji a odladování. V rámci zabránění nežádoucí saturace výstupu je nutné invertující vstup externě uzemnit a propojit neinvertující vstup s výstupem. Dalším krokem v rámci zprovoznění přípravku je osazení dvou bloků převodu unipolárního signálu na bipolární (IC4 a IC5), kde po správném osazení a vygenerování posloupnosti mikroprocesorem by mělo být na měřicím bodu NRZ a NRZD naměřeno napětí v rozkmitu $\pm 0,5$ V. Druhý OZ v rámci daného pouzdra (IC4B a IC5B) tohoto zapojení realizuje lineární součet upravené bipolární NRZ posloupnosti s šumem vyfiltrovaným dolní propustí. Tyto dva signály jsou poté přivedeny do rozdílového zesilovače IC8A, správným zapojením a vygenerováním posloupnosti by na výstupu tohoto bloku při volbě přizpůsobeného filtru mělo být napětí s dvojnásobným rozkmitem při změně generované posloupnosti a setrvání v daném stavu při vyslání stejného bitu oběma předchozími bloky. Při přepnutí na přímou cestu a vybíjený integrátor by výstupem měl být signál roven totožný s výstupem operačního zesilovače IC4B. Navazujícím blokem je pak zapojení integrátoru a osazení součástek. Volbou přímé cesty pomocí tlačítka „volba přijímače“ by na výstupu těchto dvou OZ měl být signál roven výstupu OZ IC8A fázově posunutý o 360 stupňů. Přepnutím tlačítka na přizpůsobený filtr by pak na výstupu tohoto bloku měl být napěťový průběh podobný trojúhelníku (při vyslání jednoho bitu

v úrovni + 0,5 V) a napěťový průběh podobný lichoběžníku (při vyslání více bitů v úrovni + 0,5 V). Přepnutím na signálovou cestu vybitého integrátoru dochází k periodickému spínání ASW2. Na výstupu tohoto bloku je poté patrný pilovitý napěťový průběh. Z konstrukčních důvodů však nebylo možné přivádět na vstup tohoto integrátoru posloupnost lineárně sečtenou s šumem, je zde tedy přiváděna pouze binární NRZ posloupnost bez šumu, viz 2.1.9. Výstup z integrátoru je přiváděn na obvod IC10, který realizuje funkci Sample and Hold. Správným osazením, výběrem přizpůsobeného filtru a vysláním posloupnosti naměříme na výstupu tohoto obvodu zapamatované napětí v rozkmitu +10 a - 10 V. Poté je již třeba jen upravit signál do rozsahu A/D převodníku. Po zapájení součástek by při použití přizpůsobeného filtru mělo být naměřeno napětí, které při vyslání log.0 bude mít hodnotu 0 V a při vyslání log.1 bude mít napětí +5 V. Druhý obvod v rámci tohoto OZ je napěťově upraven do rozsahu $\pm 0,5$ V pro lepší názornost při odlaďování obvodu (měřicí bod MEAS). Posledním obvodem, který zobrazuje přijatou hodnotu, je převodník unipolárního signálu na bipolární totožný s těmi, které jsou používány pro vysílání vygenerované posloupnosti. Osazením součástek, vygenerováním posloupnosti a lineárním součtem s šumem s vysokou efektivní hodnotou bude při srovnání s vysílanou posloupností patrná zvýšená chybovost (rozdíl mezi bitem, který byl vyslán a bitem, který byl detekován na přijímací straně).

2.3.5 Ovládací panel laboratorního přípravku

Po osazení ovládací desky s kontakty pro připojení LCD jsou do horního dílu krabičky KP22 vyvrtány otvory dle výkresu D.1. Ovládací deska je poté přichycena pomocí M3 zápusťných šroubů, distančních podložek a M3 matic k hornímu dílu. Do otvorů pro indikaci zvolené cesty jsou vlepeny 3mm červené LED. Potisk ovládacího panelu, viz D.2, je zalaminován do plastové fólie. Nástrojem pro děrování jsou vyraženy otvory předtištěných rozměrů. Potisk je přiložen k předvrtaným otvorům a zajištěn měřicími svorkami, tyto svorky jsou z vnitřní strany horního dílu přichyceny pomocí matic a pomocí vodičů propojeny s ovládací deskou. LCD je do předvrtaných otvorů uchycen pomocí šroubů a matic M2. Poté jsou s deskou propojeny napájecí konektory, zemnicí konektory a BNC konektor. Po nakontaktování jsou pomocí teplem stahovatelných bužírek svorky zaizolovány. Na závěr je potisk po obvodu podlepen oboustrannou lepicí páskou.

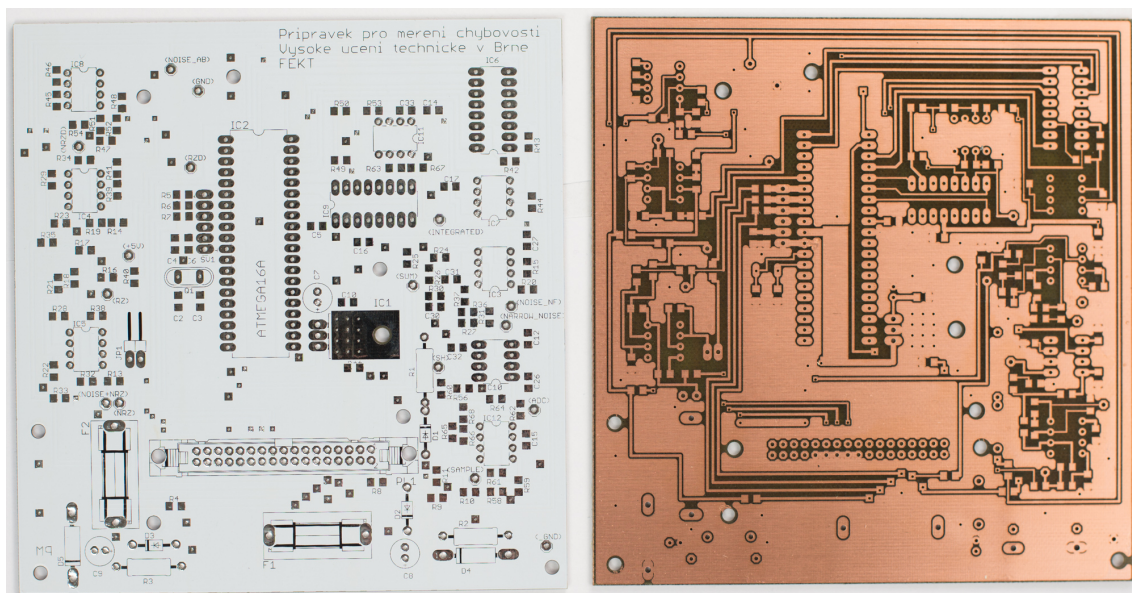
2.3.6 Zakázková výroba DPS

Po zkonstruování a zprovoznění prototypové desky bylo z důvodu velké časové náročnosti optické kontroly a nutnosti manuálního prokovení vodičem přistoupeno k zakázkové výrobě DPS. Po prvotním průzkumu nabídky trhu tuzemských výrobců

bylo vybráno několik možných firem. Společnou doménou zakázkové výroby v ČR je však velmi vysoká cena za zpracování zakázky a také samotný náklad na výrobu 1 dm². Bylo hledáno alternativní řešení, které by obnášelo výrobu malého objemu DPS (do 5 ks) za přijatelnou cenu v časovém horizontu do přibližně 10 dnů od zadání zakázky. Zajímavou možností se tak stal čínský výrobce ALLPCB, který splňoval všechna výše zmíněná kritéria. Bylo přistoupeno k vytvoření objednávky s následujícími parametry:

- 5 kusů dvouvrstvé DPS v rozměru 133 x 128 mm,
- tloušťka mědi – 35 μm,
- minimální izolační vzdálenost – 0,15 mm,
- základní materiál – FR4,
- tloušťka desky – 1,6 mm,
- prokovení bez zalití nepájivou maskou,
- povrchová úprava HASL (olovnatá pájka),
- bílá nepájivá maska,
- černý servisní potisk.

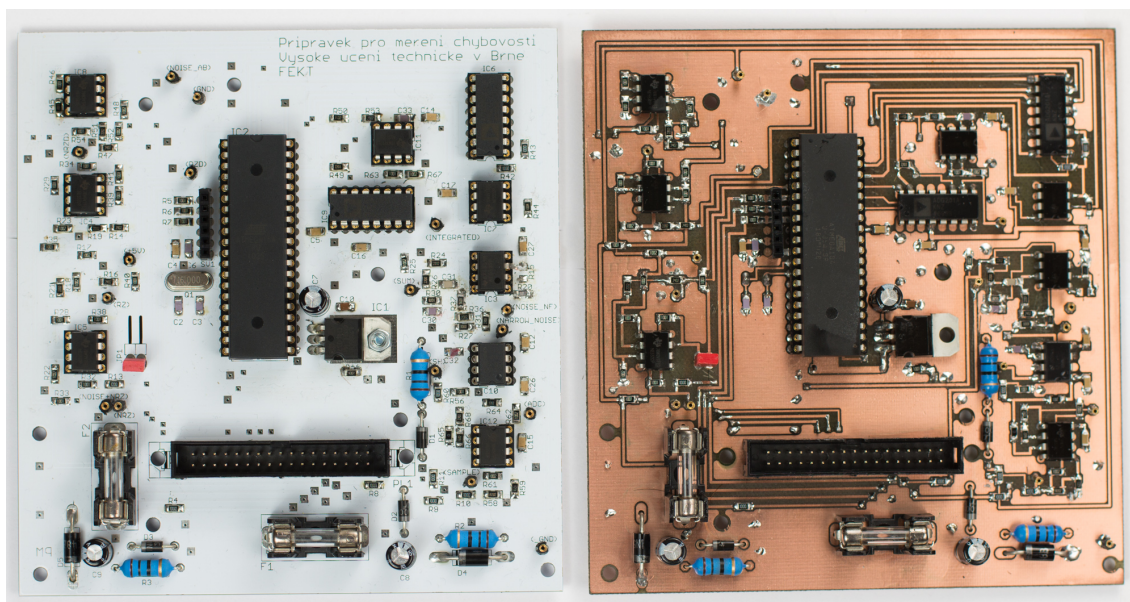
Výsledná cena objednávky, včetně všech poplatků byla 35,51 \$ (přibližně 770 Kč). Výrobní náklady na jednu desku jsou tedy přibližně 150 Kč/ks. Při takto příznivé ceně a době dodání 5 dnů od vytvoření objednávky se jedná o velmi silnou konkurenci tuzemskému trhu výrobců DPS. Při větším objemu zakázky by došlo k ještě výraznějšímu snížení ceny za jeden vyrobený kus.



Obr. 2.21: Zakázkově vyrobená DPS (vlevo) a prototypová DPS (vpravo).

2.3.7 Osazení zakázkově vyrobené DPS

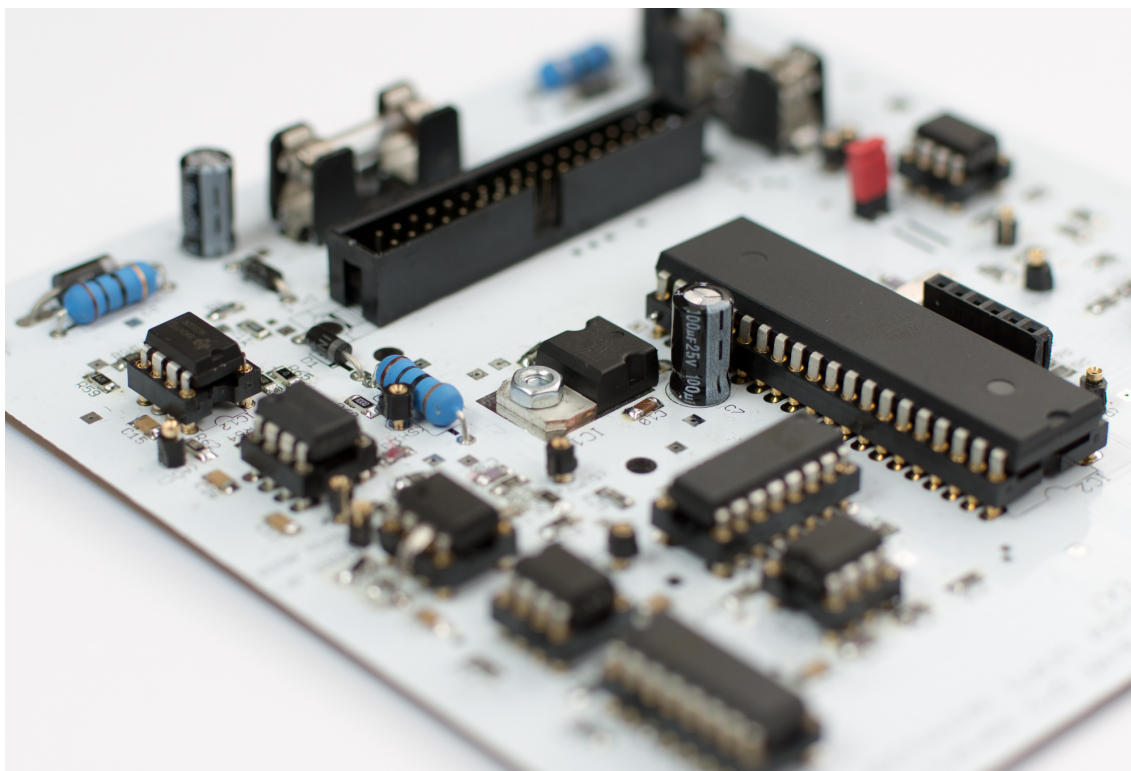
S ohledem na odladění obvodových zapojení, které proběhlo při předchozí výrobě DPS, je již možné použít standardní přístup k osazování DPS. Práce je započata osazením všech SMD rezistorů dle osazovacího plánu, následují SMD kondenzátory, poté jsou připojeny THT součástky, je osazen krystalový rezonátor, měřicí body, zkratovací propojka, držáky nevratných pojistek, lineární stabilizátor (uchycení šroubovým spojením, viz 2.23), DIL-8 patice, DIL-16 patice, DIL-40 patice a na závěr 36ti pinový konektor. Patice jsou osazeny příslušnými integrovanými obvody a do držáků jsou zasazeny pojistky. Po připojení napájecího napětí na svorky +12 V, - 12 V a GND je provedeno naprogramování součástky přiloženým programem. Klidový odběr na +12V větvi je přibližně 100 mA, na větvi záporné je naměřen proudový odběr cca 70 mA.



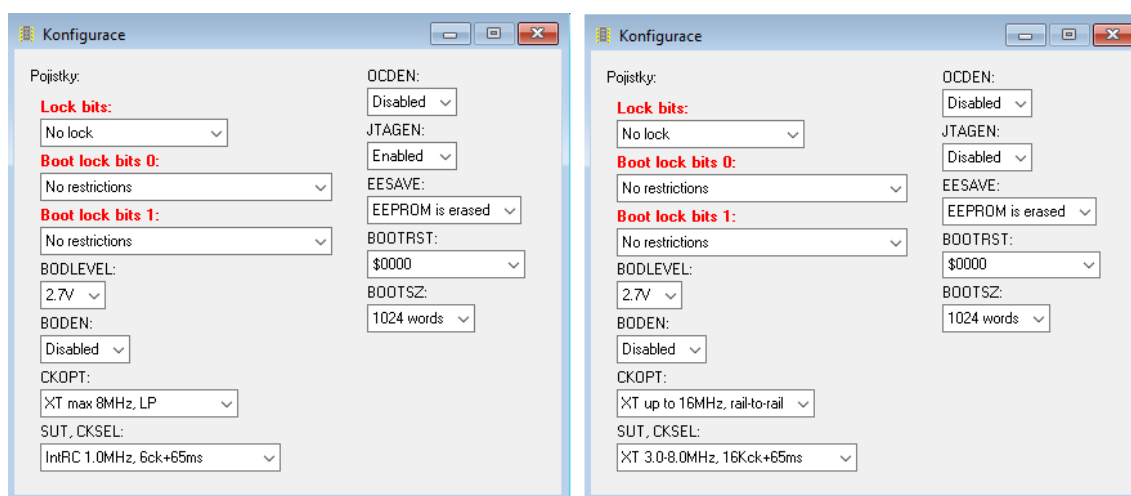
Obr. 2.22: Osazená zakázkově vyrobená DPS (vlevo) a osazená prototypová DPS (vpravo).

2.3.8 Programování mikroprocesoru

Vzhledem k použití ISP programovacího rozhraní je nutné dbát zvýšené opatrnosti při nastavování pojistek (fuses). Výchozí nastavení pojistek obsahuje volbu vnitřního RC oscilátoru, aktivaci JTAG rozhraní a snížený maximální rozkmit. Toto nastavení, je třeba upravit tak, aby bylo deaktivováno rozhraní JTAG a byl zvolen externí zdroj taktu – krystalový rezonátor 16 MHz se zvýšeným rozkmitem (rail-to-rail), viz snímek 2.24.



Obr. 2.23: Detail uchytení lineárního stabilizátor LM7805.



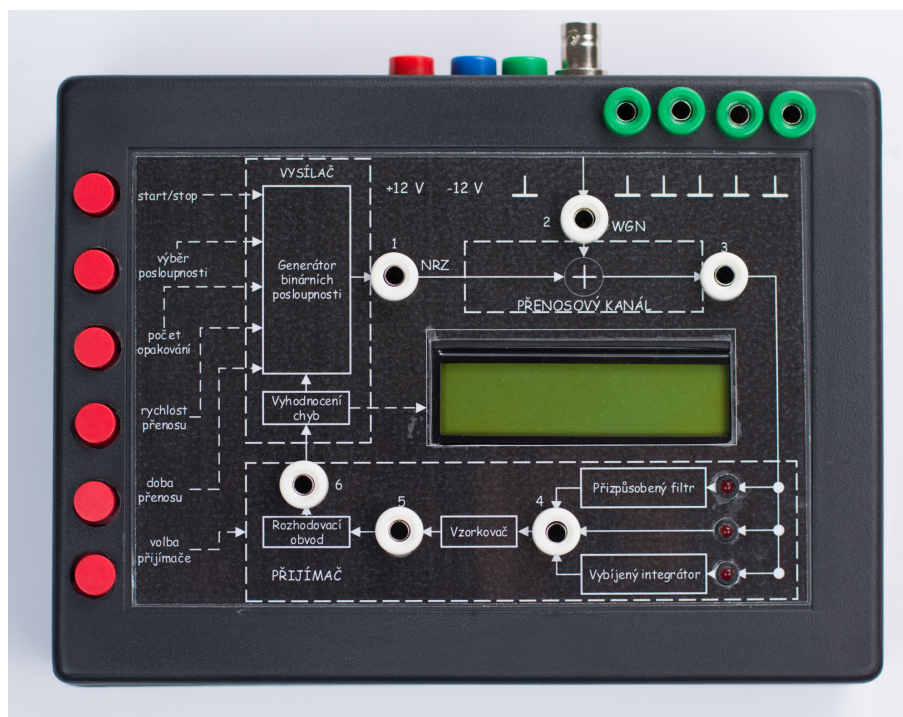
Obr. 2.24: Tovární nastavení pojistek mikroprocesoru vlevo, nastavení nutné pro správné naprogramování je vyobrazeno na pravém snímku.

Po úspěšném naprogramování součástky přímo v aplikaci je provedeno testování funkčnosti ovládacích tlačítek a LCD.

Při požadavku na maximální přesnost je možnost provést kalibraci A/D pře-

vodníku, k tomuto účelu je vytvořena v rámci kódu funkce `adc_calibrate`. U této funkce je nejprve nutné odstranit znaménko komentáře a provést novou kompilaci programu. Po úspěšném naprogramování součástky necháme zařízení ohřát na provozní teplotu (cca 5 – 10 minut). Laboratorní přípravek vypneme a připojíme signálový generátor s nastavenou nejnižší možnou efektivní hodnotou šumu (kompenzace případného stejnosměrného posuvu signálu). Spuštěním laboratorního přípravku je automaticky provedena kalibrace. V případě, že výpis na displeji zobrazuje hodnotu odlišnou od výchozí hodnoty 456, je vhodné tuto hodnotu přiřadit proměnné `adc_comp_val`. Po úspěšné kalibraci je možné součástku naprogramovat zkompilevaným kódem s rozhodovací úrovní ležící přesně ve středu přijímaného NRZ signálu a zakomentovanou funkcí `adc_calibrate`. Se zvolenou tolerancí použitých součástek však kalibrace není nutná a jedná se pouze o krok, který vede k získání maximální přesnosti laboratorního přípravku.

Přesnost laboratorního přípravku je následně ověřena měřením. Na signálovém generátoru je zvolen šum s efektivní hodnotou $200 \text{ mV}_{\text{RMS}}$, na laboratorním přípravku pak rychlost R1 (1 kbit/s) a posloupnost 0xAAAAh. Po 60 sekundách přenosu by měl LCD zobrazit výsledný počet chyb, ten by se měl pohybovat v rozmezí 350 – 400 chyb. V ojedinělém případě, kdy by hodnota zobrazená na displeji ležela mimo tento rozsah, je nutné provést úpravu zesílení zisku dolní propusti s OZ a to úpravou hodnot rezistorů R_{27} , R_{31} , R_{36} a R_{37} . Pro přesné odladění je možné nahradit jeden z rezistorů trimrem. Nová hodnota rezistoru pak bude rovna hodnotě trimru, při kterém obvod vyhodnocoval chybovost v souladu s výpočtem teoretické chybovosti stanovené na základě Gaussova rozložení hustoty pravděpodobnosti, viz tabulka 1.1.



Obr. 2.25: Čelní pohled na sestrojený přípravek.



Obr. 2.26: Horní pohled na sestrojený přípravek.

2.4 Ovládání laboratorního přípravku

Po připojení symetrického napájení $\pm 12\text{ V}$ je na displeji přípravku zobrazena úvodní hláška: „LAB. CV.1 – MTSD“. Poté dojde k rozsvícení a zhasnutí všech indikačních LED. Po tomto procesu se na prvním řádku displeje zobrazí následující parametry přenosu, viz 2.27 :

- generovaná posloupnost (0x0000h, 0xFFFFh, 0xAAAAh, 0xA54Eh, 0xE253h,

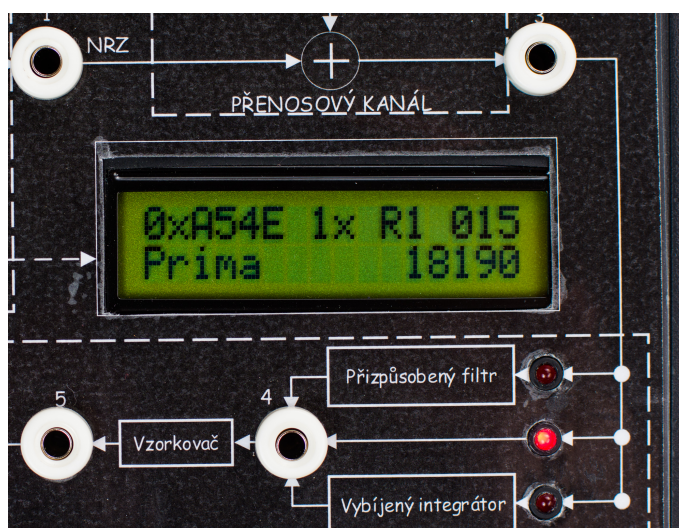
- 0xBA87h, 0x5D6Dh a posloupnost pseudonáhodná),
- počet opakování vyslání jednoho bitu(1x, 3x, 5x, 9x),
- rychlost přenosu(R1, R2, R3)
- doba přenosu (60, 180, 300 a 540 sekund),

Na řádku druhém je vypsáno:

- prvních 5 písmen zvolené signálové cesty,
- počet chybně přijatých bitů.

Tlačítka ovlivňující přenos jsou na levé části ovládacího panelu umístěna následovně (směrem shora dolů):

- tlačítko „start/stop“,
- tlačítko „výběr posloupnosti“,
- tlačítko „počet opakování“,
- tlačítko „rychlost přenosu“,
- tlačítko „doba přenosu“,
- tlačítko „volba přijímače“.



Obr. 2.27: Výpis parametrů přenosu a počtu chybně přijatých bitů na displej.

Stiskem tlačítka „start/stop“ je zahájen přenos vybrané posloupnosti, při opětovném stisknutí během přenosu je přenos přerušen, na displeji zůstává hodnota zbývajících času a počtu chyb. Po dalším stisku tlačítka je počítadlo zbývajících času nastaveno na výchozí hodnotu, počet chyb je vynulován. Dalším stiskem tlačítka je zahájen nový přenos dat. Analogické je ovládání i při standardním dokončení přenosu zvolené posloupnosti.

Zbývající tlačítka prochází postupně výše uvedené parametry přenosu. Stiskem tlačítka po poslední možné volbě je vybíráno opět od výchozí hodnoty. Podrobné možnosti ovládání laboratorního přípravku jsou uvedeny v příloze E.

2.5 Výsledky měření

Po úspěšném sestavení laboratorního přípravku a umístění do krabičky KP22 s ovládacím panelem bylo přistoupeno k měření. Laboratorní přípravek byl nastaven pro použití přímé signálové cesty, byla zvolena posloupnost AAAAh (střídavé vysílání log.1 a log.0) a byl připojen signálový generátor. Napájení laboratorního přípravku zajišťoval symetrický zdroj ± 12 V. Měření bylo provedeno pro všechny tři přenosové rychlosti a efektivní hodnotu šumu v rozsahu 0,2 – 2,2 V.

Tab. 2.1: Tabulka počtu chybně přenesených bitů pro přenosovou rychlost 1 kbit/s.

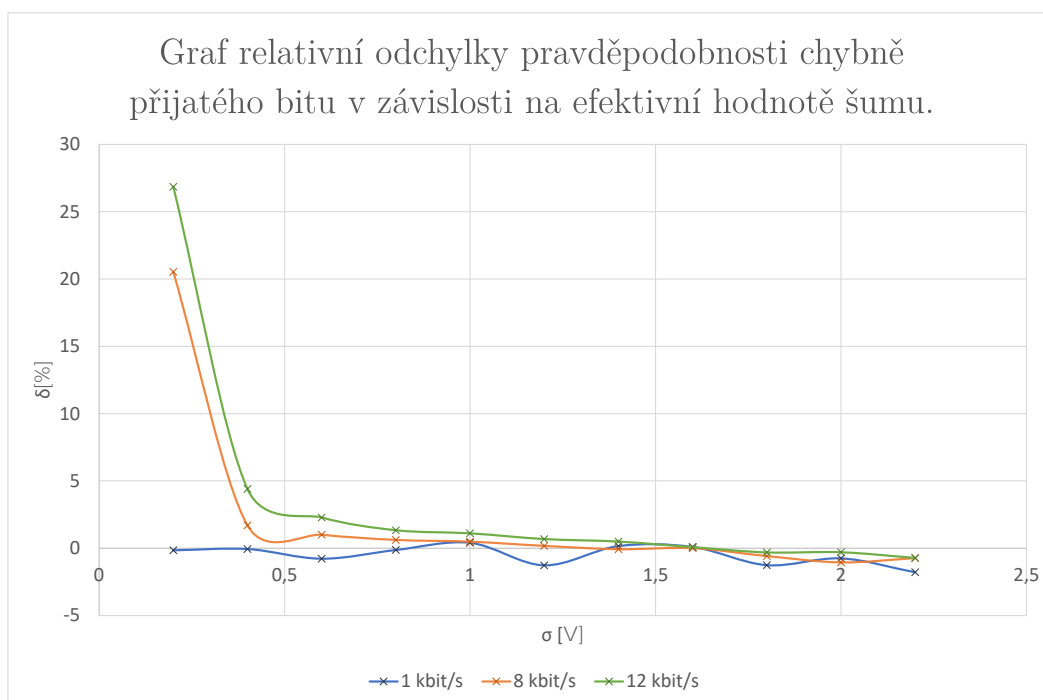
1 kbit/s				
efektivní hodnota šumu	naměřený počet chybně přijatých bitů	teoretický počet chybně přijatých bitů	absolutní chyba	relativní chyba
U_{ef} [V]	[bit]	[bit]	Δ [-]	δ [%]
0,2	372	373	1	-0,16
0,4	6335	6339	4	-0,06
0,6	12046	12140	94	-0,78
0,8	15938	15959	21	-0,13
1	18587	18512	-75	0,40
1,2	20053	20308	255	-1,27
1,4	21664	21630	-34	0,16
1,6	22661	22640	-21	0,09
1,8	23144	23435	291	-1,26
2	23897	24078	181	-0,76
2,2	24174	24606	432	-1,79

Tab. 2.2: Tabulka počtu chybně přenesených bitů pro přenosovou rychlost 8 kbit/s.

8 kbit/s				
efektivní hodnota šumu	naměřený počet chybně přijatých bitů	teoretický počet chybně přijatých bitů	absolutní chyba	relativní chyba
U_{ef} [V]	[bit]	[bit]	Δ [-]	δ [%]
0,2	3751	2981	770	-25,85
0,4	51587	50712	4	-1,73
0,6	98099	97118	94	-1,01
0,8	128466	127673	21	-0,62
1	148825	148098	-75	-0,49
1,2	162745	162461	255	-0,17
1,4	172908	173036	-34	0,07
1,6	181122	181119	-21	0,00
1,8	186398	187484	291	0,58
2	190612	192621	181	1,04
2,2	195410	196851	432	0,73

Tab. 2.3: Tabulka počtu chybně přenesených bitů pro přenosovou rychlost 12 kbit/s.

12 kbit/s				
efektivní hodnota šumu	naměřený počet chybně přijatých bitů	teoretický počet chybně přijatých bitů	absolutní chyba	relativní chyba
U_{ef} [V]	[bit]	[bit]	Δ [-]	δ [%]
0,2	6113	4471	-1642	26,86
0,4	79569	76068	-3501	4,40
0,6	149084	145676	-3408	2,29
0,8	194105	191510	-2595	1,34
1	224628	222147	-2481	1,10
1,2	245366	243692	-1674	0,68
1,4	260841	259555	-1286	0,49
1,6	271899	271678	-221	0,08
1,8	280350	281226	876	-0,31
2	288063	288931	868	-0,30
2,2	293171	295276	432	-0,72



Obr. 2.28: Grafické znázornění závislosti relativní odchylky pravděpodobnosti chybně přijatého bitu na efektivní hodnotě šumu.

Porovnáním relativních chyb v rámci každé ze zvolených rychlostí je patrné, že přípravek v rozmezí 0,4 – 2,2 V poskytuje velmi přesné výsledky. V rozmezí této efektivní hodnoty šumu chybovost plně odpovídá teoretickým hodnotám stanoveným pomocí Gaussova normovaného normálního rozdělení. Z tabulky 2.1 vyplývá, že relativní chyba napříč zadaným rozsahem osciluje v rámci cca $-1 - +2$ %.

Tab. 2.4: Počet chybně přijatých bitů a výsledná chybovost při opakovaném přenosu.

Rychlost R1 – 1 kbit/s								
efektivní hodnota šumu	počet chyb				výsledná chybovost			
U_{ef} [V] / počet opakování->	1x	3x	5x	9x	1x	3x	5x	9x
0,4	6335	1816	513	0	0,1056	0,0303	0,0086	0
1,2	20179	15789	12512	8488	0,3363	0,2632	0,2085	0,1415
2	23782	20783	18400	15227	0,3964	0,3464	0,3067	0,2538
Rychlost R2 – 8 kbit/s								
efektivní hodnota šumu	počet chyb				výsledná chybovost			
U_{ef} [V] / počet opakování->	1x	3x	5x	9x	1x	3x	5x	9x
0,4	51596	14966	4238	403	0,1075	0,0312	0,0088	0,0008
1,2	162624	127785	102099	68841	0,3388	0,2662	0,2127	0,1434
2	191280	167022	149173	122605	0,3985	0,3480	0,3108	0,2554
Rychlost R3 – 12 kbit/s								
efektivní hodnota šumu	počet chyb				výsledná chybovost			
U_{ef} [V] / počet opakování->	1x	3x	5x	9x	1x	3x	5x	9x
0,4	79998	23067	6495	599	0,1111	0,0320	0,0090	0,0008
1,2	245847	191242	152985	103410	0,3415	0,2656	0,2125	0,1436
2	287344	250427	223311	184767	0,3991	0,3478	0,3102	0,2566

Tato hodnota je vzhledem k stochastickému charakteru šumu velmi dobrá.

Při rychlostech 8 kbit/s a 12 kbit/s, viz 2.2 a 2.3, dochází k cca 25% nárůstu chybovosti. Příčina tohoto jevu není objasněna, možným původcem by však mohl být mezní kmitočet dolní propusti, viz 2.1.6, protože poměr frekvencí vysílaného signálu (8 kHz a 12 kHz) je již pouze cca 1/10 mezního kmitočtu. Tento fakt by se tak mohl projevit při nízkých hodnotách efektivního napětí šumu, neboť změna okamžité hodnoty šumu nemusí být dostatečně rychlá vůči šumu nefiltrovanému a nastane tak chybný příjem bitu.

Tabulka 2.4 zobrazuje počet chybně přijatých bitů při opakovaném přenosu. Z důvodu opakovaného vyslání bitu dochází k poklesu přenosové rychlosti. Pro dosažení maximální přesnosti výsledků měření bylo tedy místo vynásobení počtu chyb přistoupeno k prodloužení času vysílání v odpovídajícím měřítku.

Graf 2.28 přehledně znázorňuje závislost relativní odchylky pravděpodobnosti chybně přijatého bitu na efektivní hodnotě šumu. V případě, že by byl použit rozsah 0,4 – 2,2 V efektivní hodnoty šumu, lze konstatovat, že zařízení je v celém rozsahu přesné – max. relativní odchylka při rychlosti 12 kbit/s činí 4,4 %. V tomto rozsahu má grafická závislost podobu přímky, která má mírně sestupnou tendenci, největší přesnosti pak zařízení dosahuje při všech třech přenosových rychlostech u efektivní hodnoty šumu 1,6 V.

3 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na problematiku chybovosti přenosového kanálu, na který působí aditivní bílý Gaussův šum. V úvodní části této práce byla v teoretické rovině nastíněna problematika chybného příjmu v prostředí telekomunikačního kanálu. Byly vysvětleny nejdůležitější vztahy a jevy probíhající v přenosovém kanálu, zejména teoretický základ výpočtu pravděpodobnosti chybného příjmu. Pozornost byla zaměřena i na šum, jeho vlastnosti a princip vzniku. V simulačním prostředí Matlab Simulink byl proveden teoretický rozbor přenosu přímou signálovou cestou, signálovou cestou využívající korelační přijímač (vybíjený integrátor) a signálovou cestou využívající přizpůsobený filtr. Výstupem teoretické části jsou simulační oscilogramy zachycující napěťové průběhy na výstupech jednotlivých bloků přenosového řetězce.

Na základě poznatků získaných v teoretické části bylo navrženo a sestaveno obvodové zapojení. Ve fázi odladování se jednalo o realizaci na nepájivém kontaktním poli. Jádrem celého zapojení je mikroprocesor Atmel ATmega 16A, který generuje požadovanou posloupnost. Po průchodu vygenerovaného binárního signálu přidruženým obvodovým zapojením kanálu s aditivním šumem je vyhodnocována chybovost přenosu. Přípravek umožňuje měnit generovanou posloupnost, rychlost přenosu, dobu přenosu a umožňuje volbu signálové cesty. Výsledky jednotlivých přenosů jsou vypisovány na dvouřádkový LCD. Po pečlivém otestování všech funkčních bloků tohoto přípravku bylo přistoupeno k návrhu DPS, která byla následně vyrobena ve dvou provedeních (prototypová a zákazková výroba). Pro konstrukci laboratorního přípravku byla využita zakázkově vyrobená DPS. Po úspěšném sestavení a oživení přípravku bylo provedeno měření, jehož cílem bylo ověřit přesnost laboratorního přípravku ve srovnání s vypočtenými hodnotami. Měřením bylo zjištěno, že hodnoty chybovosti naměřené pomocí tohoto přípravku pro přímou signálovou cestu odpovídají hodnotám teoretických výpočtů v rozsahu $0,4 - 2,2 V_{\text{RMS}}$. Při přímém srovnání tohoto laboratorního přípravku a přípravku, který byl dosud používán [5], je patrný výrazný nárůst přesnosti v celém rozsahu zadané efektivní hodnoty šumu. Při hodnotě $200 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ a rychlosti přenosu 12 kbit/s klesla relativní odchylka měření z hodnoty $+ 49 \%$ na hodnotu $+ 27 \%$. V rozsahu $0,6 - 2,2 V_{\text{RMS}}$ dosahuje sestrojený laboratorní přípravek maximální relativní chyby $+ 2,29 \%$. Přípravek dosavadní [5] dosahuje v tomto rozsahu maximální relativní odchylky -9% . Z výsledků měření lze konstatovat, že přesnost přípravku je pro demonstraci metod snižování pravděpodobnosti velmi dobrá. Při požadavku na vyšší přesnost zařízení by musel být návrh zařízení optimalizován pro přenos vysokofrekvenčního signálu. Domnívám se, že právě absence vyšších frekvencí u vyfiltrovaného šumu se podstatnou měrou podílí na vzniklých relativních odchylkách měření.

LITERATURA

- [1] Analog Devices *ADG201A/ADG202A* Analog Devices [datasheet]. 2011/02 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG201A-EP.pdf>>.
- [2] ASIX *Referenční příručka: ASIX Presto*. ASIX [online]. 2015/01 [cit. 2017-12-03]. Dostupné z URL: <https://www.asix.cz/download/programmers/presto_cz.pdf>.
- [3] Atmel *ATmega16A*. Atmel [Datasheet]. 2014/07 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-8154-8-bit-AVR-ATmega16A_Datasheet.pdf>.
- [4] CALVERT, John B. *Sample and Hold* Electronics Index [online]. 2002/0730 [cit. 2018-04-15]. Dostupné z URL: <<https://mysite.du.edu/~etuttle/electron/elect53.htm/>>.
- [5] DVOŘÁK, Petr *Přizpůsobený filtr* Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.
- [6] ČÍŽ, Radim *Principy modulací a přenosu sdělovacích signálů pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. 1. vyd.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 140 s. ISBN 978-80-214-5117-9.
- [7] ČÍŽ, Radim. *Teorie sdělování - Metody snižující pravděpodobnost chybného příjmu*. [laboratorní cvičení] Brno: elektronické skriptum FEKT VUT, 2016.
- [8] ČÍŽ, Radim. *Teorie sdělování - Pravděpodobnost chybného příjmu při přenosu v základním pásmu, parametry AM signálů*. [cvičení odborného základu] Brno: elektronické skriptum FEKT VUT, 2016.
- [9] ČÍŽ, Radim. *Teorie sdělování - Přizpůsobený filtr*. [počítačové cvičení] Brno: elektronické skriptum FEKT VUT, 2016.
- [10] ČÍŽ, Radim. *Teorie sdělování - Působení šumu v komunikačních systémech*. [přednáška] Brno: elektronické skriptum FEKT VUT, 2016.
- [11] ČOŽÍK, Ondřej. *Použití blokovacích kondenzátorů při návrhu DPS*. Slaboproudý obzor. [online]. 15.3.2013 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z URL: <<http://www.slaboproudobyobzor.cz/files/20130308.pdf>>.

- [12] DOBEŠ, Josef a Václav ŽALUD. *Moderní radiotechnika*. Praha, BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-132-2.
- [13] *Everbouquet MC16021E8-SERIES*. Everbouquet International CO., LTD. [Datasheet]. 1992/04/21 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z URL: <http://www.farnell.com/datasheets/20805.pdf?_ga=2.58538218.1950952596.1512990170-1885427065.1512380499&_gac=1.249834930.1512402607.EAIaIQobChMIyJmkwLXw1wIVCDwbCh0hmwxtEAAAYASAAEgK8XfD_BwE>.
- [14] FLEURY, Peter. *LCD library*. AVR-GCC Libraries [online]. 2015 [cit. 2017-12-02]. Dostupné z URL: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/doxygen/avr-gcc-libraries/group__pfleury__lcd.html>.
- [15] FRANEKOVÁ, Mária. *Modelovanie komunikačných systémov v prostredí Matlab, Simulink a Communications Toolbox*, 1. vyd. Žilina: Edis, 2003, 130 s. ISBN 80-8070-027-3.
- [16] *Agilent 33220A* Agilent Technologies [Datasheet]. 2003/02/01 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z URL: <http://centrum.feld.cvut.cz/?download=_/download/pristroje/agilent-33220a-en.pdf>.
- [17] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVR - ATmega16*. Praha: BEN, 2006. 320 s. ISBN 80-7300-174-8.
- [18] NASTASE, Adrian S. *Design a Bipolar to Unipolar Converter to Drive an ADC*. Mastering Electronics Design [online]. 2010/10 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z URL: <<https://masteringelectronicsdesign.com/design-a-bipolar-to-unipolar-converter/>>.
- [19] NASTASE, Adrian S. *Design a Unipolar to Bipolar Converter for a Unipolar Voltage Output DAC*. Mastering Electronics Design [online]. 2011/07 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z URL: <<https://masteringelectronicsdesign.com/design-a-unipolar-to-bipolar-converter-for-a-unipolar-voltage-output-dac/>>.
- [20] PETRŽELA, Jiří. *Teorie elektronických obvodů - Analýza šumu v elektronických obvodech*. [přednáška] Brno: elektronické skriptum FEKT VUT, 2015.
- [21] PROAKIS, John G. *Digital communications. 4th ed.* Boston: McGraw-Hill, 2001. ISBN 0071181830.
- [22] SHANNON, Claude Elwood a Warren WEAVER. *The mathematical theory of communication*. Chicago: University of Illinois Press, 1998. ISBN 0-252-72548-4.

- [23] SNIGELEN. *Software debouncing of buttons*. AVRFREAKS [online]. 2015/02 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z URL: <https://www.avrfreaks.net/sites/default/files/forum_attachments/debounce.pdf>.
- [24] STMicroelectronics *LM7805*. STMicroelectronics [Datasheet]. 2016/11 [cit. 2017-11-11]. Dostupné z URL: <<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/41/4f/b3/b0/12/d4/47/88/CD00000444.pdf/files/CD00000444.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000444.pdf>>.
- [25] Texas Instruments *LF398N*. Texas Instruments [Datasheet]. 2015/11 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf398-n.pdf>>.
- [26] Texas Instruments *NE5532*. Texas Instruments [Datasheet]. 2015/01 [cit. 2017-12-01]. Dostupné z URL: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf>>.
- [27] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR - Programování v jazyce C: popis a práce ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR C*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 8073001020.
- [28] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 80-86056-47-3.

SEZNAM ZKRATEK

AVR	Označení rodiny 8bitových mikroprocesorů značky Atmel
AWGN	Aditivní bílý Gaussův šum
A/D(ADC)	Analogově digitální převodník
BER	Poměr chybně přijatých bitů vůči celkovému počtu přijatých bitů
DIL	Dvouřadé pouzdro
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Elektronicky vymazatelná paměť pouze pro čtení
ISP	Možnost programování čipu v rámci obvodového zapojení
LCD	Displej z tekutých krystalů
LED	Dioda emitující světlo
MISO	Master In Slave Out - sériová linka od AVR k PC
MOSI	Master Out Slave In - sériová linka od PC k AVR
NRZ	Kódování bez návratu k nule
OZ	Operační zesilovač
RZ	Kódování s návratem k nule
SMD	Součástky určené pro povrchovou montáž
SNR	Poměr užitečného signálu vůči šumu
SRAM	Statická paměť
THT	Součástky s drátovými vývody

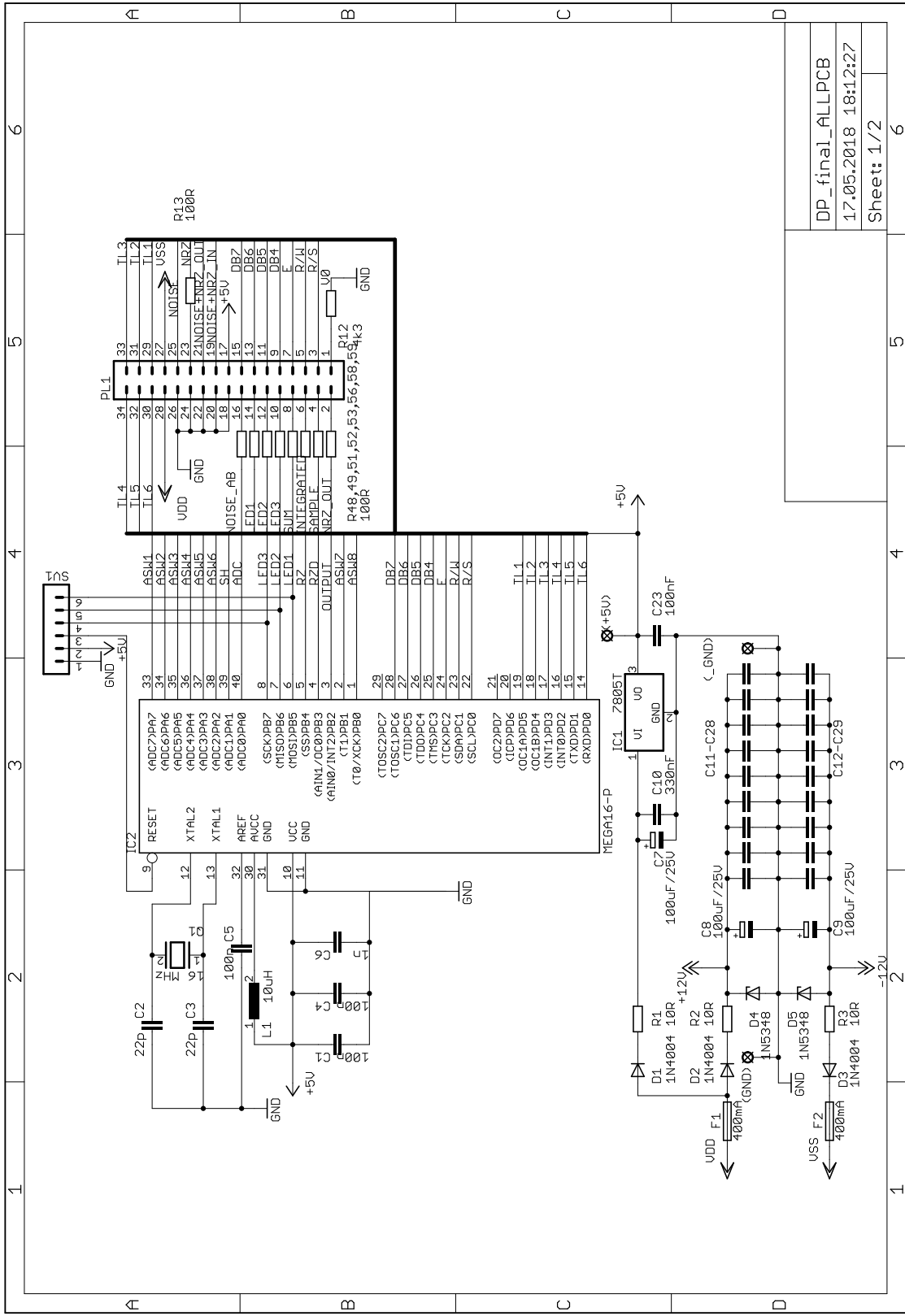
SEZNAM PŘÍLOH

A Seznam použitých součástí	66
B Schémata zapojení funkčních bloků	67
C Podklady pro výrobu a osazení DPS	70
D Výkres vrtacích otvorů, potisk přípravku	76
E Vypracovaná laboratorní úloha	78
F Obsah přiloženého CD	86

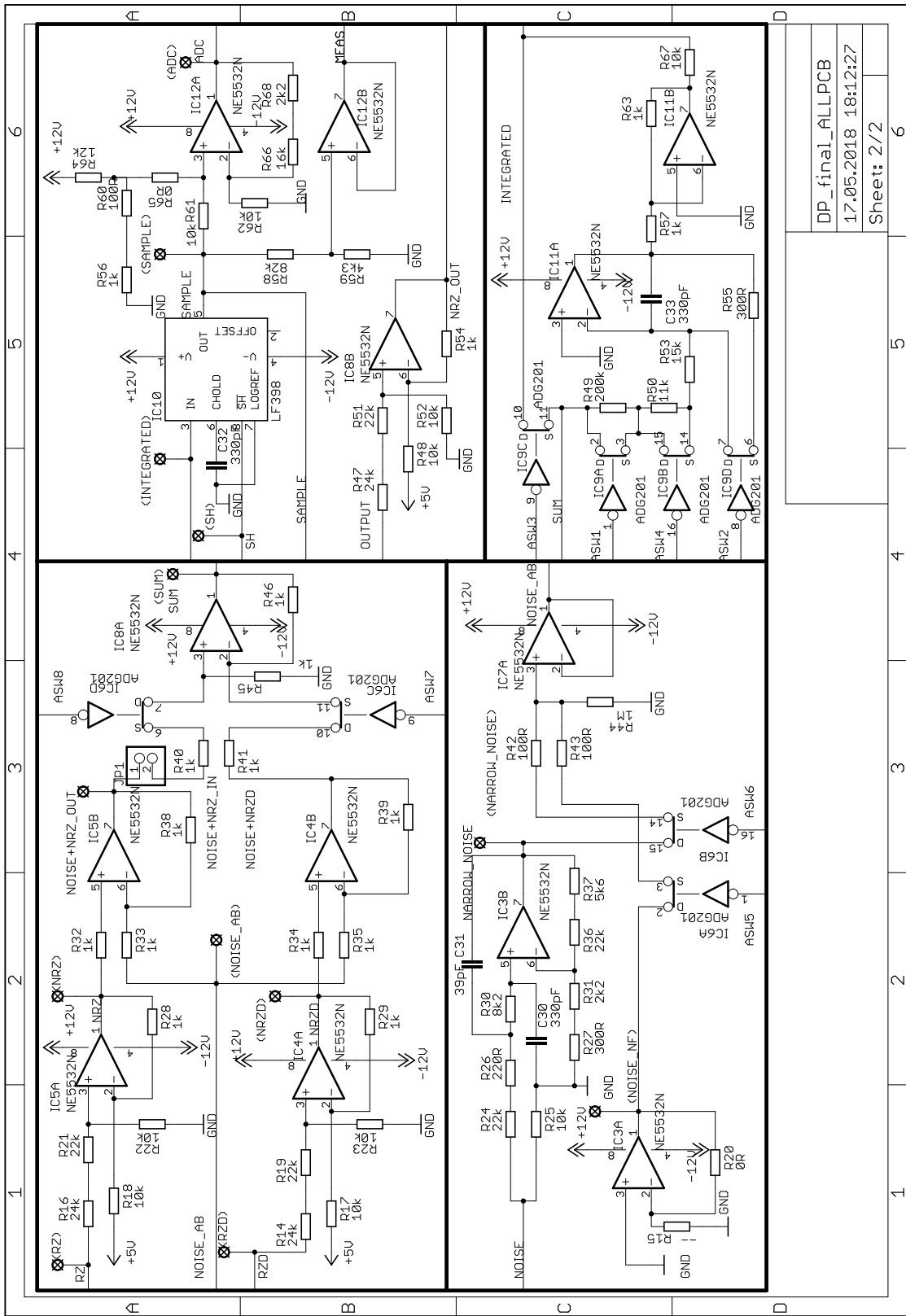
A SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

Ovládací panel a krabíčka			
počet kusů	název součástky	popis	označení ve schématu
1x	36 pinový konektor	PL1	
6x	červené tlačítko	S1,S2,S3,S4,S5,S6	
1x	displej	2 řádkový alfanumerický displej	MC16021-E8
6x	bílá měřicí zdířka		
1x	červená napájecí zdířka		
1x	modrá napájecí zdířka		
5x	zelená napájecí zdířka		
2x	konektor samořezný		
20cm	ploché 34 žilový kabel		

Deska zpracující signál			
počet kusů	název součástky	popis	označení ve schématu
1x	36 pinový konektor		PL1
1x	6 pinový konektor		SV1
1x	propojka		JP1
2x	držák pojistky		F1,F2
16x	měřicí bod		MCS10B
2x	R1206 0R 1%	rezistor	R20, R65
3x	THT 0411/15 10R	rezistor výkonový (2W)	R1, R2, R3
12x	R1206 100R 1%	rezistor	R4, R5, R6, R7, R8, R9, R10, R11, R13, R42, R43, R60
1x	R1206 220R 1%	rezistor	R26
2x	R1206 300R 1%	rezistor	R27,R55
16x	R1206 1k 1%	rezistor	R28, R29, R32, R33, R34, R35, R38, R39, R40, R41, R45, R46, R54, R56, R57, R63
2x	R1206 2k2 1%	rezistor	R31, R68
2x	R1206 4k3 1%	rezistor	R12, R59
1x	R1206 5k6 1%	rezistor	R37
1x	R1206 8k2 1%	rezistor	R30
10x	R1206 10k 1%	rezistor	R17, R18, R22, R23, R25, R48, R52, R61, R62, R67
1x	R1206 11k 1%	rezistor	R50
1x	R1206 12k 1%	rezistor	R64
1x	R1206 15k 1%	rezistor	R53
1x	R1206 16k 1%	rezistor	R66
5x	R1206 22k 1%	rezistor	R19, R21, R24, R36, R51
3x	R1206 24k 1%	rezistor	R14, R16, R47
1x	R1206 82k 1%	rezistor	R58
1x	R1206 200k 1%	rezistor	R49
1x	R1206 1M 1%	rezistor	R44
1x	L1206 10uH	cívka	L1
2x	C1206 22p	kondenzátor keramický	C2, C3
1x	C1206 39pF	kondenzátor keramický	C31
3x	C1206 330pF	kondenzátor keramický	C30, C32, C33
22x	C1206 100nF	kondenzátor keramický	C1, C4, C5,C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28, C29
1x	C1206 330nF	kondenzátor keramický	C10
3x	5,6 mm, 100uF/25V	kondenzátor elektrolytický	C7, C8, C9
1x	XTAL 16 MHz	krystalový rezonátor	Q1
3x	1N4007	dioda univerzální	D1, D2, D3
2x	1N5348	Zenerova dioda (11 V)	D4, D5
1x	7805T	lineární stabilizátor	IC1
2x	ADG201AKNZ	analogový spínač	IC6, IC9
1x	LF398N	vzorkovací obvod	IC10
1x	MEGA16-P	mikroprocesor	IC2
7x	NE5532N	integrovaný obvod s 2 OZ	IC3, IC4, IC5, IC7, IC8, IC11, IC12

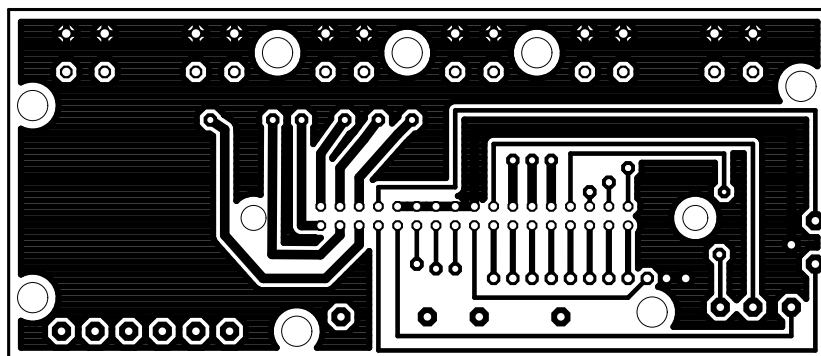


Obr. B.2: Schéma zapojení mikroprocesoru, napájecího zdroje a konektoru.

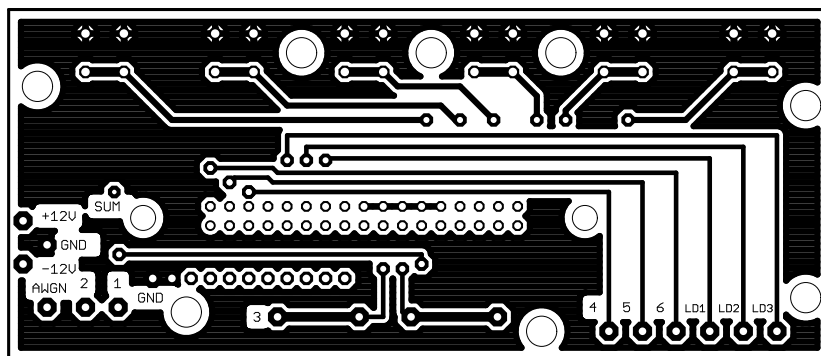


Obr. B.3: Schéma zapojení obvodů zpracujících signál.

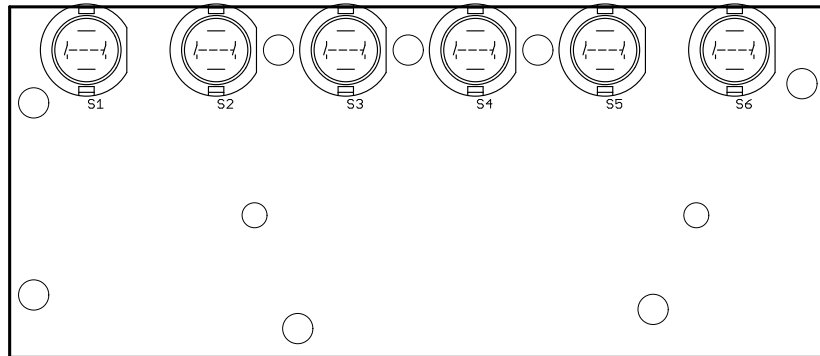
C PODKLADY PRO VÝROBU A OSAZENÍ DPS



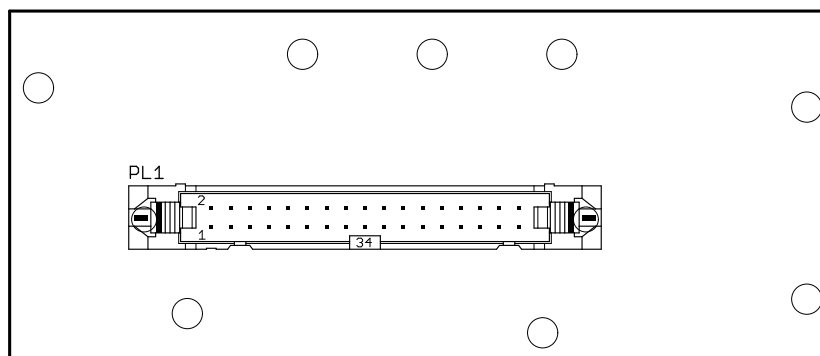
Obr. C.1: Předloha horní strany DPS ovládacího panelu.



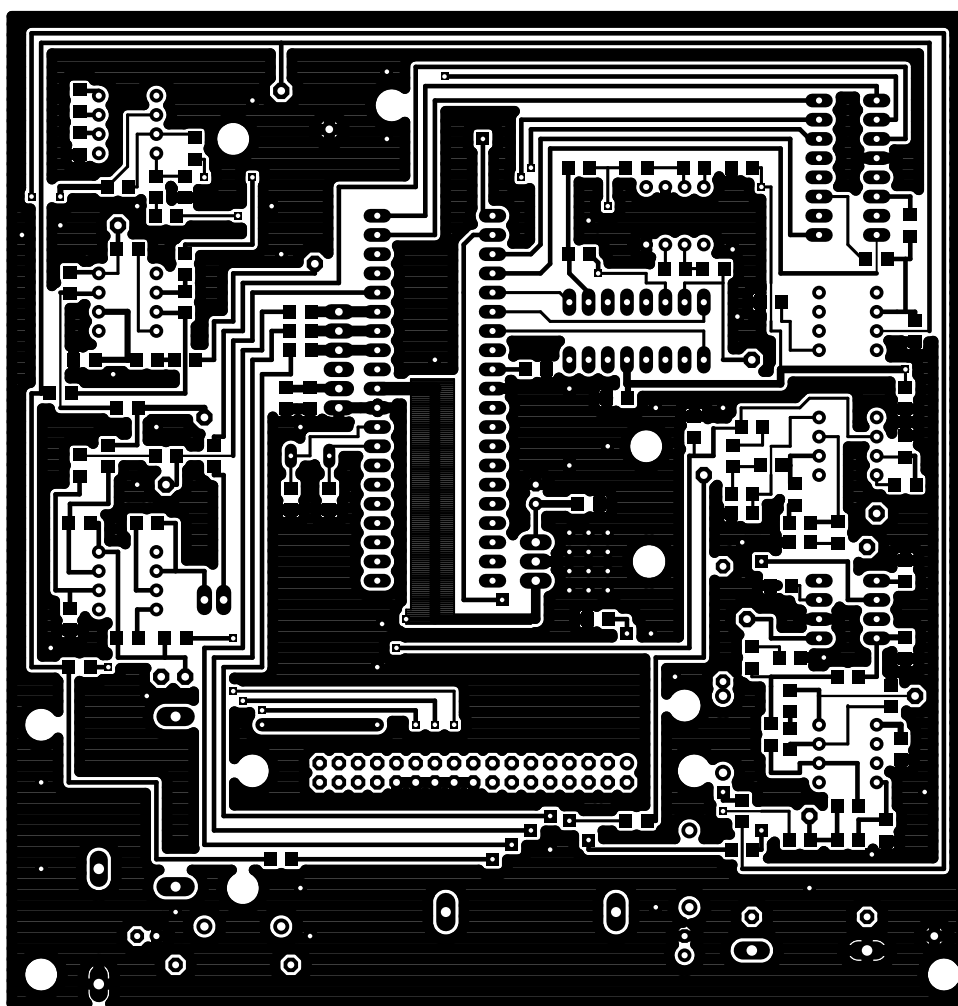
Obr. C.2: Předloha dolní strany DPS ovládacího panelu.



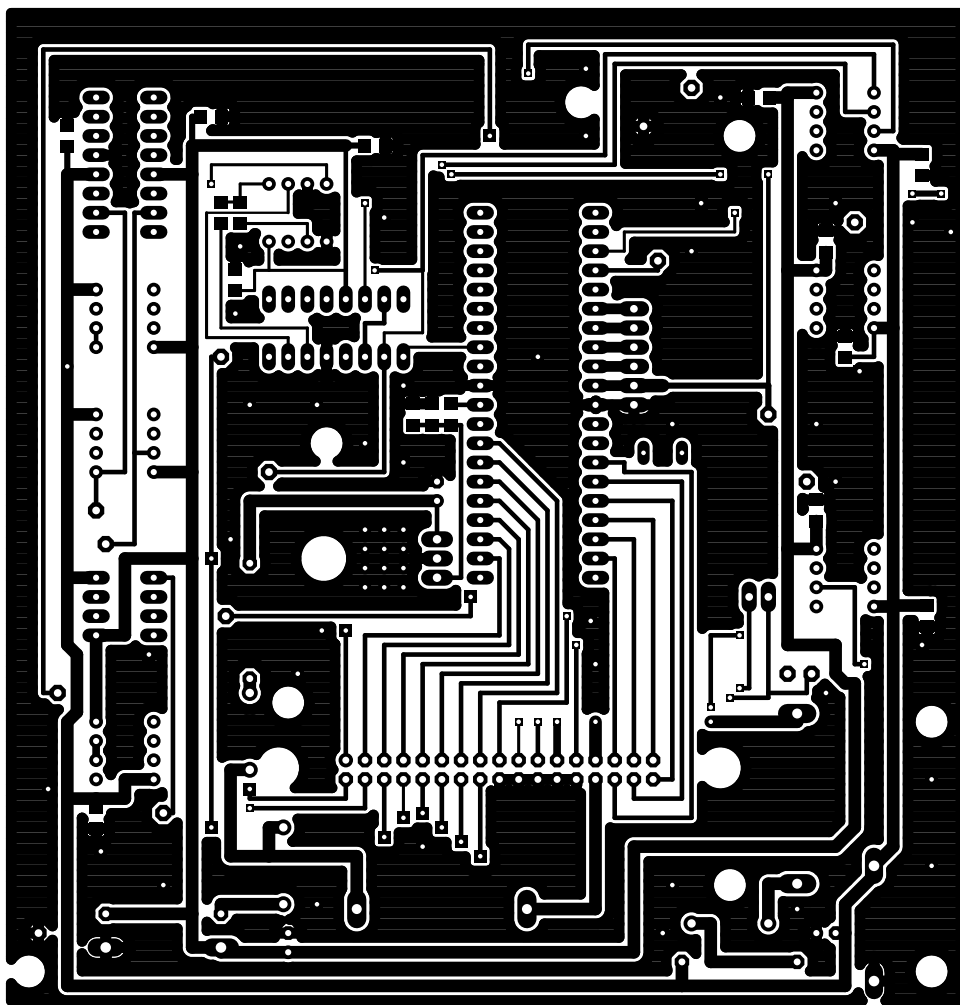
Obr. C.3: Osazovací plán horní strany DPS ovládacího panelu.



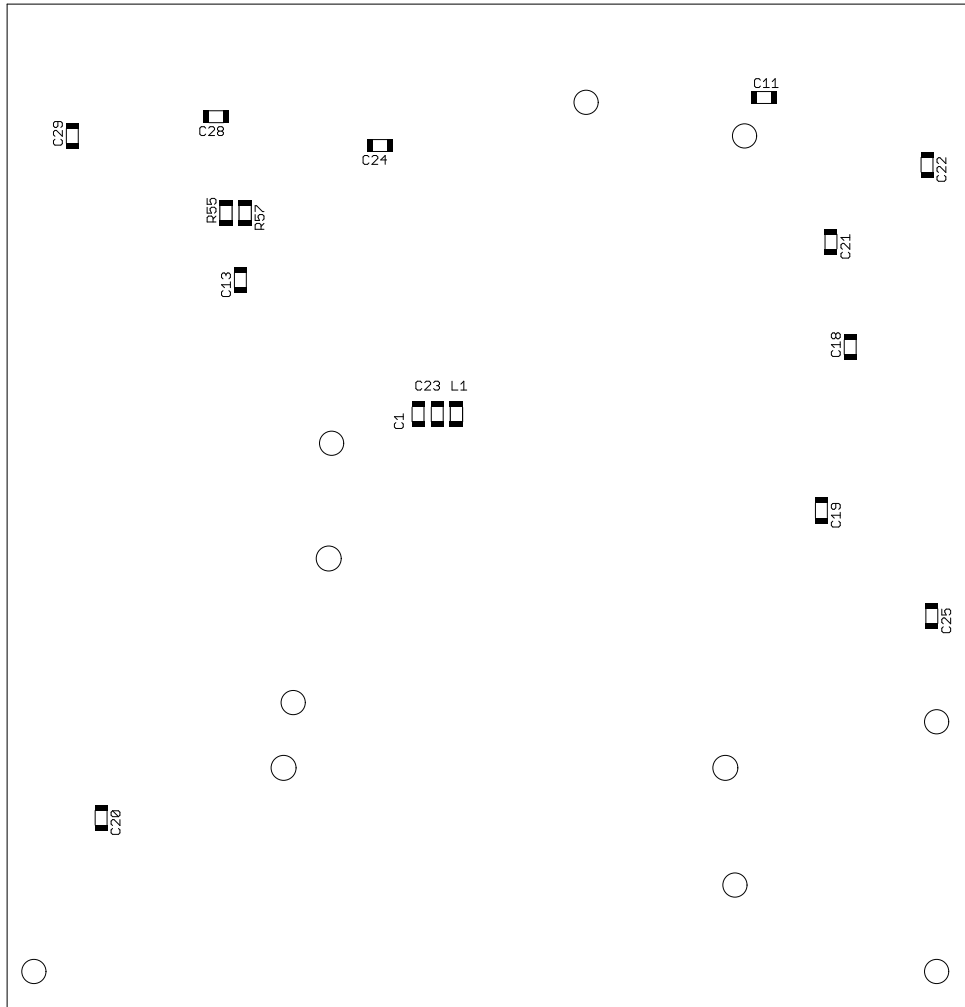
Obr. C.4: Osazovací plán dolní strany DPS ovládacího panelu.



Obr. C.5: Předloha horní strany DPS pro zpracování signálu.

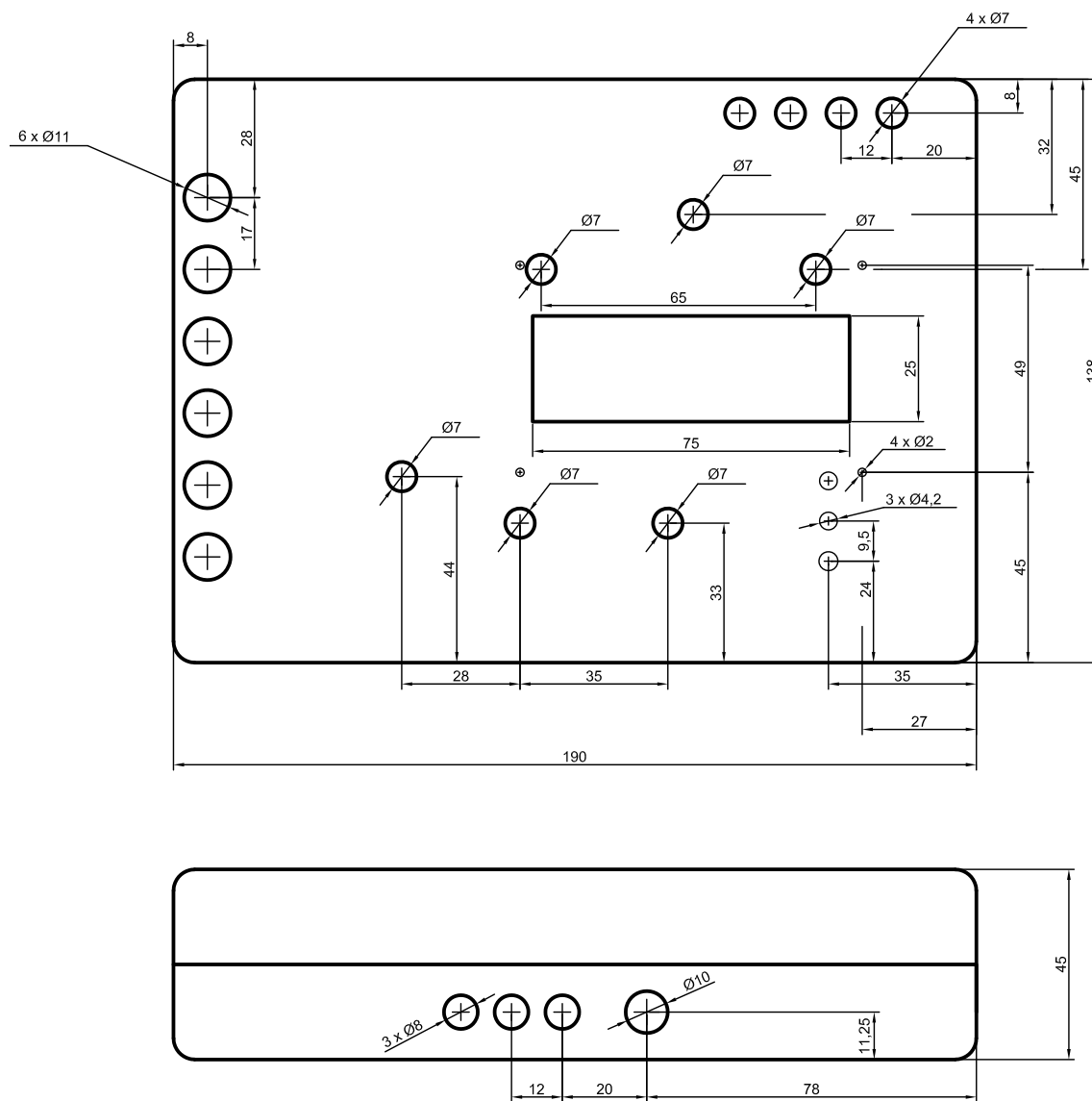


Obr. C.6: Předloha dolní strany DPS pro zpracování signálu.

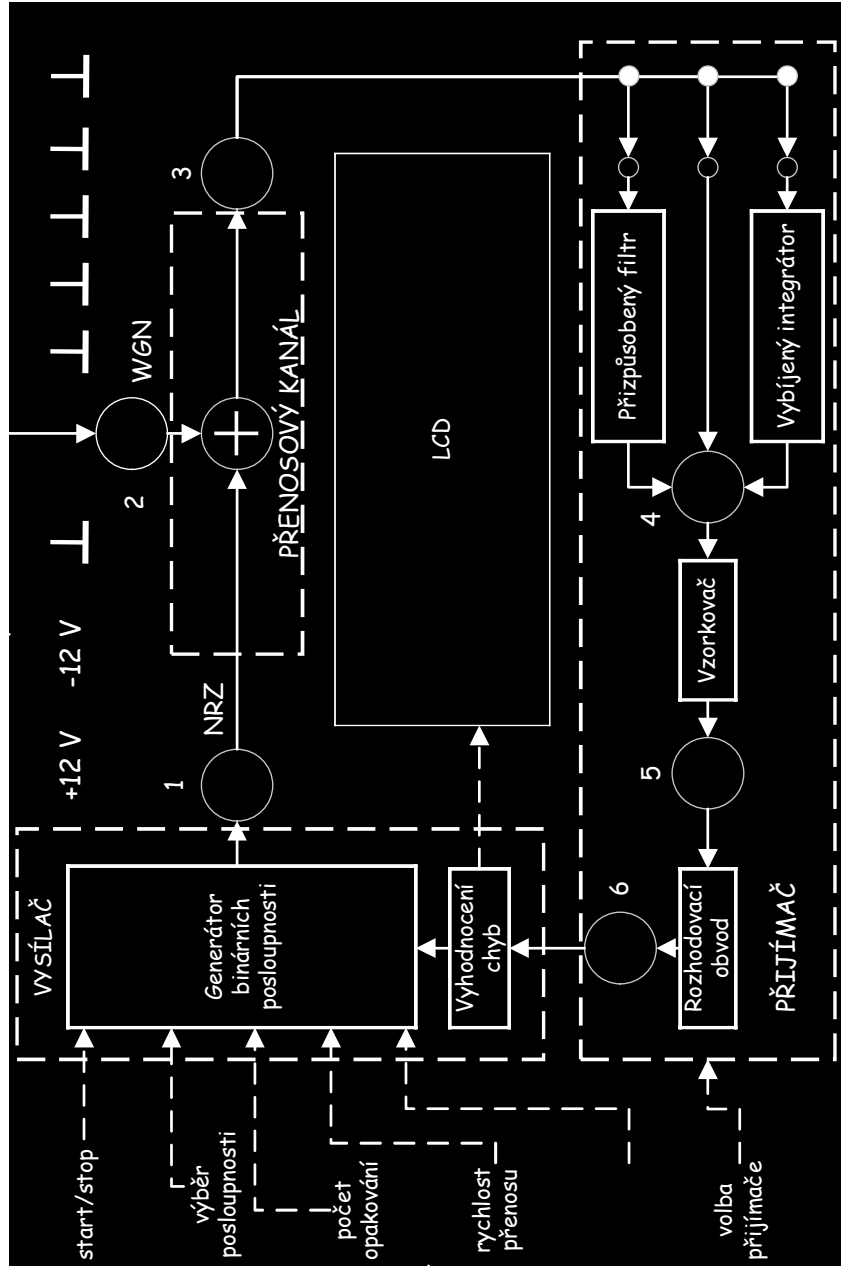


Obr. C.8: Osazovací plán dolní strany DPS pro zpracování signálu.

D VÝKRES VRTACÍCH OTVORŮ, POTISK PŘÍPRAVKU



Obr. D.1: Výkres vrtacích otvorů ovládacího panelu, horní a čelní pohled.



Obr. D.2: Potisk laboratorního přípravku.

E VYPRACOVANÁ LABORATORNÍ ÚLOHA

Teorie sdělování – laboratorní cvičení č. 1

1. Metody snižující pravděpodobnost chybného příjmu

Jména a příjmení:

Datum:

Studijní obor:

Ročník:

Cíl úlohy

Praktické ověření závislosti bitové chybovosti na parametrech užitečného a rušivého signálu. Pochopení principů metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu (opakovaný přenos, korelační přijímač, přizpůsobený filtr).

Seznam přístrojů a pomůcek

- 1) funkční generátor Agilent 33220A
- 2) osciloskop Tektronix TDS 2002
- 3) laboratorní přípravek
- 4) propojovací kabely

Teoretický úvod

Pravděpodobnost chybného příjmu

Aditivně narušený signál $x(t)$ je popsán rovnicí:

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (1.1)$$

kde $s(t)$ je užitečná složka signálu a $n(t)$ je rušivá složka signálu.

V případě, že se hodnoty rušivého signálu řídí normálním (Gaussovým) rozdělením a přenosový signál nabývá hodnotu D_0 nebo D_1 (přičemž uvažujeme, že $D_0 < D_1$), potom pravděpodobnost P_{ch} chybného rozhodnutí o vyslaném signálu na základě porovnání přijatého signálu s rozhodovací hladinou h je:

$$P_{ch} = P(0) \cdot F_0 \left(-\frac{h - D_0}{\sigma} \right) + P(1) \cdot F_0 \left(\frac{h - D_1}{\sigma} \right), \quad (1.2)$$

kde $P(0)$... pravděpodobnost vyslání nuly,
 $P(1)$... pravděpodobnost vyslání jedničky,
 σ ... směrodatná odchylka (je rovna efektivní hodnotě šumu).
 F_0 ... normovaná distribuční funkce normálního rozdělení.

Za předpokladu, že $P(0) = P(1) = 0,5$ a rozhodovací hladina je optimální, $h_{opt} = (D_0 + D_1) / 2$, můžeme předchozí rovnici napsat ve tvaru:

$$P_{ch} = F_0 \left(\frac{D_0 - D_1}{2\sigma} \right). \quad (1.3)$$

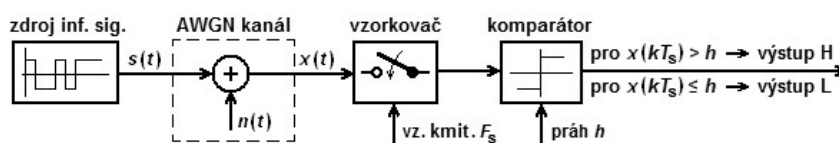
Bitová chybovost

Bitová chybovost BER (Bit Error Rate) zjištěná měřením na konkrétním systému vyjadřuje podíl chybných bitů N_E z celkového množství všech přenesených bitů N a nabývá hodnoty z intervalu $(0, 1)$.

$$BER = \frac{N_E}{N} = \frac{N_E}{R \cdot t}; [-] \quad (1.4)$$

Přenos binárního signálu

Binární signál je přenášen bez použití jakékoli metody snížení pravděpodobnosti chybného příjmu. Výsledná chybovost je tak závislá na efektivní hodnotě AWGN šumu.



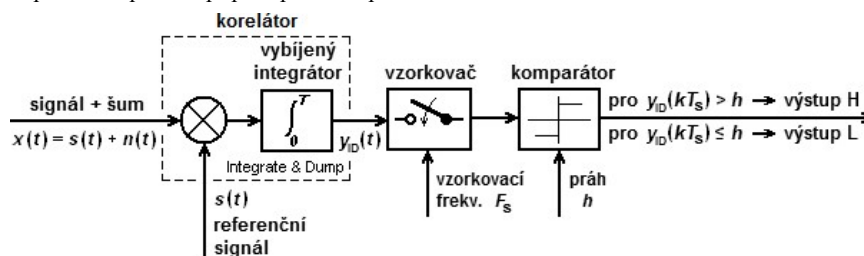
Obr. 1 Přenos binárního signálu v základním pásmu kanálem s AWGN

Opakovaný přenos

Jednoduchá metoda, kterou lze částečně snížit bitovou chybovost přenosu, spočívá v několikanásobném zopakování vysílaného signálového prvku. V přijímači jsou tyto signálové prvky porovnány a hodnota, která se vyskytuje nejčastěji je považována za platnou.

Korelační přijímač – vybíjený integrátor

Korelační přijímač pro obecný tvar užitečného signálu $s(t)$ je znázorněn na následujícím obrázku. Na svém vstupu má zařazen korelátor, který může být realizován analogovým násobičem a následujícím integrátorem. Na vstup korelátoru přichází po dobu $t = 0$ až $t = T$ celkový vstupní signál $x(t) = s(t) + n(t)$. Korelátor koreluje tento signál se známou replikou $s(t)$ užitečného vstupního signálu, která je uložena v paměti přijímače. Rozhodovací obvod porovnává výstup korelátoru $y(t)$ s rozhodovací úrovní h . Je-li $y(T) > h$ je na jeho výstupu impulz H v opačném případě potom impulz L .



Obr. 2 Korelační přijímač – vybíjený integrátor

Teorie sdělování – laboratorní cvičení č. 1

$$y(t) = \int_0^T [s(t) + n(t)]s(t) dt = \underbrace{\int_0^T s^2(t) dt}_{\text{maximální pro } t=T} + \underbrace{\int_0^T n(t)s(t) dt}_{=0 \text{ (nekorelováno)}}$$

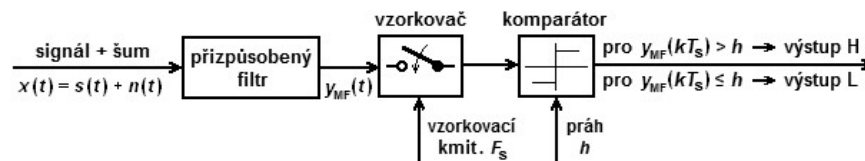
V případě bipolárního NRZ signálu lze korelační přijímač realizovat pouze integrátorem, který je pravidelně vybíjen na nulovou úroveň vždy před koncem periody T .

Přizpůsobený filtr

Původně se tato metoda používala v radiolokaci při zjišťování přítomnosti či nepřítomnosti užitečného signálu. Jeho vlastnosti zvláště vyniknou v případě, kdy užitečný signál, jehož přítomnost detekujeme, má složitý tvar.

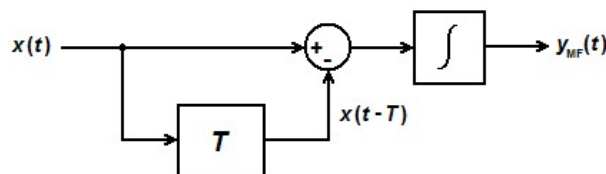
Aby tato metoda mohla fungovat, musí být splněny čtyři následující podmínky:

1. Známe průběh užitečného signálu $s(t)$ a tento signál má konečnou energii E a konečnou dobu trvání T .
2. Rušivý signál se přičítá k signálu užitečnému a jedná se o bílý šum (např. AWGN).
3. Kritériem optimality příjmu je poměr okamžitého výkonu užitečné složky signálu v okamžiku $t_0 \geq T$ ke střednímu výkonu rušivé složky na výstupu.
4. Příjem je realizován lineární operací.



Obr. 3 Přijímač s přizpůsobeným filtrem

Na obr. 3 je nakreslen přizpůsobený filtr pro pravoúhlý impulz. V okamžicích, které jsou celočíselnými násobky T , jsou nejlepší podmínky pro zjištění přítomnosti či nepřítomnosti impulzu. Impulzová charakteristika systému je obdélníková. Odezva na obdélníkový impulz šířky T je trojúhelníková.



Obr. 4 Přizpůsobený filtr pro pravoúhlý impulz

Zadání

- 1) S pomocí osciloskopu určete přenosovou rychlost R1, R2 a R3 signálu generovaného laboratorním přípravkem.
- 2) Pro zadané efektivní hodnoty aditivního rušivého signálu (AWGN) vypočítejte pravděpodobnosti chybného příjmu P_{ch} .
- 3) Změřte skutečné bitové chybovosti BER .
- 4) Porovnejte odpovídající vypočítané a změřené hodnoty, pokuste se vysvětlit případné odchylky.
- 5) Změřte bitovou chybovost BER pro vícenásobný počet opakování vysílaných bitů.
- 6) Změřte bitovou chybovost BER při zapojeném korelačním přijímači (vybíjeném integrátoru). Změřte časové průběhy před a za blokem korelačního přijímače (vybíjeného integrátoru) v případě, kdy užitečný signál bude sčítán s šumem efektivní hodnoty 1 V.
- 7) Změřte bitovou chybovost BER při zapojeném přizpůsobeném filtru. Změřte časové průběhy před a za blokem přizpůsobeného filtru v případě, kdy užitečný signál bude sčítán s šumem efektivní hodnoty 1 V.
- 8) Porovnejte naměřené hodnoty BER a formulujte závěr týkající se účinnosti metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu.

Postup měření

- 1) Připojte přípravek k napájecímu zdroji a zapněte jej. Nastavte počet opakování vysílaných bitů na 1x a bitovou posloupnost na AAAA_h (tlačítka **počet opakování** a **výběr posloupnosti**). Pro všechny tři rychlosti R1, R2 a R3 změřte pomocí osciloskopu doby trvání signálových prvků na svorce 1 a vypočítejte modulační a přenosové rychlosti (zaokrouhlete na jednotky kBd resp. kbit/s). Cyklické vysílání nastavené posloupnosti zahájíte stiskem tlačítka **start/stop**. Nastavení doby vysílání je možné změnit stiskem tlačítka **doba přenosu**.
- 2) Zadanou bitovou posloupnost převedte z hexadecimálního do binárního tvaru a určete pravděpodobnosti $P(0)$ a $P(1)$. Pomocí osciloskopu změřte úrovně D_0 a D_1 na svorce 1, určete optimální rozhodovací úroveň h_{opt} a vypočítejte pravděpodobnosti chybného příjmu pro zadané efektivní hodnoty šumu σ .
- 3) Na přípravku nastavte rychlost R1, počet opakování vysílaných bitů 1x, bitovou posloupnost A54E_h a přímou cestu stiskem tlačítka **volba přijímače** (indikováno prostřední červenou LED). BNC konektor přípravku propojte se signálovým generátorem. (stejnoseměrná složka šumu musí být nulová -- DC offset). Pro danou efektivní hodnotu šumu, změřte počet chybně přijatých bitů v 60sekundové přenosové relaci a vypočítejte odpovídající bitovou chybovost BER .
- 4) Porovnejte odpovídající vypočítané a změřené hodnoty, pokuste se vysvětlit případné odchylky.

Teorie sdělování – laboratorní cvičení č. 1

- 5) Nastavení přípravku zachovejte stejné jako v bodě 3, pouze počet opakování vysílaných bitů změňte nejdříve na hodnotu 5x a potom na 9x (tlačítko **počet opakování**). Pro obě hodnoty počtu opakování a zadané efektivní hodnoty šumu změřte počet chybně přijatých bitů a vypočítejte odpovídající bitové chybovosti přenosu. Pozor: Jelikož vysílané bity jsou opakovány, je celkový počet bitů N pětkrát resp. devětkrát menší než při měření v bodě 3, počet vysílaných bitů můžete zvýšit stiskem tlačítka **doba přenosu**.
- 6) Přípravek nastavte podle bodu 3, stiskem tlačítka **volba přijímače** zvolte vybíjený integrátor. Na funkčním generátoru nastavte efektivní hodnotu šumu na 1 V. První měřicí kanál osciloskopu připojte na svorku 1, druhý na svorku 4. Stanovte počet chybně přijatých bitů. Zobrazené průběhy obou kanálů zakreslete.
- 7) Nastavení přípravku ponechte opět podle bodu 3, stiskem tlačítka **volba přijímače** zvolte přizpůsobený filtr. Na funkčním generátoru nastavte efektivní hodnotu šumu na 1 V. První měřicí kanál osciloskopu připojte na svorku 1, druhý na svorku 4. Stanovte počet chybně přijatých bitů. Zobrazené průběhy obou kanálů zakreslete.
- 8) Porovnejte naměřené hodnoty BER a formulujte závěr týkající se účinnosti metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu.

Vypracování

- 1) Přenosová rychlost.

	<i>doba trvání symbolu T_s</i>	<i>modulační rychlost M</i>	<i>přenosová rychlost R</i>
R1	1 ms	1 kBd	1 kbit/s
R2	125 μ s	8 kBd	8 kbit/s
R3	83,3 μ s	12 kBd	12 kbit/s

- 2), 3), 4) Pravděpodobnost chybného příjmu, bitová chybovost.

Posloupnost: $A54E_n = 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0$ _b

$$P(0) = 0,5$$

$$P(1) = 0,5$$

$$D_0 = +0,5\text{ V}$$

$$D_1 = -0,5\text{ V}$$

$$h_{opt} = (0,5 - 0,5) / 2 = 0\text{ V}$$

$$P_{ch} = F_0\left(\frac{D_0 - D_1}{2\sigma}\right) = F_0(-2,5) = 0,0062097 \text{ [-]}$$

$$BER_{(1,2\text{ V})} = N_E / (R * t) = 20053\text{ b} / (1000\text{ b/s} * 60\text{ s}) = 0,33421 \text{ [-]}$$

Teorie sdělování – laboratorní cvičení č. 1

efektivní hodnota šumu σ [V]	pravděpodobnost chyb. příjmu P_{ch}	počet chyb N_E	bitová chybovost BER
0,2	0,00621	372	0,0062
0,4	0,10565	6 335	0,10558
0,6	0,20233	12 046	0,20076
0,8	0,26599	15 938	0,26563
1,0	0,30854	18 587	0,30978
1,2	0,33846	20 053	0,33421
1,4	0,36049	21 664	0,36106
1,6	0,37733	22 661	0,37768
1,8	0,39059	23 144	0,38573
2,0	0,40129	23 897	0,39828
2,2	0,41011	24 174	0,4029

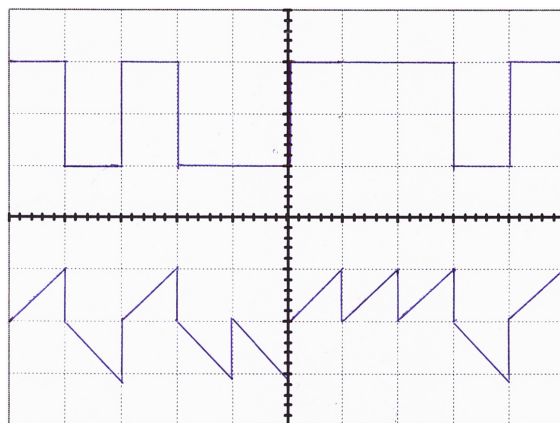
5) Bitová chybovost pro vícenásobný počet opakování vysílaných bitů:

σ [V]	opakování 3x		opakování 9x	
	N_E	BER	N_E	BER
0,4	1816	0,0303	0	0,0000
1,2	15789	0,2632	8488	0,1415
2	20783	0,3464	15227	0,2538

6) Bitová chybovost při zapojeném korelačním přijímači.

σ [V]	N_E	BER
2,2	0	0

S aditivním bílým šumem efektivní hodnoty 1 V.



Vertikální rozlišení:
CH1: 500 mV/dílek
CH2: 5 V/dílek

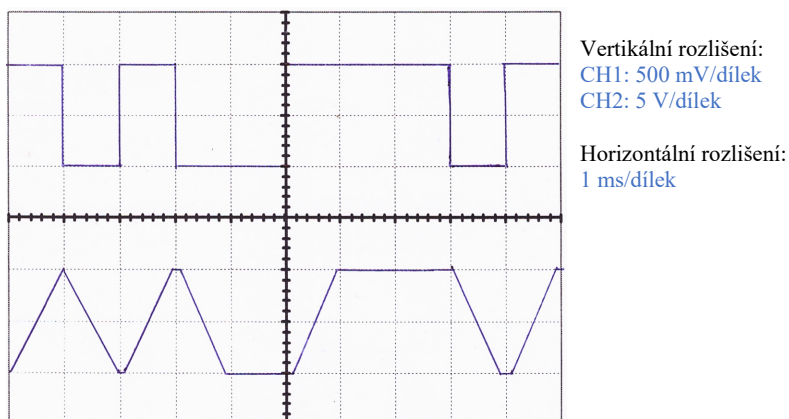
Horizontální rozlišení:
1 ms/dílek

Teorie sdělování – laboratorní cvičení č. 1

6) Bitová chybovost při zapojeném přizpůsobeném filtru.

σ [V]	N_E	BER
2,2	80	0,00133

S aditivním bílým šumem efektivní hodnoty 1 V.



8) Porovnání účinnosti metod snižujících pravděpodobnost chybného příjmu.

Při použití nejtriviálnější metody, opakovaného přenosu, dochází při zvýšení počtu opakování k poklesu chybovosti. Tato závislost je nepřímo úměrná. Výrazným negativem této metody je však razantní pokles přenosové rychlosti.

Metoda korelačního přijímače a přizpůsobeného filtru je velice efektivní, hodnota chybovosti klesá téměř na nulovou hodnotu při zachování zadané přenosové rychlosti.

Teorie sčítování – laboratorní cvičení č. 1 – Tabulka distribuční funkce normovaného normálního rozdělení

z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	5.0000e-001	4.9601e-001	4.9202e-001	4.8803e-001	4.8404e-001	4.8006e-001	4.7608e-001	4.7210e-001	4.6812e-001	4.6414e-001
-0.1	4.6017e-001	4.5620e-001	4.5224e-001	4.4828e-001	4.4433e-001	4.4038e-001	4.3644e-001	4.3251e-001	4.2858e-001	4.2465e-001
-0.2	4.2074e-001	4.1683e-001	4.1294e-001	4.0905e-001	4.0518e-001	4.0132e-001	3.9748e-001	3.9365e-001	3.8982e-001	3.8599e-001
-0.3	3.8209e-001	3.7829e-001	3.7448e-001	3.7070e-001	3.6693e-001	3.6317e-001	3.5942e-001	3.5569e-001	3.5197e-001	3.4827e-001
-0.4	3.4458e-001	3.4090e-001	3.3724e-001	3.3360e-001	3.2998e-001	3.2638e-001	3.2279e-001	3.1922e-001	3.1567e-001	3.1214e-001
-0.5	3.0854e-001	3.0503e-001	3.0153e-001	2.9806e-001	2.9460e-001	2.9116e-001	2.8774e-001	2.8433e-001	2.8095e-001	2.7760e-001
-0.6	2.7425e-001	2.7083e-001	2.6738e-001	2.6403e-001	2.6068e-001	2.5735e-001	2.5403e-001	2.5072e-001	2.4742e-001	2.4413e-001
-0.7	2.4189e-001	2.3865e-001	2.3547e-001	2.3234e-001	2.2926e-001	2.2623e-001	2.2325e-001	2.2031e-001	2.1742e-001	2.1458e-001
-0.8	2.1189e-001	2.0897e-001	2.0611e-001	2.0330e-001	2.0054e-001	1.9783e-001	1.9517e-001	1.9256e-001	1.8999e-001	1.8747e-001
-0.9	1.8406e-001	1.8141e-001	1.7879e-001	1.7620e-001	1.7364e-001	1.7111e-001	1.6861e-001	1.6614e-001	1.6370e-001	1.6129e-001
-1.0	1.5866e-001	1.5625e-001	1.5386e-001	1.5151e-001	1.4917e-001	1.4686e-001	1.4457e-001	1.4231e-001	1.4007e-001	1.3786e-001
-1.1	1.3567e-001	1.3350e-001	1.3136e-001	1.2924e-001	1.2714e-001	1.2507e-001	1.2302e-001	1.2100e-001	1.1900e-001	1.1702e-001
-1.2	1.1507e-001	1.1314e-001	1.1123e-001	1.0935e-001	1.0749e-001	1.0565e-001	1.0383e-001	1.0204e-001	1.0027e-001	9.8525e-002
-1.3	9.6800e-002	9.5098e-002	9.3418e-002	9.1759e-002	9.0129e-002	8.8528e-002	8.6945e-002	8.5380e-002	8.3833e-002	8.2305e-002
-1.4	8.0757e-002	7.9270e-002	7.7804e-002	7.6359e-002	7.4934e-002	7.3529e-002	7.2145e-002	7.0781e-002	6.9437e-002	6.8112e-002
-1.5	6.6807e-002	6.5522e-002	6.4255e-002	6.3008e-002	6.1780e-002	6.0571e-002	5.9380e-002	5.8208e-002	5.7053e-002	5.5917e-002
-1.6	5.4799e-002	5.3699e-002	5.2616e-002	5.1551e-002	5.0503e-002	4.9471e-002	4.8457e-002	4.7460e-002	4.6479e-002	4.5514e-002
-1.7	4.4565e-002	4.3633e-002	4.2716e-002	4.1815e-002	4.0930e-002	4.0059e-002	3.9204e-002	3.8364e-002	3.7538e-002	3.6727e-002
-1.8	3.5930e-002	3.5148e-002	3.4380e-002	3.3625e-002	3.2884e-002	3.2157e-002	3.1443e-002	3.0742e-002	3.0054e-002	2.9379e-002
-1.9	2.8717e-002	2.8067e-002	2.7429e-002	2.6803e-002	2.6190e-002	2.5588e-002	2.4998e-002	2.4419e-002	2.3852e-002	2.3295e-002
-2.0	2.2750e-002	2.2216e-002	2.1692e-002	2.1176e-002	2.0679e-002	2.0192e-002	1.9725e-002	1.9278e-002	1.8850e-002	1.8439e-002
-2.1	1.7864e-002	1.7429e-002	1.7003e-002	1.6586e-002	1.6177e-002	1.5778e-002	1.5386e-002	1.5003e-002	1.4629e-002	1.4262e-002
-2.2	1.3903e-002	1.3553e-002	1.3209e-002	1.2874e-002	1.2545e-002	1.2224e-002	1.1911e-002	1.1604e-002	1.1304e-002	1.1011e-002
-2.3	1.0924e-002	1.0644e-002	1.0370e-002	1.0102e-002	9.8419e-003	9.5827e-003	9.3327e-003	9.0917e-003	8.8594e-003	8.6353e-003
-2.4	8.1975e-003	7.9763e-003	7.7603e-003	7.5494e-003	7.3436e-003	7.1428e-003	6.9469e-003	6.7557e-003	6.5689e-003	6.3872e-003
-2.5	6.2097e-003	6.0366e-003	5.8677e-003	5.7031e-003	5.5426e-003	5.3861e-003	5.2336e-003	5.0849e-003	4.9400e-003	4.7988e-003
-2.6	4.6612e-003	4.5271e-003	4.3955e-003	4.2692e-003	4.1453e-003	4.0246e-003	3.9070e-003	3.7926e-003	3.6811e-003	3.5729e-003
-2.7	3.4670e-003	3.3642e-003	3.2641e-003	3.1677e-003	3.0750e-003	2.9859e-003	2.8991e-003	2.8146e-003	2.7324e-003	2.6524e-003
-2.8	2.5551e-003	2.4771e-003	2.4012e-003	2.3274e-003	2.2557e-003	2.1860e-003	2.1182e-003	2.0524e-003	1.9884e-003	1.9252e-003
-2.9	1.8658e-003	1.8071e-003	1.7502e-003	1.6948e-003	1.6411e-003	1.5889e-003	1.5382e-003	1.4890e-003	1.4412e-003	1.3949e-003
-3.0	1.3499e-003	1.3062e-003	1.2639e-003	1.2228e-003	1.1829e-003	1.1442e-003	1.1067e-003	1.0703e-003	1.0350e-003	1.0008e-003
-3.1	9.6760e-004	9.3544e-004	9.0426e-004	8.7403e-004	8.4474e-004	8.1635e-004	7.8885e-004	7.6219e-004	7.3638e-004	7.1136e-004
-3.2	6.8714e-004	6.6367e-004	6.4095e-004	6.1895e-004	5.9765e-004	5.7703e-004	5.5706e-004	5.3774e-004	5.1904e-004	5.0094e-004
-3.3	4.8942e-004	4.6848e-004	4.4809e-004	4.2837e-004	4.0934e-004	3.9097e-004	3.7324e-004	3.5611e-004	3.3958e-004	3.2366e-004
-3.4	3.3693e-004	3.2481e-004	3.1311e-004	3.0179e-004	2.9086e-004	2.8029e-004	2.7009e-004	2.6023e-004	2.5071e-004	2.4151e-004
-3.5	2.3263e-004	2.2405e-004	2.1577e-004	2.0778e-004	2.0006e-004	1.9262e-004	1.8543e-004	1.7849e-004	1.7180e-004	1.6534e-004
-3.6	1.5911e-004	1.5310e-004	1.4730e-004	1.4171e-004	1.3632e-004	1.3112e-004	1.2611e-004	1.2128e-004	1.1662e-004	1.1213e-004
-3.7	1.0780e-004	1.0363e-004	9.9611e-005	9.5741e-005	9.2011e-005	8.8417e-005	8.4957e-005	8.1624e-005	7.8414e-005	7.5324e-005
-3.8	7.2348e-005	6.9483e-005	6.6726e-005	6.4072e-005	6.1517e-005	5.9059e-005	5.6694e-005	5.4418e-005	5.2228e-005	5.0122e-005
-3.9	4.8096e-005	4.6148e-005	4.4274e-005	4.2474e-005	4.0743e-005	3.9076e-005	3.7471e-005	3.5936e-005	3.4458e-005	3.3037e-005
-4.0	3.1671e-005	3.0359e-005	2.9099e-005	2.7883e-005	2.6722e-005	2.5609e-005	2.4536e-005	2.3507e-005	2.2519e-005	2.1569e-005
-4.1	2.0658e-005	1.9783e-005	1.8944e-005	1.8133e-005	1.7365e-005	1.6624e-005	1.5912e-005	1.5230e-005	1.4575e-005	1.3948e-005
-4.2	1.3344e-005	1.2769e-005	1.2215e-005	1.1685e-005	1.1176e-005	1.0689e-005	1.0221e-005	9.7736e-006	9.3447e-006	8.9337e-006
-4.3	8.5399e-006	8.1627e-006	7.8015e-006	7.4551e-006	7.1241e-006	6.8069e-006	6.5031e-006	6.2123e-006	5.9340e-006	5.6675e-006
-4.4	5.4129e-006	5.1665e-006	4.9350e-006	4.7117e-006	4.4979e-006	4.2935e-006	4.0980e-006	3.9110e-006	3.7322e-006	3.5612e-006
-4.5	3.3977e-006	3.2414e-006	3.0920e-006	2.9492e-006	2.8127e-006	2.6823e-006	2.5577e-006	2.4386e-006	2.3249e-006	2.2162e-006
-4.6	2.1172e-006	2.0133e-006	1.9187e-006	1.8238e-006	1.7292e-006	1.6357e-006	1.5433e-006	1.4520e-006	1.3618e-006	1.2726e-006
-4.7	1.3008e-006	1.2386e-006	1.1792e-006	1.1226e-006	1.0686e-006	1.0171e-006	9.6796e-007	9.2113e-007	8.7648e-007	8.3391e-007
-4.8	7.9333e-007	7.5465e-007	7.1779e-007	6.8267e-007	6.4920e-007	6.1731e-007	5.8693e-007	5.5799e-007	5.3043e-007	5.0418e-007
-4.9	4.7918e-007	4.5538e-007	4.3272e-007	4.1115e-007	3.9061e-007	3.7107e-007	3.5247e-007	3.3476e-007	3.1792e-007	3.0190e-007

$$F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

$$F_0(-z) = 1 - F_0(z)$$

Příklad přičes tabulkou:

$$z = -0,26 = -0,2 - 0,06 \Rightarrow F_0(-0,26) \approx 0,39743$$

F OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── podklady pro výrobu DPS - Eagle 6.5.0.....zdrojové soubory návrhu DPS
│   ├── DP_final_ALLPCB.brd
│   ├── DP_final_ALLPCB.sch
│   ├── upper_board.brd
│   └── upper_board.sch
├── fotografie přípravku.....fotografie sestrojeného zařízení
│   ├── celni_pohled.jpg
│   ├── detail_uchyceni.jpg
│   ├── displej.jpg
│   ├── horni_pohled.jpg
│   ├── neosazene_DPS.jpg
│   └── osazene_DPS.jpg
├── simulační modely - Matlab R2016a.....simulace v programu Matlab Simulink
│   ├── kanal_korelacni_prijimac.mdl
│   ├── kanal_prizpusobeny_prijimac.mdl
│   ├── zakladni_prenosovy_kanal.mdl
│   └── pripravek.mdl
├── projekt C - Atmel Studio 7.0.....zdrojové soubory programu jazyka C
│   ├── DP_prototyp_final
│   └── DP_prototyp_final.atsln
├── potisk ovládacího panelu.vsd
└── vzorové vypracování laboratorní úlohy.doc
```