

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza vybraných pulzních modulačních metod

Patrik Mišenčík

Bakalářská práce

2011

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Patrik MIŠENČÍK**
Osobní číslo: **I07448**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Analýza vybraných pulzních modulačních metod**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

V teoretické části proveďte analýzu vybraných modulačních metod (PAM, PCM, uniformní PAM, diferenční PCM, Delta modulace, Delta modulace adaptivní), které se využívají pro přenos datových signálů. V praktické části vytvořte SW modul s názornými postupy a výpočty a zobrazením časových průběhů, středních hodnot, výkonu a spekter. SW bude umožňovat import a export dat. Součástí praktické části bude návod k SW.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

1. Couch, L. W. **Digital and Analog Communication systems, 7 th edition, Prentice Hall, 2007**
2. Proakis, J. G., Manolakis, D. G., **Digital Signal Processing, 4 th edition, Prentice Hall, 2007**
3. Glover, I. A., Grant, P. M., **Digital Communication, 3 th edition, Prentice Hall, 2009**
4. Uhlíř, J., Sovka, P. **Číslicové zpracování signálů, ČVUT, Praha, 2002**
5. Dobeš, J., Žalud, V. **Moderní radiotechnika, BEN, Praha 2006**

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jan Pidanič
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. prosince 2010**

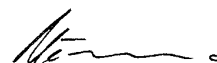
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2011**



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan

L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2011

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 20. 08. 2011

Patrik Mišenčík

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi radou pomohli při psaní této práce. Především Ing. Janu Pidaničovi za trpělivost, odborné vedení práce a vhodné usměrňování v průběhu jejího zpracování. Dále své rodině za trpělivost a podporu během celého mého studia.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá analýzou vybraných diskrétních modulačních metod a to jmenovitě PAM, uniformní PAM, QPAM, PCM, DM a ADM, tedy diskrétních modulací v základním pásmu sloužících pro přenos datových signálů. Cílem práce je rozbor modulací v teoretické části a vytvoření softwaru v části praktické. Praktická část je názorně provedena ve SW vytvořeném v programu MATLAB a obsahuje zobrazení časových průběhů, spekter a výpočty středních hodnot a výkonů.

Klíčová slova

diskrétní modulace, PAM, QPAM, PCM, DM, ADM

Title

Analysis of selected pulse modulation methods

Annotation

Bachelor work deals with analysis of selected discrete modulation methods namely PAM, uniform PAM, QPAM, PCM, DM and ADM. This modulation methods are discrete baseband modulation used to transmit data signals. The purpose is analyzing modulations in the theoretical part and develops software in practical part. The practical part is software created in MATLAB.

Keywords

Discrete modulation, PAM, QPAM, PCM, DM, ADM

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
1 Úvodní informace	12
2 Diskrétní modulace v základním pásmu	13
3 Diskrétní nekódované modulace v základním pásmu	15
3.1 Pulsní amplitudová modulace PAM.....	15
3.1.1 Druhy vzorkování PAM	17
3.2 Kvantovaná pulsní amplitudová modulace QPAM.....	20
4 Diskrétní kódované modulace v základním pásmu	22
4.1 Pulsní kódová modulace PCM	22
4.1.1 Vzorkování	22
4.1.2 Kvantování	22
4.1.3 Kódování	22
4.2 Delta modulace DM.....	24
4.3 Adaptivní delta modulace ADM	25
5 Praktická část	26
5.1 Základní popis softwaru	26
5.1.1 Výběr modulace.....	26
5.1.2 Vstupní signál a Vstupní hodnoty	27
5.1.3 Grafy.....	28
5.1.4 Výpočty	29
5.1.5 Menu.....	29
5.1.6 O programu.....	30
5.2 Výsledky jednotlivých modulací a jejich průběhy	31
5.2.1 Ideální PAM	31
5.2.2 Věrná PAM.....	32
5.2.3 Uniformní PAM.....	34
5.2.4 QPAM.....	35
5.2.5 Pulsní kódová modulace PCM	36
5.2.6 Delta modulace DM.....	37

5.2.7	Adaptivní delta modulace.....	40
6	Závěr.....	44
	Literatura	46

Seznam zkratek

PAM	(Pulse Amplitude Modulation) – pulsní amplitudová modulace
PWM	(Pulse Width Modulation) – pulsní šířková modulace
PPM	(Pulse Position Modulation) – pulsní polohová modulace
PFM	(Pulse Frequency Modulation) – pulsní frekvenční modulace
PCM	(Pulse Code Modulation) – pulsní kódová modulace
QPAM	kvantovaná pulsní amplitudová modulace
DM	delta modulace
ADM	adaptivní delta modulace
DPCM	diferenční pulsní kódová modulace
ADPCM	adaptivní diferenciální pulsní kódová modulace
$m(t)$	modulační signál
B_m	šířka pásma dolní propusti
$f_{m \max}$	maximální modulační kmitočet
f_s	vzorkovací kmitočet
T_s	vzorkovací perioda
$s(t)$	spínací funkce
τ	doba trvání impulsu
$\delta(t)$	Diracovy impulsy
$P_{stř}$	střední výkon
P_{imp}	impulsní výkon
P_u	užitečný výkon
q	kvantizační úroveň
Δ	krok kvantování
n	počet bitů
f_b	bitový kmitočet
T_b	bitová perioda
$n_q(t)$	kvantizační šum
$m_q(t)$	kvantovaný modulační signál
$m(kT_s)$	diskrétní hodnoty modulačního signálu
$\hat{m}(kT_s)$	předpokládané diskrétní hodnoty modulačního signálu
$\hat{m}(t)$	stupňovitý signál
$m_{id}(t)$	ideálně modulovaný signál PAM
$m_v(t)$	věrně modulovaný signál PAM

Seznam obrázků

Obr. 1 - Vznik diskrétních modulací v základním pásmu	14
Obr. 2 - Modulátor PAM	15
Obr. 3 - Modulační signál $m(t)$	16
Obr. 4 - Ideální Diracovy vzorkovací pulsy	16
Obr. 5 - Modulovaný signál PAM – ideální vzorkování	16
Obr. 6 - Věrné vzorkování.....	17
Obr. 7 - Uniformní vzorkování.....	18
Obr. 8 - Šířka pásma PAM – věrné vzorkování [3].....	19
Obr. 9 - Zkreslení šířky pásma - věrné vzorkování [3]	19
Obr. 10 - QPAM s 16 kvantizačními úrovněmi [4].....	21
Obr. 11 - Vysílač PCM.....	22
Obr. 12 - Příklad PCM [1]	23
Obr. 13 - Vysílač DM.....	24
Obr. 14 - Granulační šum [2].....	24
Obr. 15 - ADM a DM v odezvě na jednotkový skok [2].....	25
Obr. 16 – Okno programu	26
Obr. 17 – Výběr modulací	27
Obr. 18 – Výběr uniformní PAM	28
Obr. 19 – Volba zobrazení sledovaného signálu	28
Obr. 20 - Grafy	29
Obr. 21 - Výpočty.....	29
Obr. 22 – Nabídka Menu	30
Obr. 23 - Nabídka Konec.....	30
Obr. 24 - Grafy pro ideální PAM	32
Obr. 25 - Grafy pro věrnou PAM	33
Obr. 26 - Grafy pro uniformní PAM	34
Obr. 27 – Grafy pro QPAM.....	36
Obr. 28 – Grafy pro PCM.....	37
Obr. 29 – Grafy DM modulace.....	38
Obr. 30 – Průběh sledovaného signálu Usl (červeně).....	39
Obr. 31 - Průběh sledovaného signálu Usl (červeně)	40
Obr. 32 - Velikost kroku 1/2 u DM modulace.....	40
Obr. 33 – Grafy ADM	41
Obr. 34 - Průběh sledovaného signálu Usl (červeně)	41
Obr. 35 - Průběh sledovaného signálu Usl (červeně)	42
Obr. 36 - Velikost kroku 1/2 u ADM modulace.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Vstupní parametry pro PAM s ideálním vzorkováním.....	31
Tabulka 2 – Výkon a střední hodnota pro původní signál.....	32
Tabulka 3 - Vstupní parametry pro PAM s věrným vzorkováním.....	33
Tabulka 4 - Výkon a střední hodnota pro původní signál	34
Tabulka 5 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci.....	34
Tabulka 6 - Výkon a střední hodnota pro původní signál	35
Tabulka 7 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci.....	35
Tabulka 8 - Vstupní parametry pro QPAM.....	35
Tabulka 9 - Výkon a střední hodnota pro původní signál	36
Tabulka 10 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci	36
Tabulka 11 - Výkon a střední hodnota pro původní signál	37
Tabulka 12 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci	37
Tabulka 13 - Vstupní parametry pro DM modulaci	38
Tabulka 14 - Výkon a střední hodnota pro původní signál	39
Tabulka 15 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci	39
Tabulka 16 - Výkon a střední hodnota pro původní signál	42
Tabulka 17 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci	42

1 Úvodní informace

Bakalářská práce se zabývá analýzou vybraných diskrétních modulačních metod a to jmenovitě PAM, uniformní PAM, QPAM, PCM, DM a ADM, tedy diskrétních modulací v základním pásmu sloužících pro přenos datových signálů. Cílem práce je rozbor modulací v teoretické části a vytvoření softwaru v části praktické. Praktická část je názorně provedena v softwaru vytvořeném v programu MATLAB a obsahuje zobrazení časových průběhů, spekter a výpočty středních hodnot a výkonů. Návod použití softwaru je popsán v návodu pro software.

Ve druhé kapitole je vysvětlen pojem diskrétní modulace v základním pásmu. Je zde vypsáno rozdělení těchto modulací z pohledu kódování na nekódované a kódované.

Třetí kapitola se zabývá analýzou diskrétních nekódovaných modulací, konkrétně pulsní amplitudovou modulací PAM a QPAM. Jsou zde popsány všechny kroky potřebné k vytvoření signálu PAM, jako je úprava modulačního signálu a vzorkování. V této kapitole je zmíněno i o spektrech PAM pro různá vzorkování a výkonových vlastností PAM. Závěr kapitoly je věnován popisu kvantované pulsní amplitudové modulaci QPAM.

Čtvrtá kapitola je věnovaná diskrétním kódovaným modulacím v základním pásmu. V této kapitole je provedena analýza modulace PCM, DM a ADM. Vysvětleno je vzorkování, kvantování a kódování u signálu PCM. Poté následuje analýza zbylých diskrétních kódových modulací v základním pásmu.

V páté kapitole je popsán funkční software a všechny jeho funkce. Tato kapitola se věnuje i výsledkům jednotlivých modulací po zadání vstupních hodnot. Je zde k vidění časový průběh původního signálu, signálu po modulaci a frekvenční spektrum modulovaného signálu. Zobrazena je také polovina frekvenčního spektra. Včetně těchto průběhů v této kapitole nalezneme i výsledky výkonů a středních hodnot pro původní a modulovaný signál počítaných na impedanci Z .

Šestá kapitola je závěr. Obsahuje celkové shrnutí této práce.

2 Diskrétní modulace v základním pásmu

Diskrétní (nespojité) modulace v základním pásmu převádí analogový modulační signál na diskrétní impulsní signál realizovaný rovněž v základním pásmu. Tyto impulsní signály jsou nespojité alespoň v jednom z těchto parametrů: v čase, amplitudě, frekvenci anebo fázi. Mohou ale být nespojité i ve více parametrech současně.

Diskrétní modulace v základním pásmu se rozděluje na nekódované a kódované modulace. Přenos výsledných signálů modulací nacházejících se v základním pásmu nejčastěji zajišťují metalické spoje, nebo optické vlnovody.

„Ve skutečnosti se jedná o kódování, protože modulace je proces, při kterém se signál ze základního pásma převádí do vyššího frekvenčního pásma. V ustálené terminologii se však používá pojem modulace.“ [3]

Obecný popis modulace pro výsledný modulovaný signál y je dán vztahem:

$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

kde A [V] je amplituda průběhu, ω [$rad \cdot s^{-1}$] je úhlová rychlost, t [s] je čas a φ [°] je fázový posuv.

Tedy vysokofrekvenční nosný signál (sinusoida nebo cosinusoida) je ovlivňován nízkofrekvenčním signálem, který nese užitečnou informaci. V případě diskrétních modulací v základním pásmu se nepoužívá vysokofrekvenční nosná vlna. Za nosnou „vlnu“ zde považujeme impulsní signál.

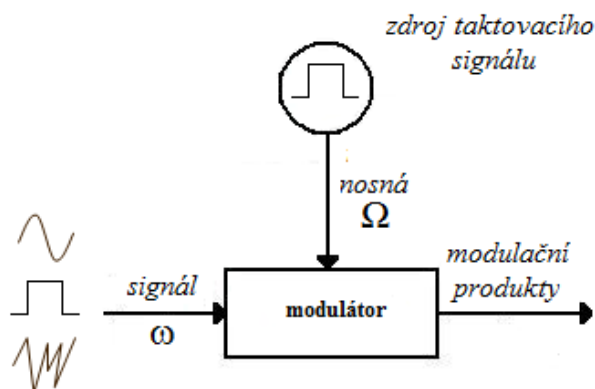
Vznik diskrétních modulací v základním pásmu je zobrazen na obr. 1.

Diskrétní nekódované modulace v základním pásmu

- pulsní amplitudová modulace – **PAM** (pulse amplitude modulation)
- kvantovaná pulsní amplitudová modulace - **QPAM**
- pulsní šířková modulace - **PWM** (pulse width modulation)
- pulsní polohová modulace - **PPM** (pulse position modulation)
- pulsní frekvenční modulace - **PFM** (pulse frequency modulation)

Diskrétní kódované modulace v základním pásmu

- pulsní kódová modulace - **PCM** (pulse code modulation)
- delta modulace - **DM**
- adaptivní delta modulace - **ADM**
- diferenční pulsní kódovaná modulace - **DPCM**
- adaptivní diferenční pulsní kódová modulace - **ADPCM**



Obr. 1 - Vznik diskretních modulací v základním pásmu

Dále bude provedena analýza vybraných typů diskretních modulací situovaných v základním pásmu.

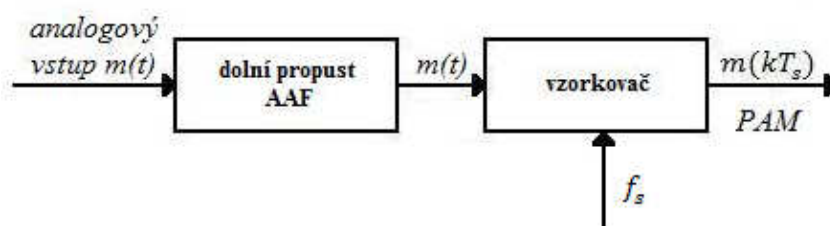
3 Diskrétní nekódované modulace v základním pásmu

3.1 Pulsní amplitudová modulace PAM

Jedním ze základních typů nekódovaných modulací je pulsní amplitudová modulace PAM. Tato modulace přenáší impulsní signály, které jsou diskrétní v čase. Amplituda (modulovaná veličina impulsních signálů) je přenášena spojitě.

Vytváření pulsní amplitudové modulace PAM je zobrazeno na obr. 2. Spočívá v tom, že libovolný analogový signál necháme nejprve upravit průchodem dolní propustí se šířkou pásma B_m . Tento analogový signál se nazývá modulační signál a značí se $m(t)$, (obr. 3). Dolní propust se používá k potlačení vyšší nežádoucí frekvenční složky signálu $m(t)$. Šířka pásma B_m dolní propusti obvykle odpovídá nejvyšší požadované frekvenci $f_{m \max}$ signálu $m(t)$, tedy

$$B_m = f_{m \max} \cdot \quad (2)$$



Obr. 2 - Modulátor PAM

Modulační signál $m(t)$ po průchodu dolní propustí přivádíme na spínač (vzorkovač). Ten pracuje tak, že svými vzorkovacími impulsy spíná modulační signál $m(t)$ v pravidelných periodických sledech s frekvencí f_s [Hz]

$$f_s = \frac{1}{T_s}, \quad (3)$$

kde T_s [s] je vzorkovací perioda.

V ideálním případě spínač spíná Diracovými impulsy $\delta(t)$ (obr. 4). Ty mají parametry nekonečně úzkého a současně nekonečně vysokého impulsu.

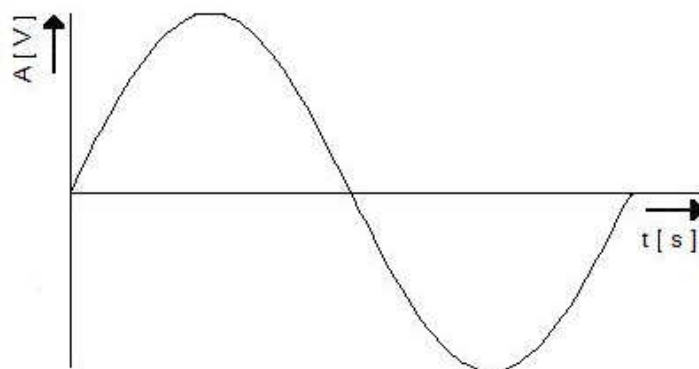
V praxi se však ke spínání a samotnému vzorkování používá spínací funkce $s(t)$ s konečnou amplitudou A , a stejně tak konečnou dobou trvání τ [s].

Spínač tedy vytváří impulsy kopírující signál $m(t)$, které jsou modulačním signálem $m(t)$ modulovány amplitudově (obr. 5). A samotné vzorky kopírující tvar signálu $m(t)$ můžeme vyjádřit jako

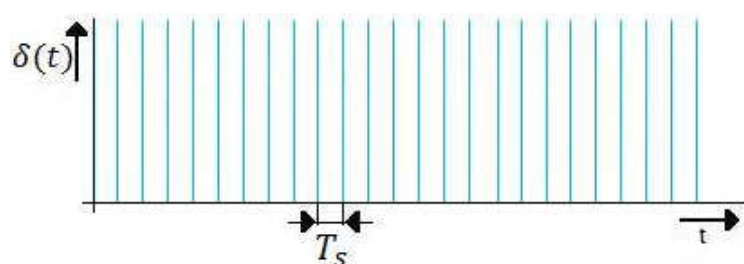
$$m(t) = (mkT_s), \quad (4)$$

kde $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$

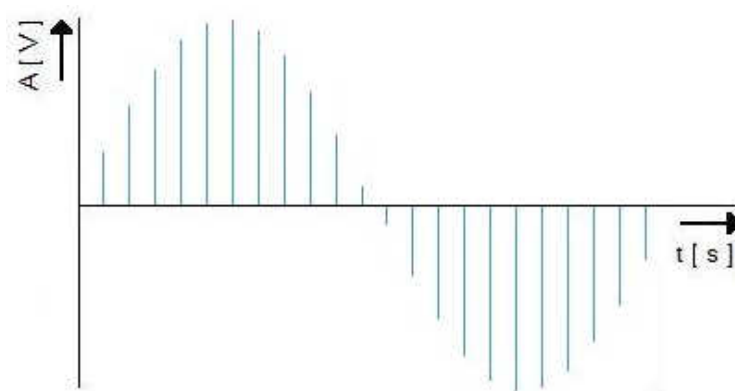
Tímto postupem dosáhneme požadovaného signálu PAM. Podle úpravy použití modulovaných impulsů, lze vytvořit tři druhy vzorkování (-signálu PAM-).



Obr. 3 - Modulační signál $m(t)$



Obr. 4 - Ideální Diracovy vzorkovací pulsy



Obr. 5 - Modulovaný signál PAM – ideální vzorkování

3.1.1 Druhy vzorkování PAM

První druh vzorkování a zároveň jediné nerealizovatelné je *ideální vzorkování* (obr. 5). Jedná se o sled Diracových impulsů δ v okamžicích $t_i = i \cdot T_s$ s amplitudami $m(t_i)$,

$$m_{id}(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} m(t_i) \delta(t - t_i) \quad (5)$$

V praxi jsou často Diracovy impulsy nahrazeny velmi krátkými impulsy obdélníkového, nebo trojúhelníkového průběhu.

Druhým druhem vzorkování je *věrné vzorkování*. V tomto případě vzorkování jsou modulované pulsy prodlouženy na šířku pulsů s dobou trvání τ . Znamená to, že modulovaný signál bude věrně kopírovat průběh modulačního signálu (obr. 6).

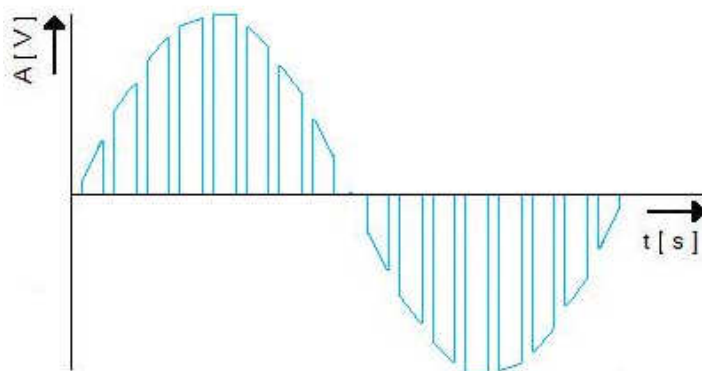
$$m_v(t) = m(t) \quad (6)$$

pro $t \in \langle t_i, t_i + \tau \rangle$,

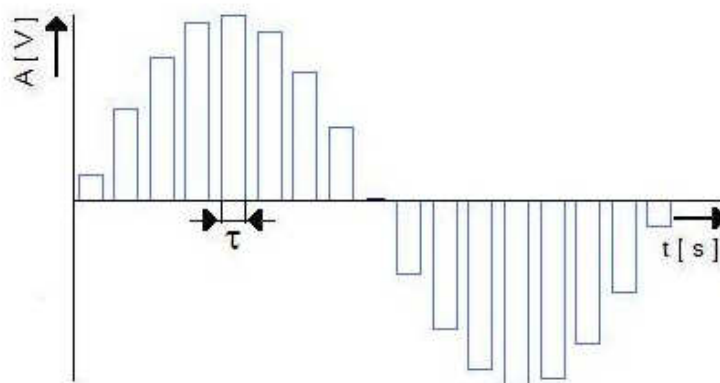
$$m_v(t) = 0 \quad (7)$$

pro ostatní t .

Posledním druhem vzorkování je *uniformní vzorkování*, také někdy nazývané pravoúhlé vzorkování. Uniformní PAM vytváří pravoúhlé vzorky modulačního signálu, většinou to bývá vzorkovačem s pamětí S&H (sample and hold). Jednotlivé impulsy modulovaného signálu nekopírují tvar modulačního signálu (věrné vzorkování), ale drží si po dobu trvání signálu τ amplitudu modulačního signálu na začátku pulsu (obr. 7).



Obr. 6 - Věrné vzorkování



Obr. 7 - Uniformní vzorkování

Šířka pásma pulsní amplitudové modulace PAM

Pulsní amplitudová modulace PAM se získá násobením modulačního signálu $m(t)$ funkcí $s(t)$. Vznikne spektrum, které je tvořeno páry postranních pásem. Při nejvyšším kmitočtu $f_{m \max}$ obsaženém v modulačním signálu a vzorkovací frekvenci f_s na spínači zaujímá každý pár celkovou šířku pásma $2f_{m \max}$. Na obr. 8 je k vidění podoba správné šířky pásma s věrným vzorkováním.

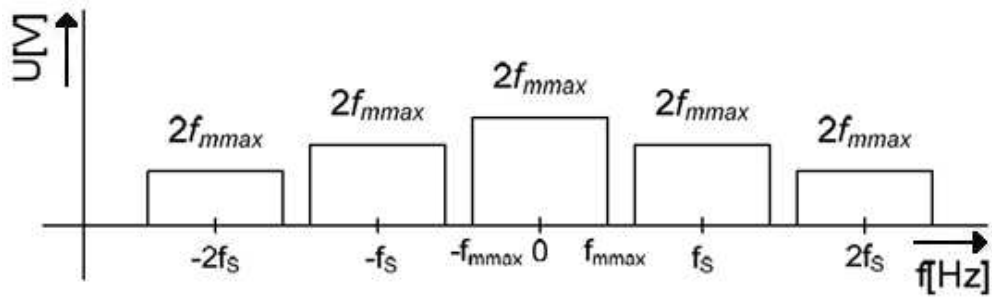
Frekvenční spektrum při uniformním vzorkování má shodnou podobu se spektrem při věrném vzorkování. Pouze temena postranních pásem nejsou plochá, nýbrž sledují váhovou hodnotu funkce spektra.

Frekvenční spektrum při ideálním vzorkování se liší od spektra při věrném vzorkování jen ve velikosti amplitudy postranních pásem, ta je pro všechny stejná.

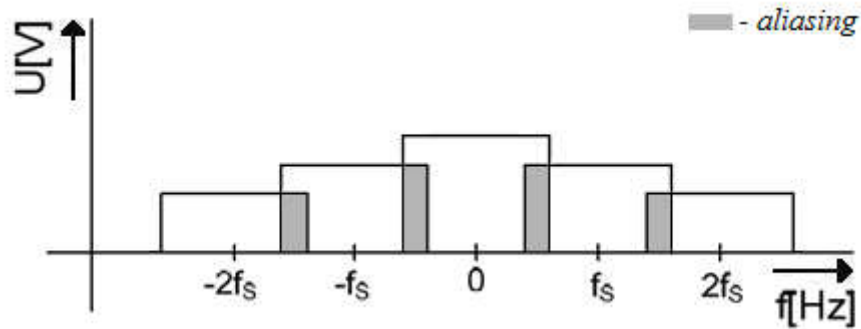
Aby nedocházelo k překrývání postranních pásem, musí být splněn Nyquistův (Shannon-Kotělnikův) teorém

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_{m \max} \quad (8)$$

Pokud se překrývají sousední postranní pásma spektra, dochází ke zkreslení pulsní amplitudové modulace PAM (obr. 9). Nedodržení podmínky (8) má proto za následek nelineární zkreslení rekonstruovaného signálu, také někdy označované termínem aliasing. Zkreslení jde potlačit použitím vstupní dolní propusti AAF (Anti Aliasing Filter), ale nelze mu zcela zabránit.



Obr. 8 - Šířka pásma PAM – věrné vzorkování [3]



Obr. 9 - Zkreslení šířky pásma - věrné vzorkování [3]

Výkonové vlastnosti pulsní amplitudové modulační PAM

Pulsní amplitudová modulační PAM má své výkonové vlastnosti. Mezi základní řadíme střední výkon $P_{stř}$ [W] a impulsní výkon P_{imp} [W]. Jsou dány vztahy:

$$P_{stř} = (\tau/T_s) \cdot m^2(t) \quad (9)$$

kde τ [s] je doba trvání impulsu.

$$P_{imp} = m^2(t) \quad (10)$$

Dále se určuje poměr mezi impulsním a středním výkonem, jako

$$P_{stř}/P_{imp} = T_s/\tau \quad (11)$$

Pokud je impulsní amplitudová modulace PAM vzorkována ideálním vzorkováním, tak $P_{stř}/P_{imp} \rightarrow \infty$.

Pokud je impulsní amplitudová modulace PAM vzorkována věrným vzorkováním, tak $P_{stř}/P_{imp} \rightarrow 1$.

Anebo je-li impulsní amplitudová modulace PAM vzorkována uniformním vzorkováním, tak $\tau = T_s$.

Určuje se i poměr užitečného výkonu $P_u [W]$ v základním pásmu a celkového (středního) vysílaného výkonu $P_{stř}$ na všech harmonických, jako

$$P_u/P_{stř} = B_m/B_{celk} \quad (12)$$

Pokud je impulsní amplitudová modulace PAM vzorkována ideálním vzorkováním, tak $P_u/P_{stř} \rightarrow 0$

Pokud je impulsní amplitudová modulace PAM vzorkována věrným vzorkováním, tak $P_u/P_{stř} \rightarrow 1$

Anebo je-li impulsní amplitudová modulace PAM vzorkována uniformním vzorkováním, tak $P_u/P_{stř} \rightarrow < 1$

3.2 Kvantovaná pulsní amplitudová modulace QPAM

Mezi nekódované diskrétní modulační vzorky v základním pásmu řadíme vedle PAM také kvantovaný signál PAM (QPAM). K dosažení signálu QPAM je zapotřebí diskrétní vzorky $m(kT_s)$ signálu PAM podrobit kvantování. Podobně jako u vzorkování má kvantování také tři různé způsoby.

První způsob kvantování je *uniformní kvantování*. Uniformního kvantování docílíme tak, že rozdělíme rozsah amplitudy na kvantizační úrovně (hladiny) q . Poté se přiřadí ke každé hladině q nejbližší sousední diskrétní úroveň, možno vyšší i nižší. To vždy podle rozhodovací úrovně, ta se nachází přesně mezi oběma (nižší a vyšší) diskrétními úrovněmi.

Krok kvantování je brán jako odstup mezi právě těmito jednotlivými diskrétními úrovněmi a je označován Δ . Pro uniformní kvantování je typické, že tento odstup je konstantní. Po kvantování má tedy signál podobu kvantovaných diskrétních impulsů $m_q(kT_s)$ signálu PAM_q . Každou z těchto diskrétních úrovní lze vyjádřit pomocí určitého počtu n bitů.

Takže počet kvantizačních úrovní je

$$q = 2^n. \quad (13)$$

Za těchto okolností můžeme říct, že

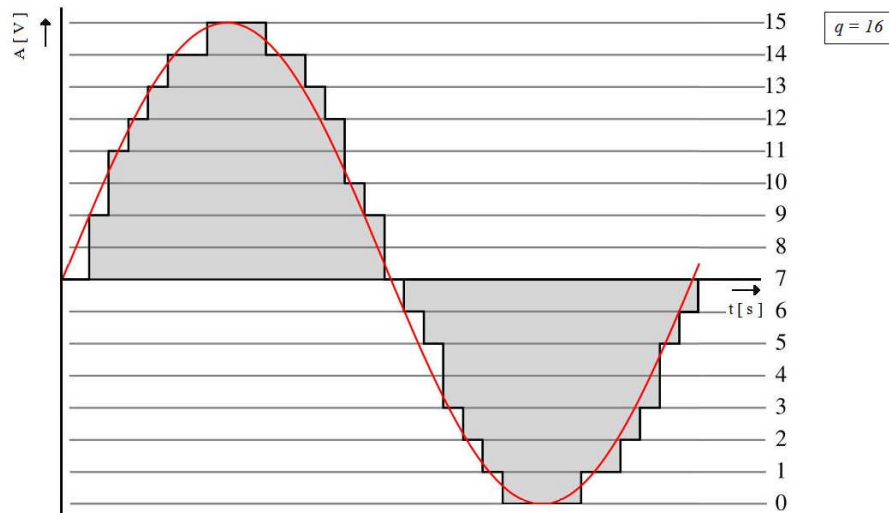
$$n = \log_2 q \quad (14)$$

bitů.

Druhý způsob kvantování se nazývá *robustní (neuniformní) kvantování*. U robustního kvantování je kvantizační krok Δ různý, není tedy konstantní (uniformní kvantování). Tento druh kvantování je vhodný ke kvantování malých amplitud.

Posledním způsobem kvantování je *vektorové kvantování*. Především druhy kvantování vždy kvantovali v daném okamžiku pouze jeden diskretní vzorek signálu PAM. Vektorové kvantování v daném okamžiku kvantuje současně více jak jeden diskretní vzorek signálu PAM. Tento způsob kvantování je vhodnější použít, pokud sousední vzorky nemají mezi sebou příliš velké rozdíly.

Na obr. 10 je zobrazeno uniformní kvantování, které má 16 kvantizačních úrovní.

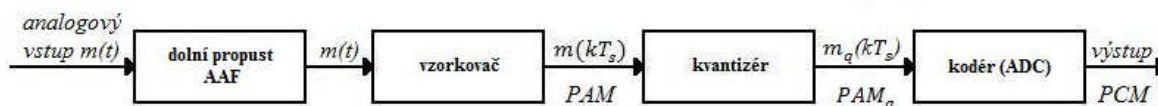


Obr. 10 - QPAM s 16 kvantizačními úrovněmi [4]

4 Diskrétní kódované modulace v základním pásmu

4.1 Pulsní kódová modulace PCM

Pulsní kódová modulace PCM je základním typem kódovaných modulací a je nejvíce používaná. Princip pulsni kódové modulace PCM je znázorněn na obr. 11. Podstatou PCM jsou tři základní operace: vzorkování (signál PAM), kvantování a kódování.



Obr. 11 - Vysílač PCM

4.1.1 Vzorkování

Popis vzorkování je stejný jako u PAM. Nejprve se modulační signál $m(t)$ frekvenčně omezí průchodem dolní propustí AAF.

Takto upravený signál se vzorkuje. Takže dostaneme signál PAM, který je složený z diskretních vzorků $m(kT_s)$ a ten se dále kvantuje.

4.1.2 Kvantování

Popis kvantování je stejný jako u QPAM.

Dále bude vysvětlen princip a analýza PCM s uniformním kvantováním.

4.1.3 Kódování

Kódová bitová skupina je dána počtem n bitů, s jejichž pomocí lze určit jednotlivé diskretní úrovně signálu PAM_q .

Abychom dostali konečný kód signálu PCM, musí se na tento kód převést právě velikost vzorku pomocí kvantizační úrovně. Každá kvantizační úroveň má svůj odpovídající binární kód, což je sled jedniček a nul. „V binárním kódu každý binární prvek může nabývat vždy jednu ze dvou diskretních hodnot, označovaných jako logická 0 a logická 1 a nazývaných bit.“ [2]

Samotný proces kódování se provádí v kodéru, což je analogově – číslicový převodník ADC (Analog Digital Converter).

Výsledný signál PCM má dobu trvání jednoho bitu označovanou jako bitová rychlost f_b [Hz]

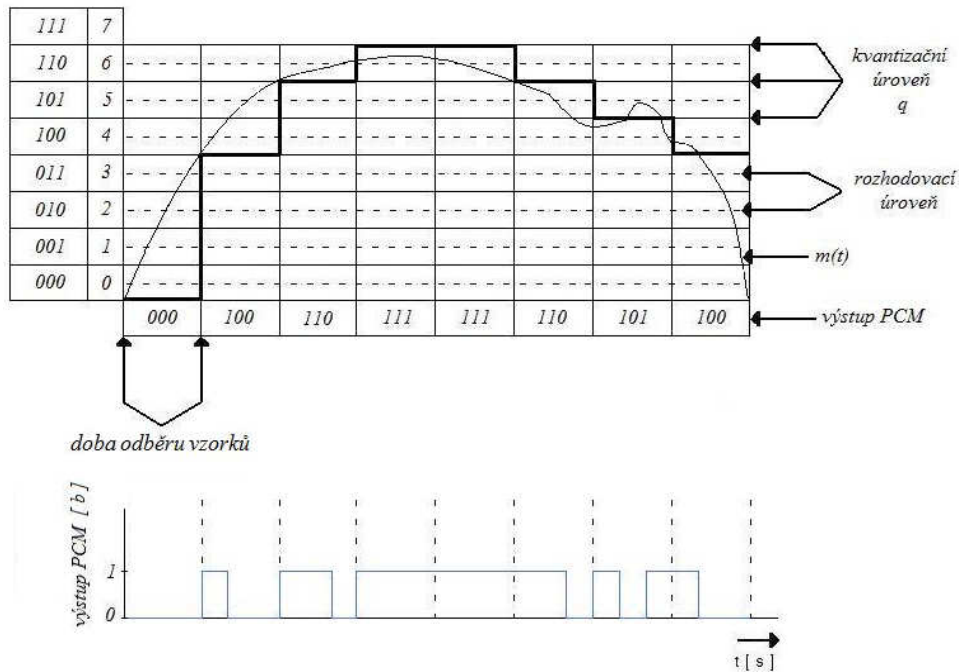
$$f_b = n f_s, \quad (15)$$

kde f_s [Hz] je rychlost vzorkování a n je počet kvantovaných bitových vzorků.

Bitová perioda tedy je T_b [s]

$$T_b = 1/f_b. \quad (16)$$

Na obr. 12 je znázorněna PCM s třímístnou kódovou skupinou a počtem kvantizačních úrovní $q = 2^3 = 8$.



Obr. 12 - Příklad PCM [1]

Nevýhodou signálu PCM je, že šířka pásma B_{PCM} je znatelně menší než bitová rychlost f_b . Tuto nevýhodu však lze částečně potlačit snížením bitové rychlosti f_b .

Dalším nedostatkem je kvantizační šum. Kvantizační šum se nedá odstranit a vyskytuje se všude tam, kde se používá vzorkování. Je dán vztahem

$$n_q(t) = m(t) - m_q(t), \quad (17)$$

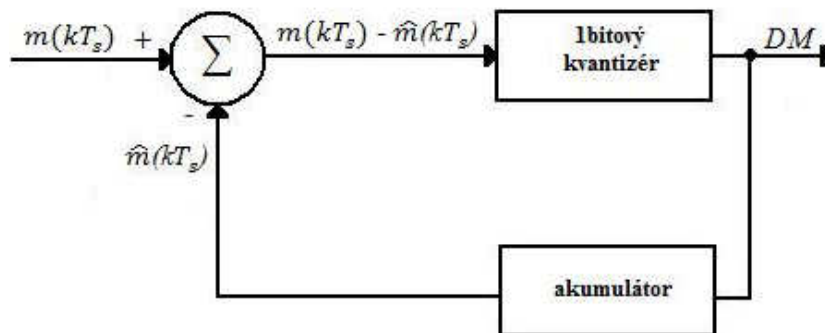
kde $m(t)$ je skutečný analogový signál a $m_q(t)$ kvantovaný signál. Pomocí kroku kvantování Δ však lze tento šum měnit. S menším krokem kvantování se kvantizační šum zmenší také. Naopak výhodou PCM je odolnost proti rušivým napětím.

4.2 Delta modulace DM

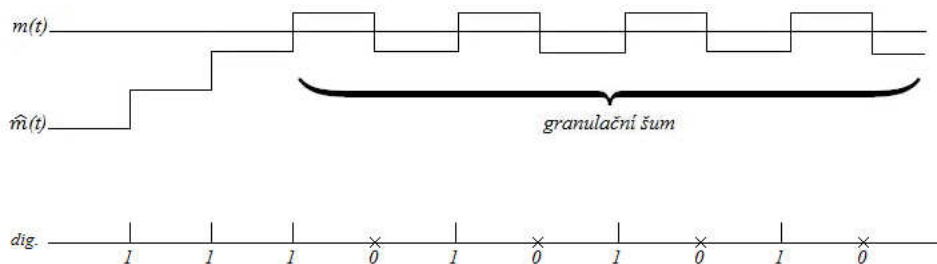
Princip delta modulace DM (obr. 13) je založený na přenosu rozdílů jednotlivých diskrétních vzorků $m(kT_s)$ s jejich předchozí hodnotou. Přenáší se tedy pouze jednobitové informace.

Přenášení pouze jednobitové informace má své nevýhody. Vznikají zkreslení, jako je například granulační šum (obr. 14). Ten vzniká za situace, kdy modulační signál nemá příliš strmý průběh. Tento nedostatek, podobně jako u PCM, se může omezit zmenšením kvantizačního kroku Δ .

Problém ovšem nastává i za situace, kdy je modulační signál strmý. To se projeví zejména u dekodéru přijímače, kde se nedaří tyto strmé signály při demodulaci dostatečně sledovat pomocí stupňovitého signálu $\hat{m}(t)$, (schodovitá aproximace).



Obr. 13 - Vysílač DM



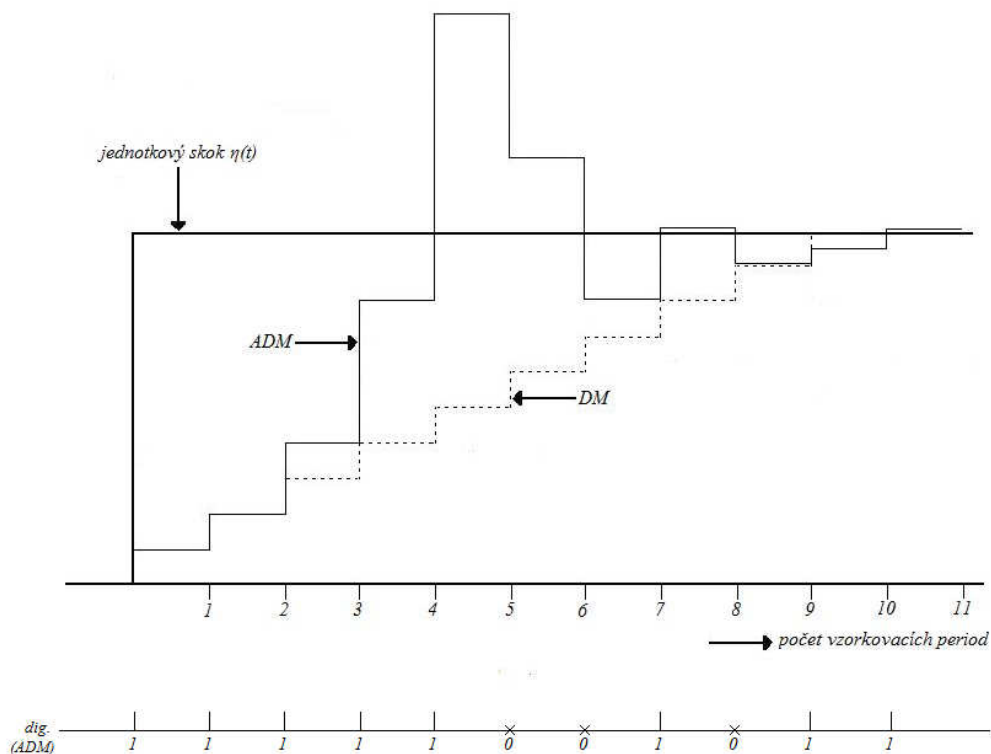
Obr. 14 - Granulační šum [2]

4.3 Adaptivní delta modulace ADM

Základním znakem adaptivní delta modulace ADM je to, že dokáže částečně řešit nedostatky, které vznikají při strmém a plochem modulačním signálu během delta modulace.

Tento problém řeší pomocí nekonstantního stupňovitého průběhu, který mění velikost jednotlivých kvantizačních kroků podle průběhu modulovaného signálu. Algoritmů, podle kterých se kroky (stupně) mění, je více druhů, tak jako ADM.

Nejjednodušší je algoritmus, kdy při zjištění většího binárního kódu než kvantizačního kroku, je následující kvantizační krok jeden a půl násobkem předchozího. Pokud je binární kód menší než kvantizační krok, tak je následující krok polovinou předchozího. Nejvíce rozšířený je algoritmus, který používá princip zdvojnásobení hodnoty kvantizačního kroku, při zjištění dvou binárních kódů o stejné velikosti za sebou (obr. 15).



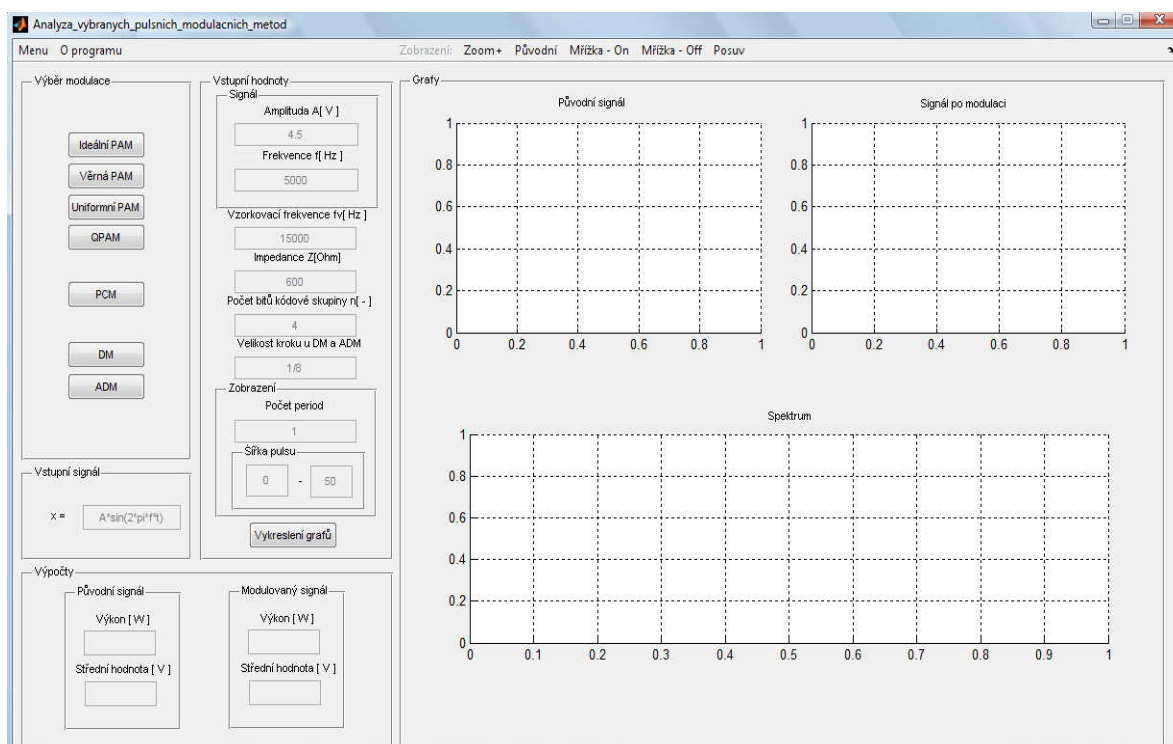
Obr. 15 - ADM a DM v odezvě na jednotkový skok [2]

5 Praktická část

Praktická část je názorně provedena v softwaru vytvořeném v programu MATLAB. Obsahuje zobrazení časových průběhů, spekter a výpočty středních hodnot a výkonů u vybraných modulací. Software nabízí také uložení dat, načtení dat a další různé funkce popsané v nadcházející části návodu.

5.1 Základní popis softwaru

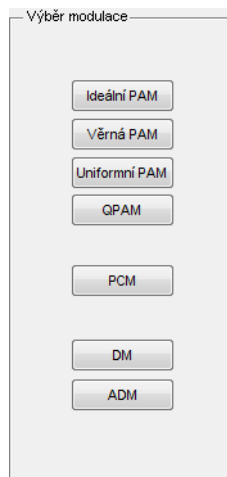
Základní popis poslouží k rychlejší orientaci v programu. Na obr. 16 je zobrazeno okno programu. Celé okno je složeno z menších skupin panelů s vlastními funkcemi. Nyní budou všechny panely a funkce programu postupně vysvětleny.



Obr. 16 – Okno programu

5.1.1 Výběr modulace

První krok je výběr modulace. V tomto panelu si uživatel vybere typ modulace, který chce zobrazit. Na obr. 17 jsou zobrazeny typy možných úprav signálu.



Obr. 17 – Výběr modulací

Po kliknutí na některé z tlačítek si tedy uživatel vybere příslušnou modulaci. Po jejím výběru se aktivuje pole panelu „Vstupní signál“ a vybraná pole v panelu „Vstupní hodnoty“.

V druhém zmiňovaném panelu se aktivují vždy různá pole, podle výběru modulace. Při spuštění programu jsou standardně přednastaveny hodnoty vstupního signálu i vstupních hodnot.

5.1.2 Vstupní signál a Vstupní hodnoty

Nejprve uživatel zadá vstupní signál ve stejnojmenném panelu, který chce podrobit vybrané úpravě signálu.

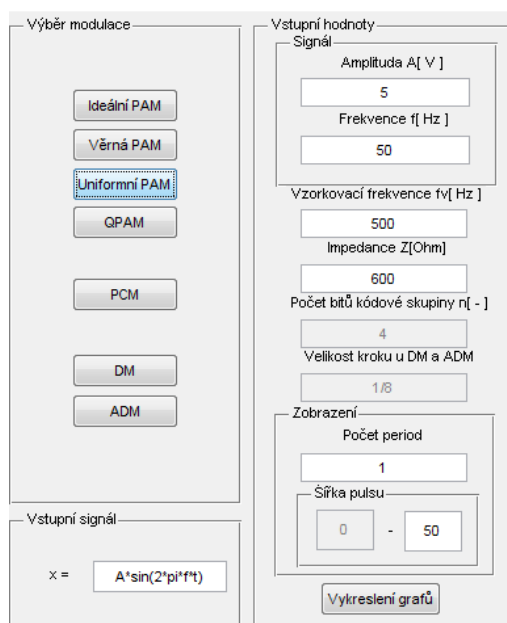
Vstupní hodnoty jsou rozděleny do více sekcí. První je k zadání vstupních hodnot signálu amplitudy A , a frekvence f . Další políčka jako jsou „Vzorkovací frekvence“, „Impedance“, „Počet bitů kódové skupiny“ a „Velikost kroku u DM a ADM“ se aktivují různě a to podle typu modulace.

Další sekcí je „Zobrazení“. Zde se zadává počet zobrazených period signálu a šířka pulsů vzorkovače. Šířka pulsu se zadává v případě QPAM nebo PAM s věrným a uniformním vzorkováním. Po vyplnění všech potřebných hodnot se stiskne tlačítko „Vykreslení grafů“. To provede vykreslení daných grafů, které jsou popsány v návodu později. Toto tlačítko provede i výpočet střední hodnoty a výkonu na impedanci Z pro původní signál a signál po modulaci.

Všechna políčka pro vstupní hodnoty jsou opatřena zabezpečením proti zadávání záporných hodnot, v případě vzorkovací frekvence i podmínkou $f_v > 2 * f$. Při nesplnění některé z podmínek, program upozorní uživatele o chybě.

Pro ilustraci je na obr. 18 zobrazen výběr uniformní PAM modulace, s definováním všech potřebných hodnot. Na tomto obrázku je vidět, že při výběru uniformní PAM se

aktivují potřebná políčka. Nepotřebné je v tomto případě políčko s názvem „Počet bitů kódové skupiny“ a „Velikost kroku u DM a ADM“.



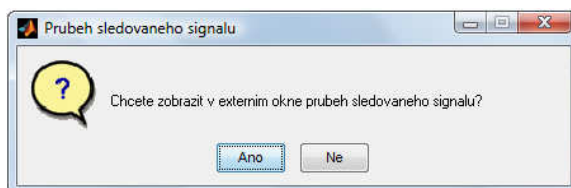
Obr. 18 – Výběr uniformní PAM

5.1.3 Grafy

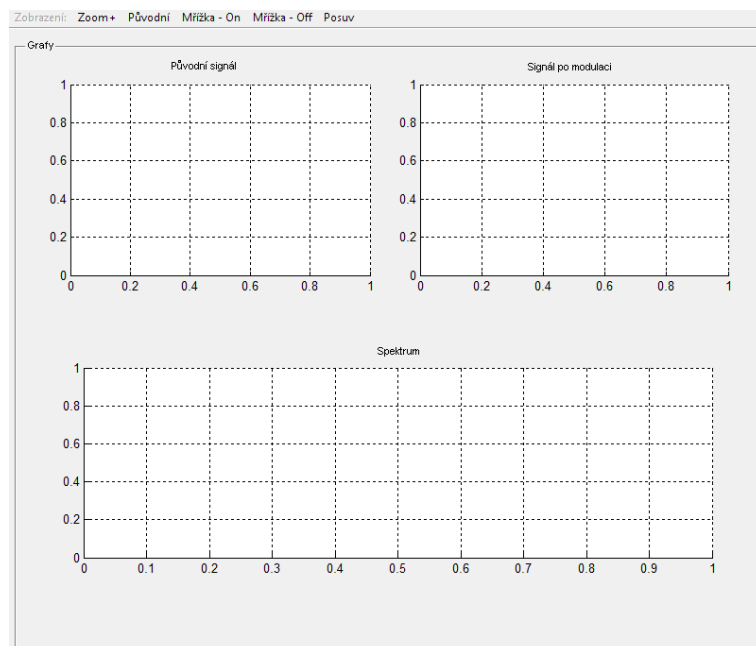
V této oblasti se nacházejí tři grafy, jak je zobrazeno na obr. 20. První vlevo nahoře, je graf signálu, který chceme modulovat a nazývá se „Původní signál“. Druhý vpravo nahoře je signál po modulaci. A nakonec třetí je graf s názvem „Spektrum“. Ten zobrazuje spektrum modulovaného signálu. Přesněji jen jeho polovinu.

Na liště nacházející se nad grafy je pětičlenná skupina funkcí. Pomocí těchto funkcí lze upravovat zobrazení všech tří grafů. Jsou to základní funkce jako například přiblížení grafu pod názvem „Zoom“ a následné vrácení původního zobrazení pod názvem „Původní“. Uživatel má možnost zapnout i vypnout mřížky u grafů pomocí funkcí „Mřížka – On“ a „Mřížka – Off“. Poslední funkce je možnost pohybovat se v grafu po volbě funkce „Posuv“.

Program umožňuje zobrazení i externího grafu. V případě modulace DM a ADM se programu uživatele zeptá, zda chce zobrazit i průběh sledovaného signálu (obr. 19).



Obr. 19 – Volba zobrazení sledovaného signálu



Obr. 20 - Grafy

5.1.4 Výpočty

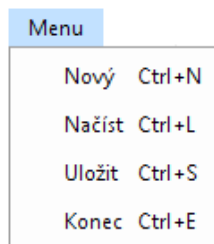
Zde se po zadání všech nezbytných hodnot a následném kliknutí na tlačítko „Vykreslení grafů“ provedou výpočty střední hodnoty a výkonu na impedanci Z pro původní signál a signál po modulaci. Je dán předpoklad, že výkony modulací QPAM, PCM, DM a ADM jsou si rovny. Panel „Výpočty“ je zobrazen na obr. 21.

The figure shows a software window titled 'Výpočty'. It contains two columns of input fields. The left column is for 'Původní signál' (Original signal) and the right column is for 'Modulovaný signál' (Modulated signal). Each column has two input fields: 'Výkon [W]' (Power [W]) and 'Střední hodnota [V]' (Average value [V]).

Obr. 21 - Výpočty

5.1.5 Menu

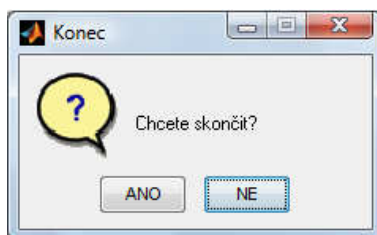
Obsah nabídky menu je k vidění na obr. 22. Každá funkce v nabídce lze přivolat pomocí klávesové zkratky.



Obr. 22 – Nabídka Menu

Pro funkci „Nový“ je zkratka Ctrl+N. Tento výběr funkce nám vynuluje všechny vstupní hodnoty i výsledky. Zkratka Ctrl+L je pro funkci „Načíst“, která načte obrázek s příponou *.jpg. Naopak zkratka Ctrl+S, uloží obrázek s příponou *.jpg celého panelu „Grafy“.

Poslední nabídka je „Konec“, kterou nalezneme pod zkratkou Ctrl+E. Tato volba se zeptá uživatele, zda chce opravdu ukončit program. Po jednom z výběru, který je zobrazen na obr. 23, uživatel program ukončí nebo v něm bude dále pokračovat.



Obr. 23 - Nabídka Konec

5.1.6 O programu

Funkce „O programu“ se nachází vedle menu. Informuje uživatele o názvu programu, jménu autora a datu vytvoření programu.

5.2 Výsledky jednotlivých modulací a jejich průběhy

V této podkapitole bude postupně provedena analýza jednotlivých modulací, které jsou v nabídce ve skupině „Výběr modulace“. Budou zde zobrazeny průběhy původních signálů, signálů po modulaci a spekter signálů po modulaci. Zobrazíme si i výsledky střední hodnoty a výkonu na impedanci Z , jak pro signály původní, tak i po modulaci. Tyto výsledky budou zaokrouhleny na tři desetinná místa. Pro výpočet velikosti napětí výstupů modulací PCM, DM a ADM je nastaveno, že se jejich výkony rovnají výkonu QPAM.

Používaný algoritmus změny kroku u ADM modulace má vlastnost zdvojnásobení hodnoty kvantizačního kroku při zjištění dvou binárních kódů o stejné velikosti za sebou. Pokud je binární kód menší než kvantizační krok, tak je následující krok polovinou předchozího.

5.2.1 Ideální PAM

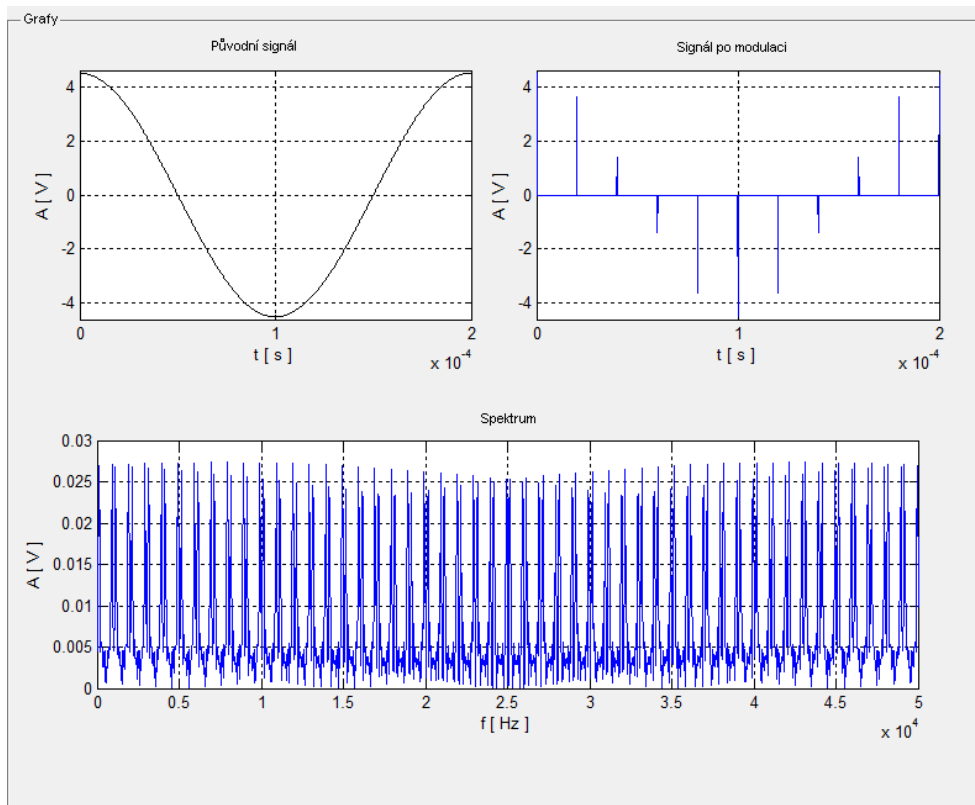
První modulace, která bude názorně provedena, je pulsní amplitudová modulace s ideálním vzorkováním.

V praktické části nelze zobrazit ideální Diracovy impulsy. Pro simulaci jsem použil velmi úzký impuls. Proto se mohou výsledky výkonu, střední hodnoty a spektra lišit od ideálního případu. Výkon a střední hodnota signálu po modulaci se zde nepočítají. V ideálním případě by výkon ideální PAM byl nulový. A protože nelze zobrazit Diracovy impulsy, výsledné spektrum neodpovídá spektru ideální PAM. V ideálním případě je velikost spektra konstantní, a obsahuje všechny frekvenční složky od $-\infty$ do $+\infty$.

Po zadání hodnot uvedených v tabulce 1 stiskneme tlačítko „Vykreslení grafů“. Tím se vykreslí zmíněné tři grafy a spočítá se výkon a střední hodnota pro původní signál.

Tabulka 1 – Vstupní parametry pro PAM s ideálním vzorkováním

Vstupní parametr	Hodnota
Vstupní signál	$A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
Amplituda vstupního signálu	4.5V
Frekvence vstupního signálu	5KHz
Vzorkovací frekvence	50KHz
Impedance	600 Ω
Počet period	1



Obr. 24 - Grafy pro ideální PAM

Tabulka 2 – Výkon a střední hodnota pro původní signál

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

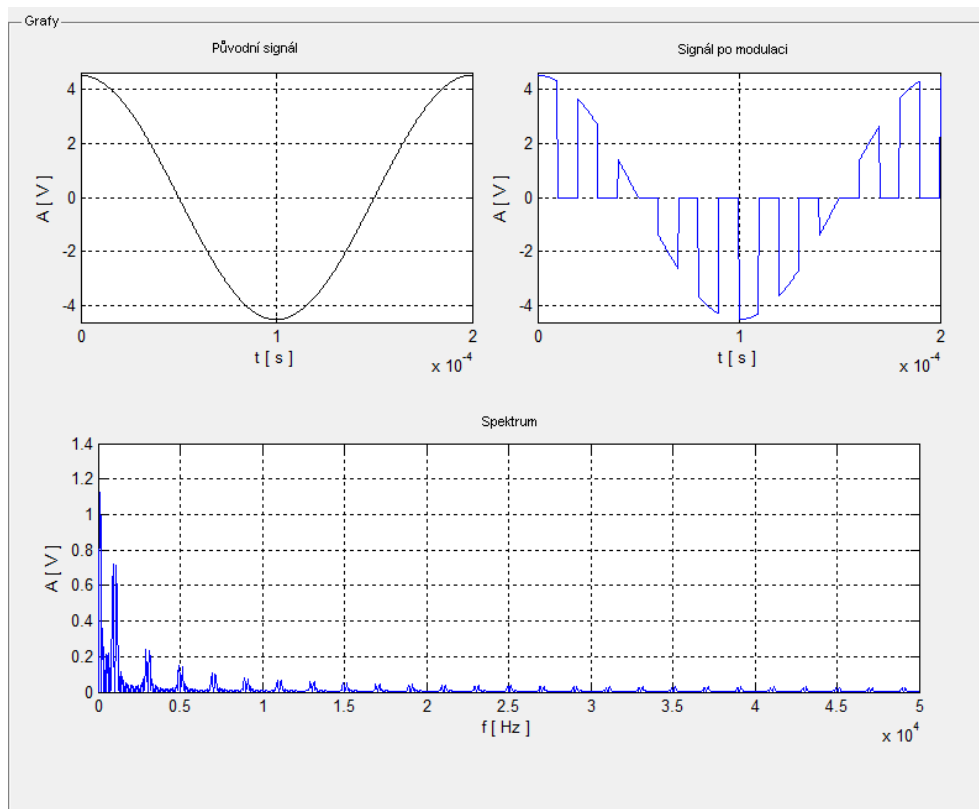
5.2.2 Věrná PAM

Jako druhá modulace po ideální PAM se nachází pulsní amplitudová modulace s věrným vzorkováním. Pro tuto modulaci se zadají stejné hodnoty jako u předešlé modulace. Pouze s jednou změnou, že zadáme šířku pulsu na 50%. Zde je oproti PAM s ideálním vzorkováním rozdíl, šířka pulsu zde není minimální.

Tabulka 3 - Vstupní parametry pro PAM s věrným vzorkováním

Vstupní parametr	Hodnota
Vstupní signál	$A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
Amplituda vstupního signálu	4.5V
Frekvence vstupního signálu	5KHz
Vzorkovací frekvence	50KHz
Impedance	600Ω
Počet period	1
Šířka pulsu	50%

Opět zadáme hodnoty, které se nachází v tabulce 3. Pro vykreslení grafů a zobrazení výpočtů stiskneme znovu tlačítko „Vykreslení“.



Obr. 25 - Grafy pro věrnou PAM

Na obr. 25 je názorně vidět jak průběh v grafu signálu po modulaci věrně kopíruje vstupní signál.

Tabulka 4 - Výkon a střední hodnota pro původní signál

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

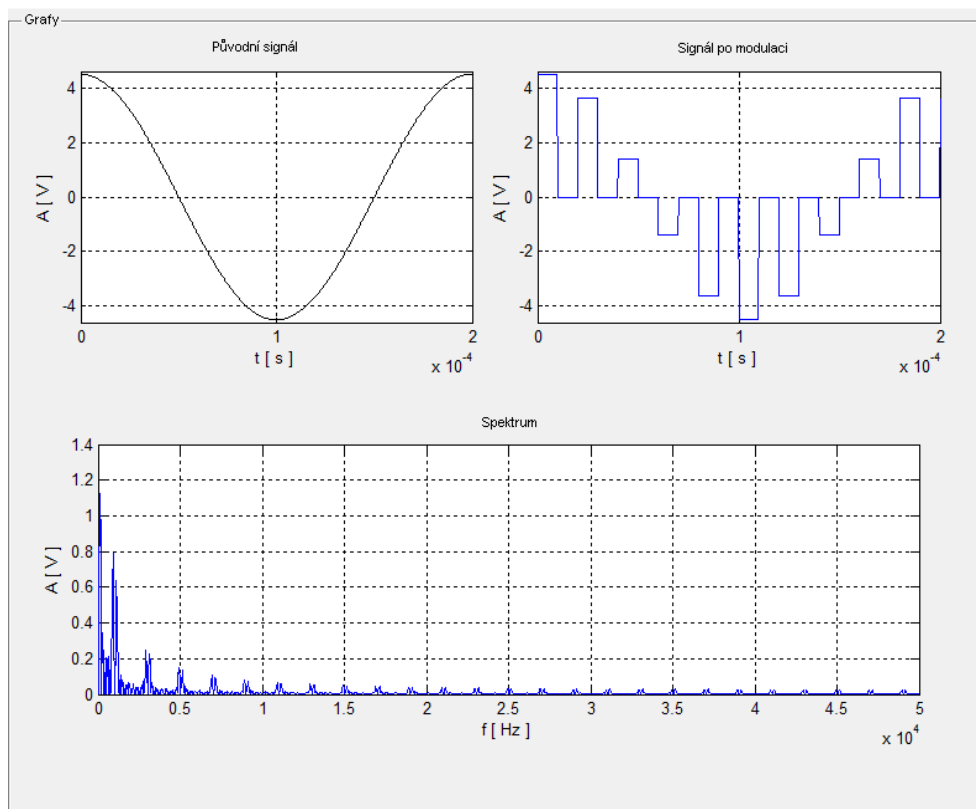
Tabulka 5 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.008	W
Střední hodnota	0	V

5.2.3 Uniformní PAM

U pulsní amplitudové modulační s uniformním vzorkováním použijeme stejné vstupní parametry jako u pulsní amplitudové modulační s věrným vzorkováním.

Vykreslení grafů a výpočet znovu potvrdíme tlačítkem „Vykreslení grafů“.



Obr. 26 - Grafy pro uniformní PAM

Tabulka 6 - Výkon a střední hodnota pro původní signál

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

Tabulka 7 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci

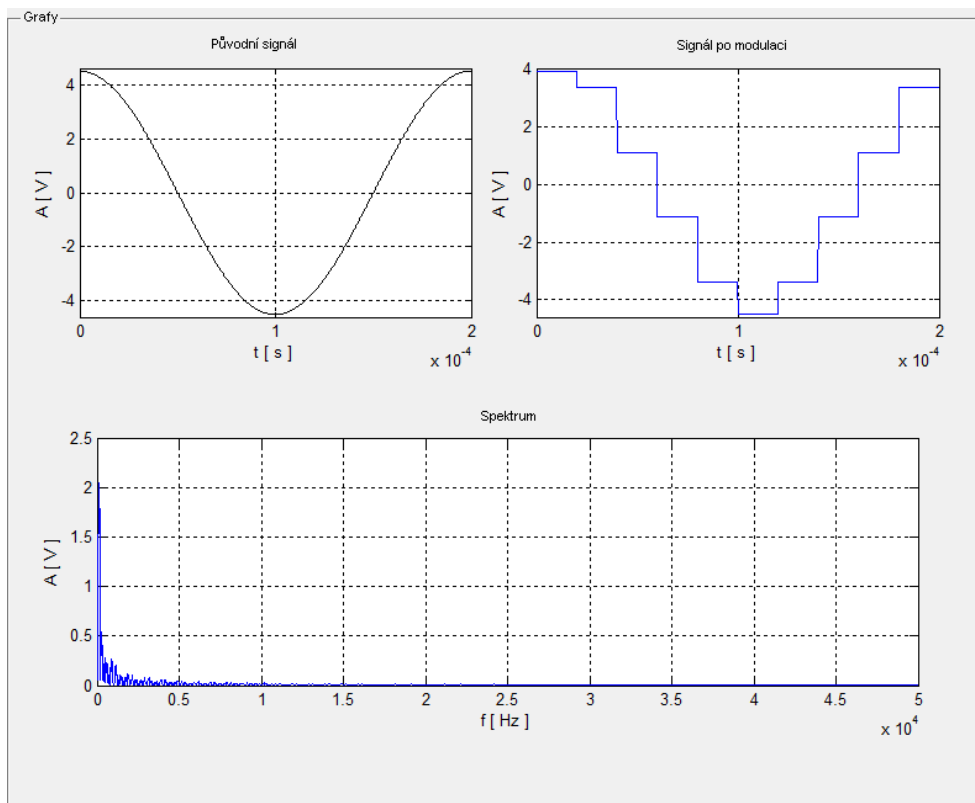
Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.008	W
Střední hodnota	0	V

5.2.4 QPAM

U kvantované pulsní amplitudové modulace se použijí podobné vstupní hodnoty jako v předchozím případě. Změna je v počtu bitů kódové skupiny. Tato vstupní hodnota nyní přibyla na seznam. Šířku pulsu si zde zvolíme 100%.

Tabulka 8 - Vstupní parametry pro QPAM

Vstupní parametr	Hodnota
Vstupní signál	$A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
Amplituda vstupního signálu	4.5V
Frekvence vstupního signálu	5KHz
Vzorkovací frekvence	50KHz
Impedance	600 Ω
Počet bitů kódové skupiny	4
Počet period	1
Šířka pulsu	100%



Obr. 27 – Grafy pro QPAM

Tabulka 9 - Výkon a střední hodnota pro původní signál

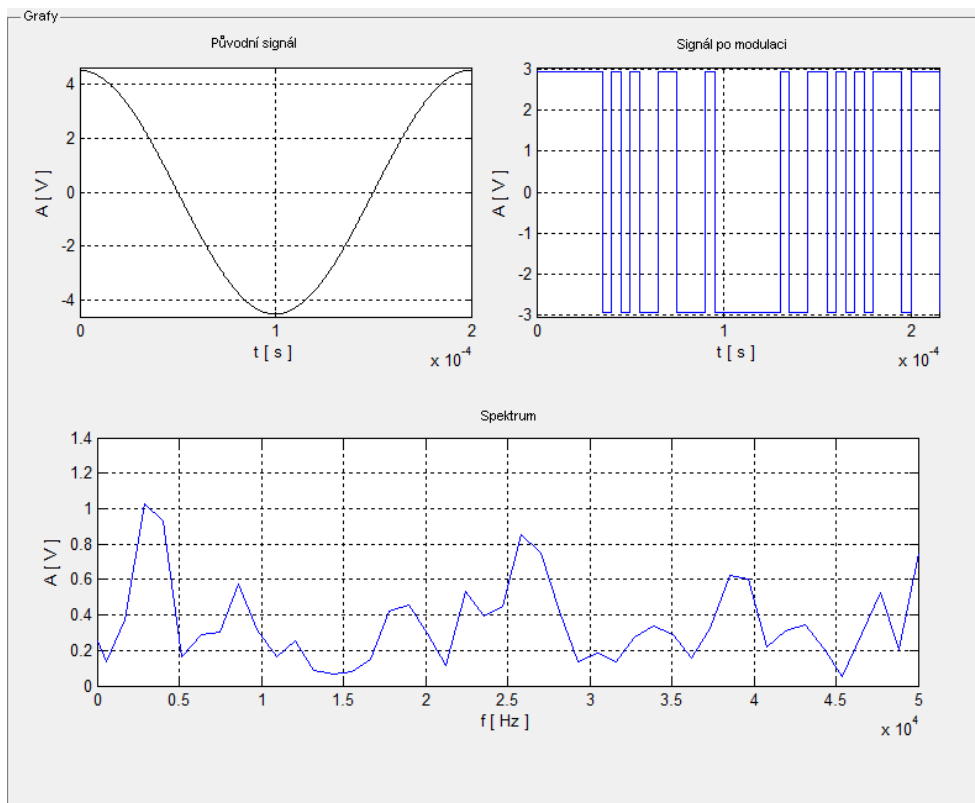
Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

Tabulka 10 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.014	W
Střední hodnota	0	V

5.2.5 Pulsní kódová modulace PCM

U této modulace ponecháme všechny vstupní hodnoty stejné jako v předchozím případě. PCM modulace počítá se stejným výkonem jako má QPAM, proto nyní nezadáváme už šířku pulsu.



Obr. 28 – Grafy pro PCM

Tabulka 11 - Výkon a střední hodnota pro původní signál

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

Tabulka 12 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci

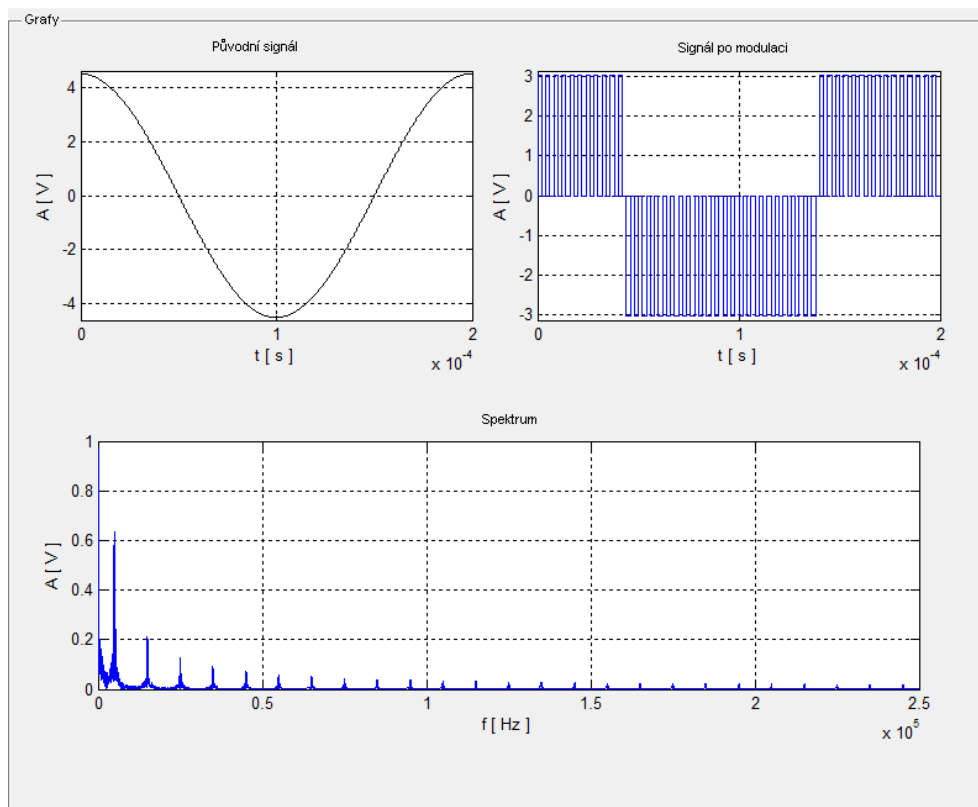
Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.014	W
Střední hodnota	0	V

5.2.6 Delta modulace DM

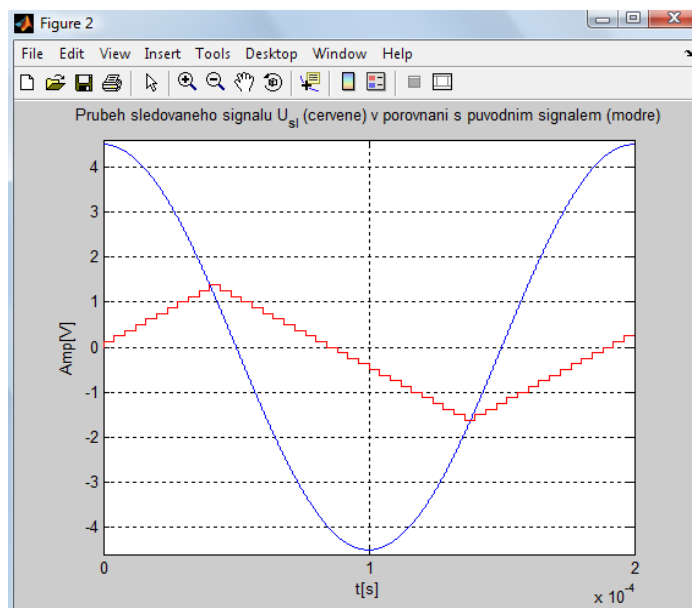
U této modulace nastavíme hodnoty podle tabulky 13. DM modulace počítá se stejným výkonem jako má QPAM, proto nyní nezadááme už šířku pulsu. Nastavíme ovšem velikost kroku u DM modulace.

Tabulka 13 - Vstupní parametry pro DM modulaci

Vstupní parametr	Hodnota
Vstupní signál	$A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$
Amplituda vstupního signálu	4.5V
Frekvence vstupního signálu	5KHz
Vzorkovací frekvence	250KHz
Impedance	600Ω
Velikost kroku	1/8
Počet period	1



Obr. 29 – Grafy DM modulace



Obr. 30 – Průběh sledovaného signálu U_{sl} (červeně)

Tabulka 14 - Výkon a střední hodnota pro původní signál

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

Tabulka 15 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.014	W
Střední hodnota	0	V

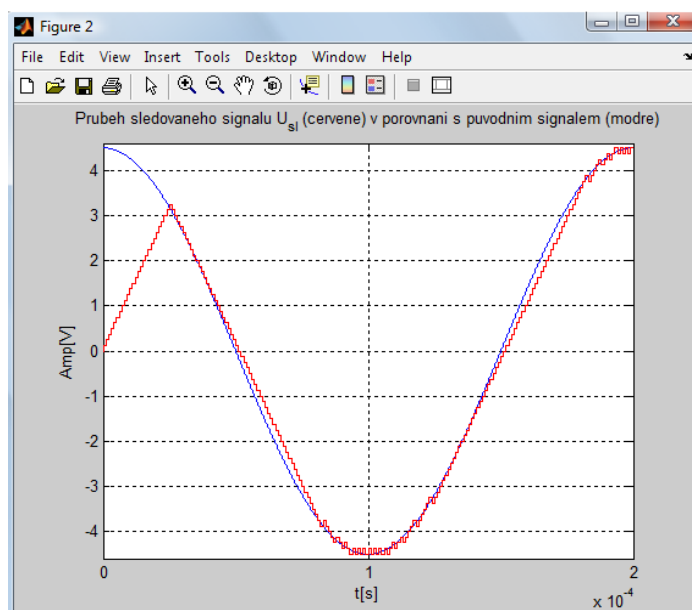
Pokud zvýšíme vzorkovací frekvenci na čtyřnásobek vzorkovací frekvence z tabulky 13, uvidíme na obr. 31, jak zásadní je velikost vzorkovací frekvence u DM modulace.

Když změníme velikost kroku z 1/8 na 1/2, je na obr. 32 vidět, že i velikost kroku je důležitá u DM modulace.

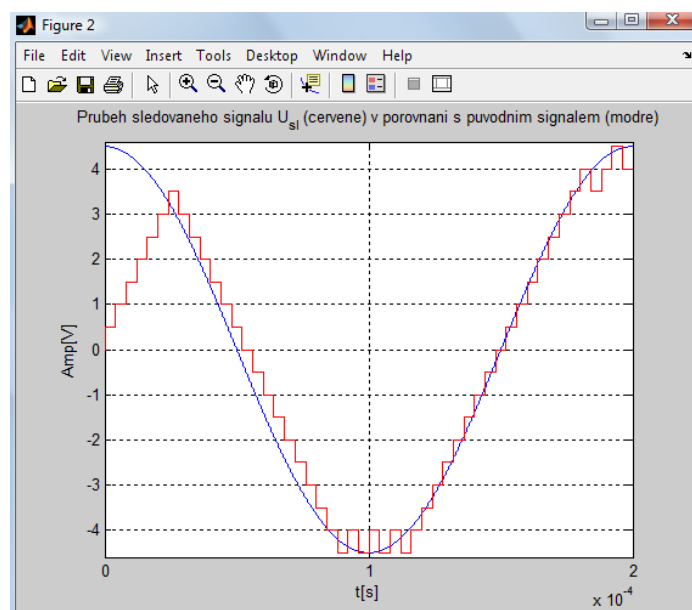
Při zvolení většího kroku, v tomto případě kroku o velikosti 1/2, lze věrněji popsat strmější průběh vstupního signálu (bez velkého zpoždění).

Naopak, jeli krok menší tak se bude hůře přizpůsobovat signálu. Sledovaný signál není schopen sledovat strmé průběhy vstupního signálu.

Nevýhoda u většího kroku nastane, když průběh vstupního signálu je málo strmý až plochý. Vzniká tzv. granulační šum. Ten lze ovlivnit právě velikostí kroku. Čím je krok menší, je menší i granulační šum.



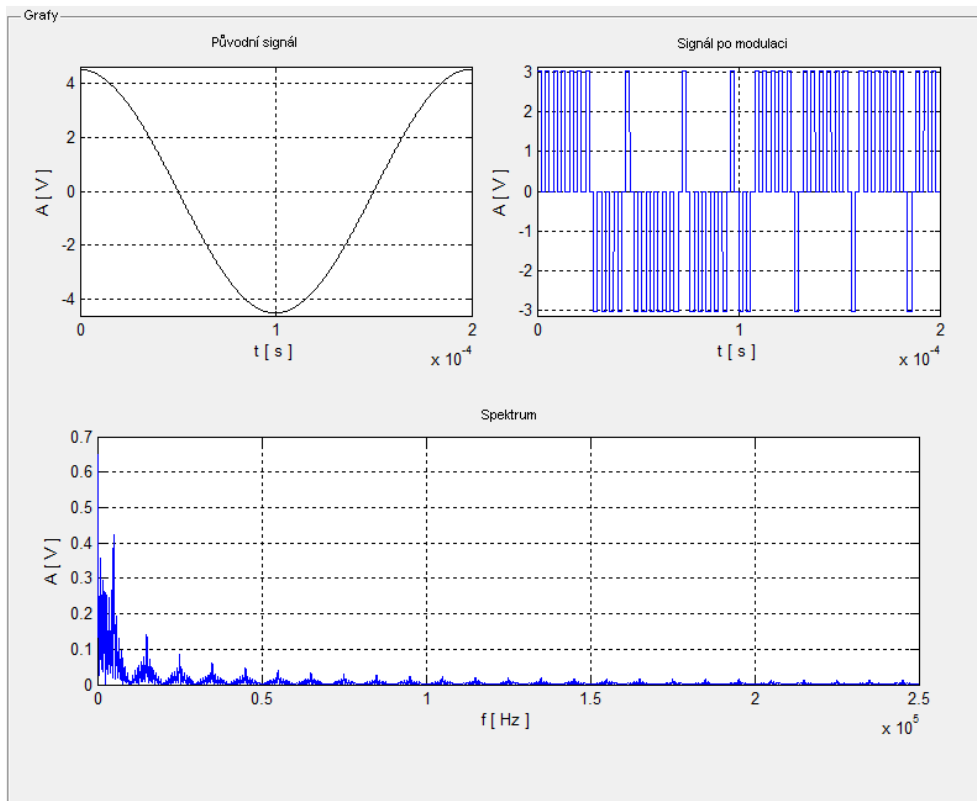
Obr. 31 - Průběh sledovaného signálu U_{sl} (červeně)



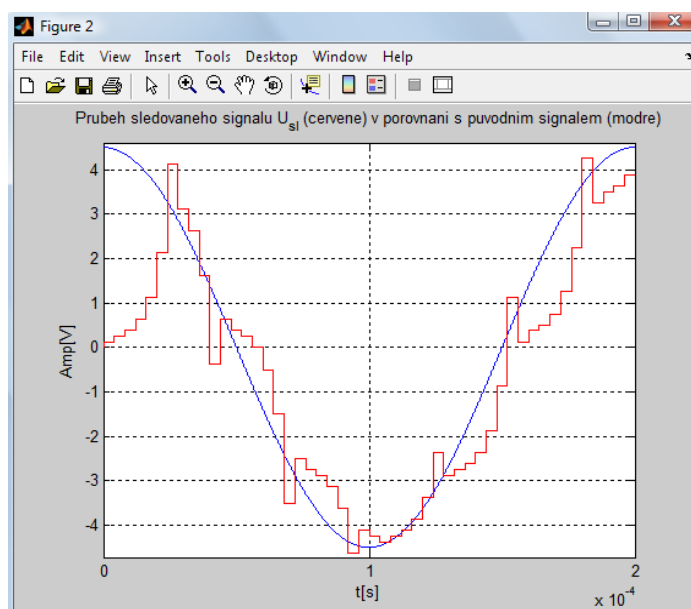
Obr. 32 - Velikost kroku 1/2 u DM modulace

5.2.7 Adaptivní delta modulace

Vstupní hodnoty se zadají stejné jako u DM modulace záměrně, aby byl vidět rozdíl mezi DM modulací a ADM modulací.



Obr. 33 – Grafy ADM



Obr. 34 - Průběh sledovaného signálu U_{sl} (červeně)

Tabulka 16 - Výkon a střední hodnota pro původní signál

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.017	W
Střední hodnota	0	V

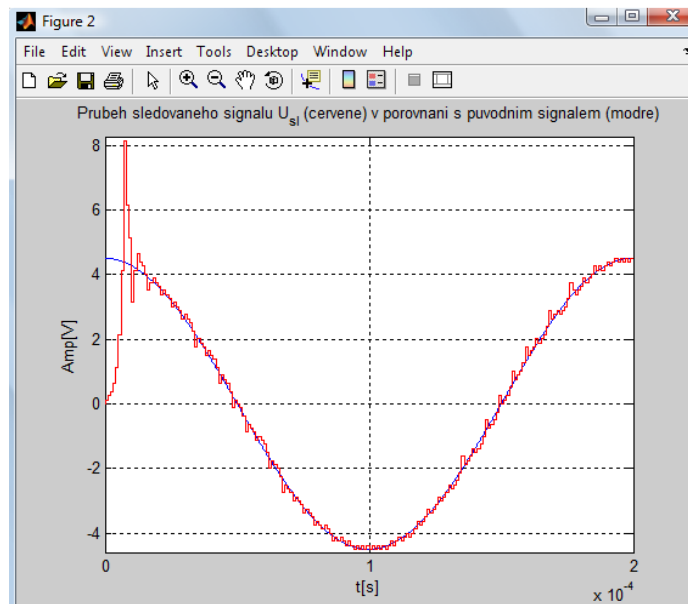
Tabulka 17 - Výkon a střední hodnota pro signál po modulaci

Vypočítané	Hodnota	Jednotky
Výkon	0.014	W
Střední hodnota	0	V

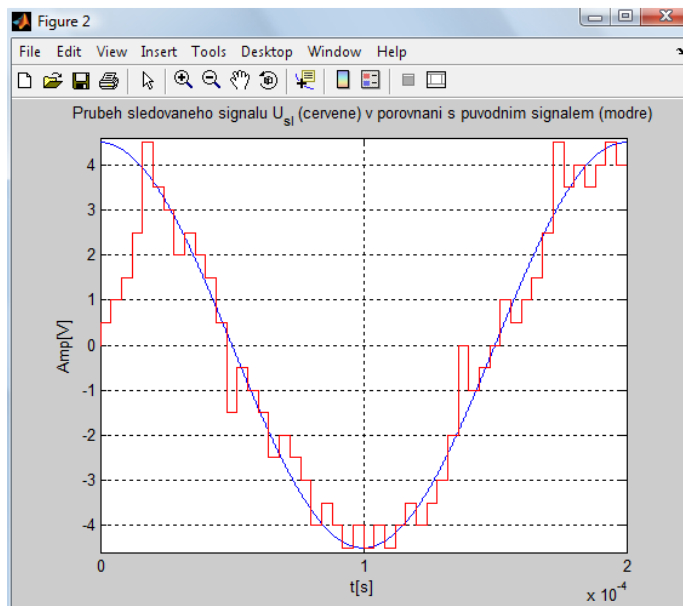
Pokud zvýšíme vzorkovací frekvenci na čtyřnásobek vzorkovací frekvence z tabulky 13, uvidíme na obr. 35, že u ADM modulace je velikost vzorkovací frekvence také důležitá. Ale v porovnání s DM modulací, je u DM modulace zásadní.

Když změníme velikost kroku z 1/8 na 1/2, je na obr. 36 vidět, že i velikost kroku je také důležitá u ADM modulace. U ADM modulace zvětšením kroku na 1/2, je také dosaženo lepšího sledování strmých průběhů signálu, jako u DM modulace. Mohou však nastat velké překmity při zvolení většího kroku.

Granulační šum je u ADM také závislý na velikosti kroku, ovšem krok u ADM se při pomalých změnách vstupního signálu zmenšuje, na rozdíl od DM modulace.



Obr. 35 - Průběh sledovaného signálu U_{sl} (červeně)



Obr. 36 - Velikost kroku 1/2 u ADM modulace

6 Závěr

Bakalářská práce shrnuje teoretické poznatky o diskretních modulacích v základním pásmu. Jmenovitě to jsou PAM s ideálním, věrným a uniformním vzorkováním, QPAM, PCM, DM a ADM modulace.

V praktické části se podařilo vytvořit software v grafickém uživatelském rozhraní programu MATLAB. Ten může libovolný vstupní signál modulovat všemi výše uvedenými modulačními metodami. Po zadání vstupních hodnot software zobrazuje časové průběhy původního a modulovaného signálu, frekvenční spektrum modulovaného signálu a vypočte střední hodnoty a výkony původního a modulovaného signálu. Průběhy a jejich zobrazení v grafech lze upravovat základními funkcemi jako například přiblížením grafu a následným vrácením původního zobrazení. Uživatel má možnost zapnout i vypnout mřížky u grafů nebo možnost pohybovat se v grafu. Program nabízí i uložení obrázku s příponou *.jpg, obsahující všechny tři grafy s průběhy. Uživatel může využít i volby načtení obrázku s příponou *.jpg, například pokud si chce zobrazit dříve uložené výsledné průběhy a porovnat je s jinými průběhy. V případě modulace DM a ADM je při vykreslení grafů i možnost volby zobrazení externího grafu s průběhem sledovaného signálu. Software je ošetřen i opatřením proti špatně zadané vstupní hodnotě. Konkrétně v případě záporně zadané vstupní hodnoty, nebo při nedodržení vzorkovací podmínky.

Při tvorbě PAM s ideálním vzorkováním nelze vytvořit ideální Diracovy impulsy. Pro simulaci je použit velmi úzký pravouhlý impuls. Proto se mohou výsledky výkonu, střední hodnoty a spektra lišit od ideálního případu. Výkon a střední hodnota signálu se u modulace PAM s ideálním vzorkováním nepočítá. Výkon by byl v ideálním případě nulový.

U PAM s věrným a uniformním vzorkováním je při zadání vstupních hodnot názorně vidět, jak pulsy kopírují modulační signál. V případě věrného vzorkování věrně a v případě uniformního pravouhlými vzorky.

U kvantované PAM se při zadání počtu bitů přiřadí diskretní vzorky nejbližší kvantované úrovni. Úrovně si zvolíme zadáním počtu bitů. Při vykreslení grafů se stejnými vstupními hodnotami jako u uniformní PAM je vidět, jak se diskretní vzorky přiřadí k nižším, nebo vyšším kvantizačním hladinám oproti uniformní PAM.

Pro výpočet velikosti napětí výstupů modulací PCM, DM a ADM je nastaveno, že se jejich výkony rovnají výkonu QPAM. U PCM modulace je při zadání vstupních hodnot na časovém průběhu signálu po modulaci vidět výstupní sled jedniček a nul. Při zadání stejných vstupních hodnot u DM modulace a ADM modulace je při dostatečné vzorkovací frekvenci vidět jak se ADM adaptuje na změny modulačního signálu rychleji než DM modulace. U DM modulace je zásadní velikost vzorkovací frekvence, na externích grafech s průběhem sledovaného signálu to lze vidět.

Software byl vytvořen za účelem použití při výuce týkající se impulsních modulací. K bakalářské práci je připojen i manuál, který slouží k rychlému vysvětlení funkcí programu.

Literatura

- [1] BEZDĚK, Miloslav. *Elektronika 1*. České Budějovice : Kopp, 2003. 271 s. ISBN 80-7232-171-4.
- [2] DOBEŠ, Josef; ŽALUD, Václav. *Moderní radiotechnika*. Praha : BEN, 2006. 768 s. ISBN 80-7300-132-2.
- [3] FAJKUS, Marcel. *Modulace signálu a jejich vliv na spektrum signálu*. Ostrava, 2009. 47 s. Bakalářská práce. VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [4] Pulzní modulace. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , last modified on 27. 6. 2011 [cit. 2011-08-08]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_k%C3%B3dov%C3%A1_modulace>.
- [5] ZAPLATÍLEK, Karel, DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB : začínáme se signály*. Praha : BEN, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0.
- [6] ZAPLATÍLEK, Karel, DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB : tvorba uživatelských aplikací*. Praha : BEN, 2004. 216 s. ISBN 80-7300-133-0.
- [7] NĚMEC, Zdeněk. *Přednášky z předmětu Přenos dat a informací – Pr5 – Impulzní modulace*. Univerzita Pardubice.

Přílohy

Na přiloženém CD jsou k dispozici všechny potřebné přílohy v elektronické podobě. Jmenovitě se na CD nachází software s manuálem, zdrojový kód a bakalářská práce.