

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza vybraných analogových metod modulace a
demodulace

Václav Vavroušek

Bakalářská práce

2011

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav VAVROUŠEK**
Osobní číslo: **I07480**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Analýza vybraných analogových metod modulace
a demodulace**
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 metod modulace a demodulace (AM, FM, PM), které se využívají pro přenos informací v analogových systémech.
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 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. května 2011



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



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 10. 5. 2011

Václav Vavroušek

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Janu Pidaničovi za odborný dozor a cenné rady v průběhu vytváření práce. Chtěl bych také poděkovat svojí rodině a svým přátelům za podporu během mého studia.

Anotace

Práce se věnuje analogovým modulacím a tvorbě softwaru, který je určen pro zobrazení časových průběhů a spekter. Teoretická část se zabývá jednotlivými modulacemi AM, FM, PM. Praktická část zahrnuje realizaci softwaru a jeho návod.

Klíčová slova

modulace, demodulace, AM, FM, PM

Title

The analysis of analog modulation and demodulation methods

Annotation

The work is devoted to analog modulation and development software that is designed to display the time continuous signal and spectra. The theoretical part deals with individual AM, FM, PM modulations. The practical part includes the implementation of software and its instructions.

Keywords

modulation, demodulation, AM, FM, PM

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
1 Úvod	11
2 Analogové modulace	12
2.1 Dělení analogových modulací	12
2.2 Princip analogových modulací	12
3 Amplitudová modulace AM	15
3.1 Frekvenční spektrum	16
3.2 Modulace DSB	17
3.2.1 Frekvenční spektrum	18
3.3 Modulace SSB	18
3.3.1 Frekvenční spektrum	19
3.4 Modulace QAM.....	19
4 Frekvenční modulace FM	21
4.1 Parametry frekvenční modulace FM	22
4.1.1 Frekvenční zdvih	22
4.1.2 Index frekvenční modulace	22
4.1.3 Deviační poměr.....	22
4.2 Úzkopásmová modulace FM_{NB}	22
4.3 Širokopásmová modulace FM_{BB}	23
5 Fázová modulace PM	25
5.1 Šířka pásma signálu PM	25
6 Praktická část	27
6.1 Popis softwaru	27
6.1.1 Výběr úpravy signálu	28
6.1.2 Parametry.....	28
6.1.3 Tlačítko „Vykreslení grafů“	29
6.1.4 Grafické okno „Průběhy grafů“	30
6.1.5 Tlačítko „Výpočty“	30
6.1.6 Export dat	30

6.1.7	Tlačítko „Import dat“	31
6.1.8	Menu	32
6.2	Průběhy a výsledky jednotlivých modulací a demodulací	33
6.2.1	Amplitudová modulace AM	33
6.2.2	Amplitudová modulace AM DSB-SC	34
6.2.3	Amplitudová modulace AM SSB	35
6.2.4	Amplitudová demodulace AM	36
6.2.5	Frekvenční modulace FM	37
6.2.6	Frekvenční demodulace FM	38
6.2.7	Fázová modulace PM	39
6.2.8	Fázová demodulace PM	40
7	Závěr	41
	Literatura	42
	Přílohy	43

Seznam zkratek

AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
PM	Phase Modulation
DSB-SC	Double Side Band – Supressed Carrier
SSB	Single Side Band
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
VSB	Vestigial Side Band
ISB	Individual Side Band
FM _{NB}	Frequency Modulation Narrow Band
FM _{BB}	Frequency Modulation Broad Band

Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Přehled analogových modulací	12
Obr. 2.2 – Modulační signál $s(t)$ a nosná vlna $u_c(t)$	13
Obr. 2.3 – Amplitudově modulovaný signál	14
Obr. 2.4 – Frekvenčně modulovaný signál.....	14
Obr. 2.5 – Fázově modulovaný signál	14
Obr. 3.1 – Frekvenční spektrum signálu AM	16
Obr. 3.2 – Frekvenční spektrum signálu DSB_{SC}	18
Obr. 3.3 – Frekvenční spektrum signálu SSB	19
Obr. 3.4 – Časový průběh signálu QAM	19
Obr. 4.1 – Besselovy funkce.....	23
Obr. 4.2 – Spektra signálu indexem modulace postupně $\beta = 0,2, \beta = 1, \beta = 5$	24
Obr. 6.1 – Náhled softwaru	27
Obr. 6.2 – Výběr úpravy signálu	28
Obr. 6.3 – Aktivace políček.....	29
Obr. 6.4 – Grafické okno	29
Obr. 6.5 – Export dat	30
Obr. 6.6 – Okno pro export dat.....	31
Obr. 6.7 – Okno pro import dat	31
Obr. 6.8 – Menu.....	32
Obr. 6.9 – Konec	32
Obr. 6.10 – Grafické okno modulace AM	33
Obr. 6.11 – Grafické okno modulace AM $DSB-SC$	34
Obr. 6.12 – Grafické okno modulace AM SSB.....	35
Obr. 6.13 – Grafické okno demodulace AM	36
Obr. 6.14 – Grafické okno modulace FM.....	37
Obr. 6.15 – Grafické okno demodulace FM.....	38
Obr. 6.16 – Grafické okno modulace PM.....	39
Obr. 6.17 – Grafické okno demodulace PM.....	40

Seznam tabulek

Tabulka 6.1 – Zadávané parametry	33
Tabulka 6.2 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	34
Tabulka 6.3 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM.....	34
Tabulka 6.4 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	35
Tabulka 6.5 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM DSB-SC.....	35
Tabulka 6.6 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	35
Tabulka 6.7 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM SSB.....	36
Tabulka 6.8 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	36
Tabulka 6.9 – Vypočítané hodnoty demodulovaného signálu AM.....	36
Tabulka 6.10 – Zadávané parametry	37
Tabulka 6.11 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	37
Tabulka 6.12 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu FM	38
Tabulka 6.13 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	38
Tabulka 6.14 – Vypočítané hodnoty demodulovaného signálu FM.....	38
Tabulka 6.15 – Zadávané parametry	39
Tabulka 6.16 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	39
Tabulka 6.17 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu PM	40
Tabulka 6.18 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu	40
Tabulka 6.19 – Vypočítané hodnoty demodulovaného signálu PM.....	40

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá tvorbou softwaru, který bude schopný vytvořit z libovolného vstupního signálu amplitudově, frekvenčně a fázově modulovaný signál. Součástí práce bude i demodulace výše uvedených analogových modulací. Pomocí zadaných parametrů bude vykreslovat jednotlivé časové průběhy a spektra. Software se může využívat při výpočtu středních hodnot a výkonu. Pro uživatele nabízí dvě užitečné funkce. Jsou to import a export dat.

Teoretická část se nejdříve týká analogových modulací. Je zde jejich popis a rozdělení. Dále je popsán princip analogových modulací, včetně AM, FM, PM. Následující kapitola podrobněji popisuje amplitudovou modulaci AM a její další varianty, jako jsou modulace DSB, SSB, QAM, ISB VSB. Jsou zde uvedena frekvenční spektra popisovaných modulací. Další kapitola je věnována frekvenční modulaci FM, kde je uveden její podrobný popis. V této kapitole jsou dále zmíněny některé parametry frekvenční modulace FM, úzkopásmová a širokopásmová modulace. Poslední kapitola teoretické části se soustředí na fázovou modulaci PM a její podrobnější popis.

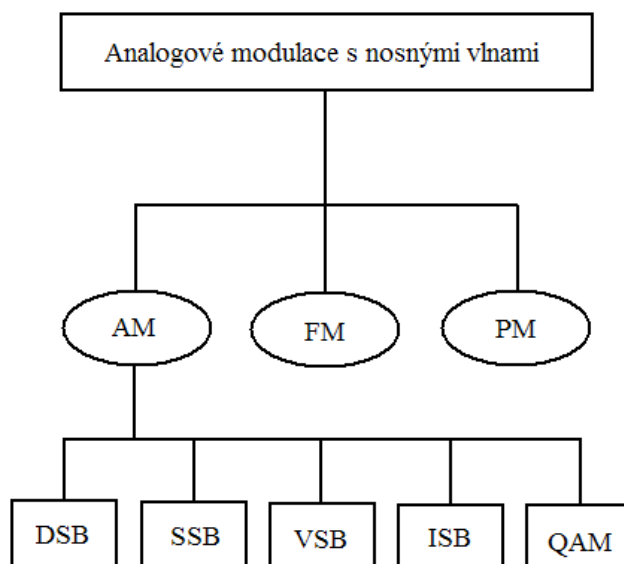
Praktická část obsahuje návod k softwaru, grafické průběhy jednotlivých modulací a demodulací a výsledky středních hodnot a výkonů. Návod slouží k seznámení s programem a poskytuje uživateli potřebné informace, jak s ním správně pracovat. Pro případ, že by uživatel neměl k dispozici tuto práci, bude vytvořen manuál. Tento program bude využíván především při výuce.

2 Analogové modulace

Analogové modulace patří mezi nejstarší systémy rádiové komunikace. Nejdříve vznikla analogová amplitudová modulace AM a později se připojila analogová frekvenční modulace FM a fázová modulace PM.

AM modulaci a její varianty používáme u starších systémů, mezi které patří rozhlas AM, telekomunikační technika, přenos obrazového signálu televize. FM modulace se využívá i v náročnějších aplikacích, kam patří stereofonní rozhlas FM, systémy analogové družicové televize, k přenosu akustického signálu u televizního vysílání. V praxi se PM modulace používá zřídka. Její využití je například na družicových spojích.

2.1 Dělení analogových modulací



Obr. 2.1 – Přehled analogových modulací

2.2 Princip analogových modulací

„Modulací se rozumí proces, kterým se mění charakter vhodného nosného signálu za pomoci modulujícího signálu.“ [6]

Provádí se v zařízení, které se nazývá modulátor. Signál, který nese užitečnou informaci a vstupuje do modulátoru, se nazývá modulační signál. Modulační signál se v modulátoru vynásobí s nosnou vlnou, která uloží signál do vyšší kmitočtové oblasti značené přeložené pásmo. Výstupem modulátoru je modulovaný signál.

Při analogové modulaci modulujeme obecným modulačním signálem $s(t)$ vhodný parametr nosné vlny $u_c(t)$.

Modulovat lze libovolný signál, dále však budeme z důvodu jednoduchosti používat harmonický signál $s(t)$, který vyjádříme tvarem

$$s(t) = A_m \cos(2 \pi f_m t + \varphi) \quad (2.1)$$

kde A_m – amplituda modulačního signálu, [V]

f_m – modulační kmitočet, [Hz]

t – čas, [s]

φ – počáteční fáze, [°]

Nosná vlna je dána vztahem

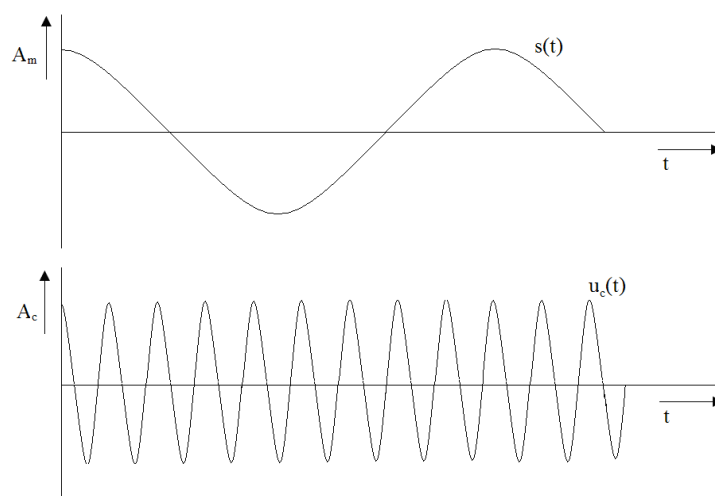
$$u_c(t) = A_c \cos(2 \pi f_c t + \varphi) \quad (2.2)$$

kde A_c – amplituda nosné vlny, [V]

f_c – kmitočet nosné, [Hz]

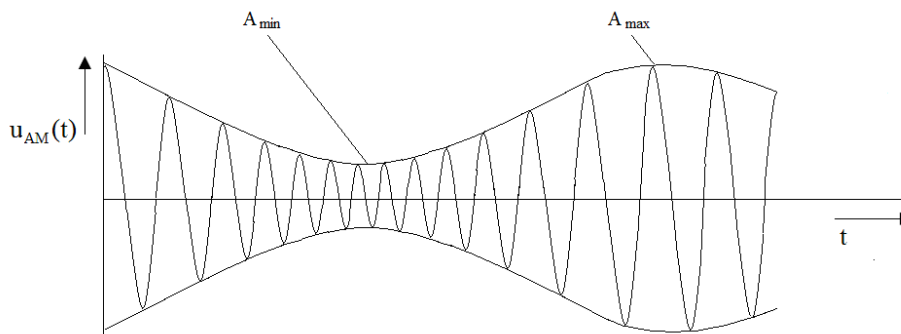
t – čas, [s]

φ – počáteční fáze, [°]



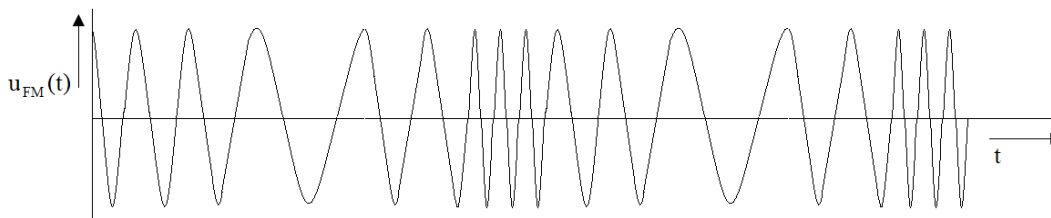
Obr. 2.2 – Modulační signál $s(t)$ a nosná vlna $u_c(t)$

Amplitudovou modulaci AM získáme změnou amplitudy modulované nosné vlny A_c lineárně s modulačním signálem $s(t)$, ale počáteční fáze φ vůči fázi nedomulované nosné vlny zůstává konstantní.



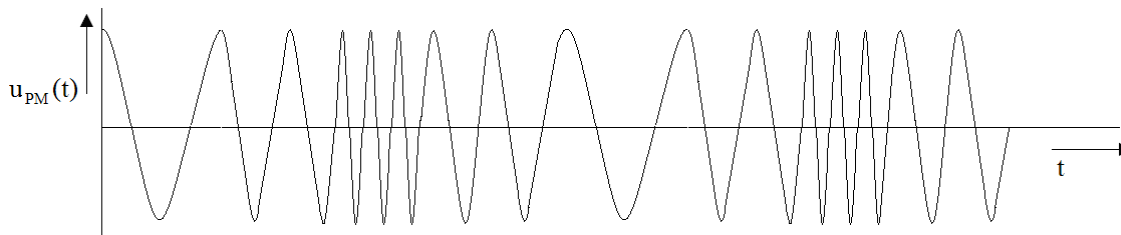
Obr. 2.3 – Amplitudově modulovaný signál

Frekvenční modulace FM vznikne změnou kmitočtu modulované nosné vlny f_c lineárně s modulačním signálem $s(t)$ oproti kmitočtu nedomulované nosné vlny a amplituda A_c zůstává konstantní.



Obr. 2.4 – Frekvenčně modulovaný signál

Pokud budeme měnit počáteční fázi φ modulované nosné vlny s modulačním signálem $s(t)$ vůči fázi nedomulované nosné vlny a amplituda A_c bude konstantní, vznikne fázová modulace PM.



Obr. 2.5 – Fázově modulovaný signál

3 Amplitudová modulace AM

Následující část bude představovat popis modulace s oběma postranními pásmy a nepotlačenou nosnou vlnou, která je znázorněna na obr. 2.3.

U amplitudové modulace se používá obecný signál, ale dále však budeme pro názornost uvažovat pouze harmonický signál $s(t)$. Harmonický signál $s(t)$ a nosná vlna $u_c(t)$ jsou dány vztahy

$$s(t) = A_m \cos(2 \pi f_m t), \quad u_c(t) = A_c \cos(2 \pi f_c t) \quad (3.1), (3.2)$$

Modulace AM vzniká tak, že se mění okamžitá amplituda modulované nosné vlny okolo své střední hodnoty A_c lineárně s harmonickým signálem $s(t)$. Časový průběh modulovaného napětí $u_{AM}(t)$ vyjadřuje tento vztah

$$u_{AM}(t) = [A_c + A_m \cos(2 \pi f_m t)] \cos(2 \pi f_c t) = [1 + m_a \cos(2 \pi f_m t)] \cos(2 \pi f_c t) \quad (3.3)$$

kde $m_a = A_m/A_c$ je index amplitudové modulace nebo-li hloubka modulace. Hloubka modulace nesmí být větší než jedna, aby nedocházelo k přemodulování a znehodnocení přenášeného signálu. Další podmínkou je, že frekvence nosné vlny f_c musí být mnohem vyšší než největší modulační kmitočet $f_{m \max}$. Pokud hloubku modulace vyjádříme v procentech, platí tento vztah $m_a[\%] = m_a \cdot 100[\%]$.

Index amplitudové modulace m_a lze v praxi určit z maximální A_{max} a minimální amplitudy A_{min} modulovaného signálu vztahem, který se dá vyjádřit z obr. 2.3

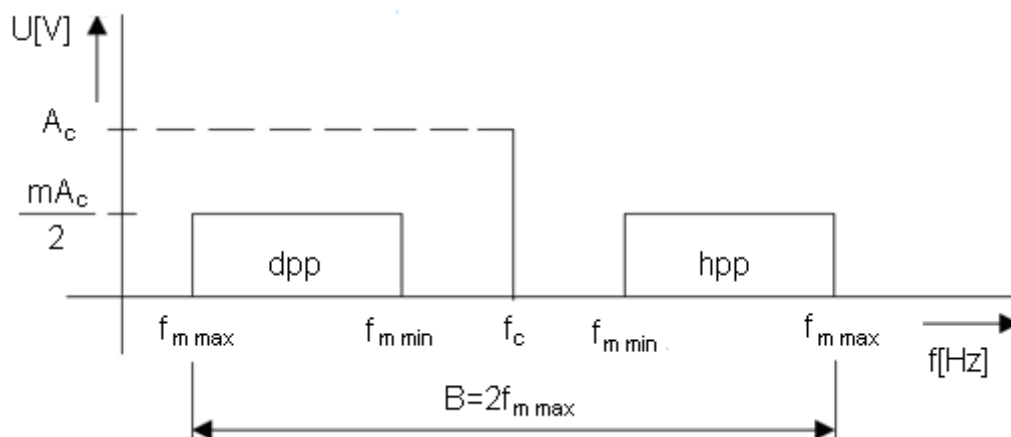
$$m_a = \frac{(A_{max} - A_{min})}{(A_{max} + A_{min})} \quad (3.4)$$

3.1 Frekvenční spektrum

Frekvenční spektrum $F_{AM}(f)$ modulovaného signálu AM určíme Fourierovou transformací vztahu (3.3). Po provedení Fourierovy transformace bude výsledný vztah vypadat následovně

$$F_{AM}(f) = \Phi[s(t)] = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{m_a A_c}{2} [M(f - f_c) - M(f + f_c)] \quad (3.5)$$

Spektrum, které je zobrazeno na obr. 3.1, se skládá ze samostatné nosné vlny o amplitudě A_c a ze dvou postranních složek nazývaných horní postranní pásmo (hpp) a dolní postranní pásmo (dpp) o amplitudách $A_m/2 = m_a A_c/2$, které leží symetricky na každé straně nosné vlny. Nosná vlna je složena ze dvou funkcí delta, které jsou situovány na frekvence $\pm f_c$ a vážené činitelem $A_c/2$. Spektra modulačního signálu $M(f)$ transformované na frekvence $\pm f_c$ a vážené činitelem $(m_a A_c)/2$ představují horní a dolní postranní pásmo. Harmonický signál má největší kmitočet $f_{m \max}$ a nejmenší kmitočet $f_{m \min}$. Šířka pásma je uvedena vztahem $B = 2f_{m \max}$.



Obr. 3.1 – Frekvenční spektrum signálu AM

3.2 Modulace DSB

U AM modulace představuje nosná vlna podstatnou část vysílacího výkonu. Z tohoto důvodu se objevila myšlenka vytvořit takovou modulaci AM, která by zcela nebo částečně potlačila nosnou vlnu. Tato varianta se nazývá amplitudová modulace s oběma postranními pásmy. Zde se zaměříme na modulaci DSB se zcela potlačenou nosnou a budeme jí značit DSB_{SC}.

Modulovaný signál lze nejjednodušeji získat vynásobením nosné vlny $u_c(t)$ s harmonickým signálem $s(t)$, tedy

$$u_{DSB}(t) = u_c(t) s(t) = A_c \cos(2 \pi f_c t) s(t) \quad (3.6)$$

Jestliže je obecný modulační signál $s(t)$ periodický, vyjádříme ho na základě Fourierova rozvoje jako součet harmonických složek s frekvencemi f_m a fázemi Φ_m .

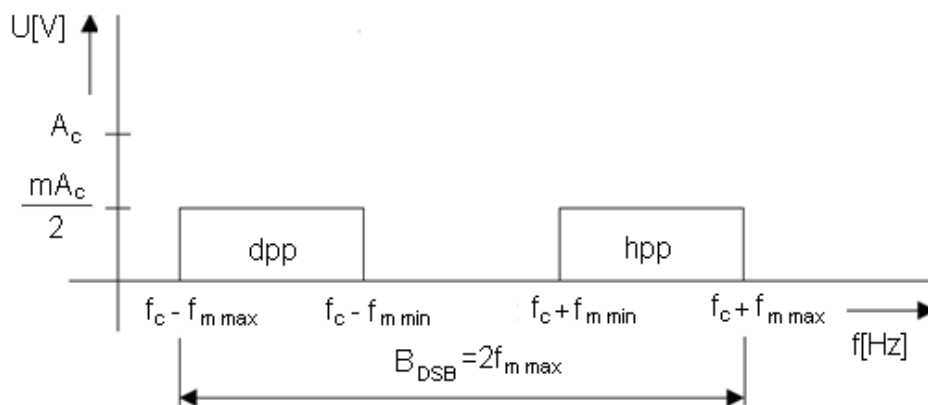
$$s(t) = \sum_{m=1}^n U_m \cos(2 \pi f_m t + \Phi_m) \quad (3.7)$$

Modulační signál obsahuje nejnižší harmonickou $f_1 = f_{min}$ a nejvyšší harmonickou $f_n = f_{m max}$. Kompletní signál DSB vznikne po dosazení rovnice (3.7) do vztahu (3.6).

$$\begin{aligned} u_{DSB}(t) &= A_c \cos(2 \pi f_c t) A_m \cos(2 \pi f_m t) = \\ &= \frac{A_c A_m}{2} \cos 2 \pi (f_c - f_m) t + \frac{A_c A_m}{2} \cos 2 \pi (f_c + f_m) t \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.2.1 Frekvenční spektrum

Spektrum signálu DSB je podobné jako výsledné spektrum signálu AM, akorát v tomto spektru není nosná vlna. Šířka pásma signálu DSB je dána vztahem $B_{DSB} = 2 f_{m \max}$.



Obr. 3.2 – Frekvenční spektrum signálu DSB_{SC}

3.3 Modulace SSB

Přestože se u amplitudových modulací přenáší jedna zpráva v obou postranních pásmech, můžeme na vysílači potlačit nejenom nosnou, ale i jedno postranní pásmo. Takto vzniká amplitudová modulace s jedním potlačeným pásmem SSB.

Modulované napětí $u_{SSB}(t)$ vznikne vynásobením nosné vlny $u_c(t)$ s harmonickým signálem $s(t)$ jako ve vztahu (3.6). Poté přičteme nebo odečteme harmonický signál $\bar{s}(t)$ vynásobený s nosnou vlnou $u_c(t)$. Harmonický signál $\bar{s}(t)$ byl podroben Hilbertově transformaci. U Hilbertovy transformace se k vektoru s kladným směrem rotace vytvoří vektor, který je posunut o $-\pi/2$, k vektoru se záporným směrem rotace vytvoří vektor posunutý o $\pi/2$.

$$u_{SSB}(t) = \frac{A_c}{2} [s(t) \cos(2 \pi f_c t) \pm \bar{s}(t) \cos(2 \pi f_c t)] \quad (3.9)$$

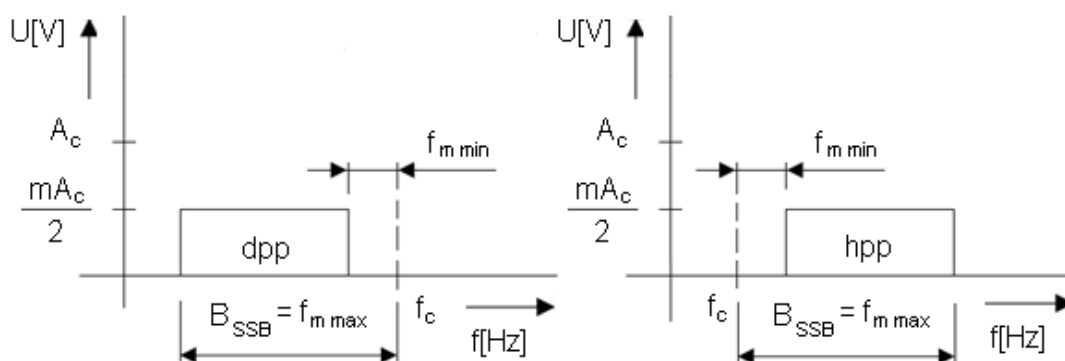
Znaménko plus znamená přenos dolního postranního pásma a znaménko minus přenos horního postranního pásma.

Signál SSB můžeme nejjednodušeji vygenerovat pomocí filtrační metody. Její princip je založen na využití modulátoru AM a následnou pásmovou propustí horního nebo dolního postranního pásma, které je přenášeno. Přechody u těchto filtrů jsou velmi strmé,

protože nesmí být potlačeny nejnižší kmitočty a zbývající postranní pásmo musí být co nejvíce utlumeno.

3.3.1 Frekvenční spektrum

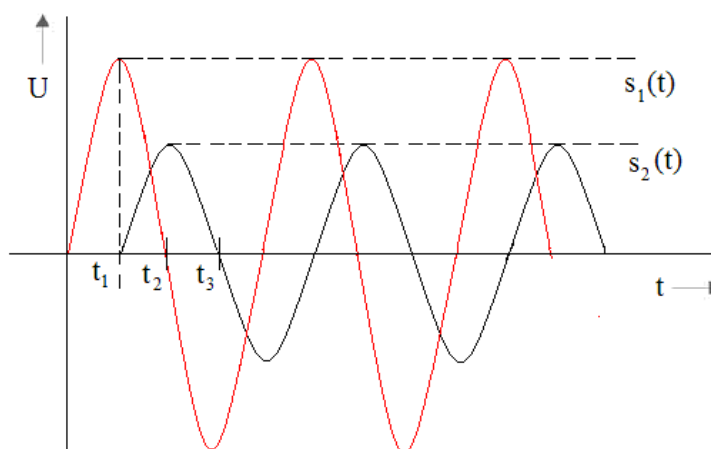
Spektrum signálu má šířku $B_{SSB} = f_{m \max}$. Při přenosu dolního postranního pásma se spektrum posune níže od nosné vlny a při přenosu horního postranního pásma se posune výše od nosné vlny.



Obr. 3.3 – Frekvenční spektrum signálu SSB

3.4 Modulace QAM

U této modulace se používají dvě nosné vlny se stejným kmitočtem a většinou i stejnou amplitudou, ale jejich fázový posuv je 90° . Každá nosná vlna je modulována vlastním modulačním signálem $s_1(t)$ a $s_2(t)$.



Obr. 3.4 – Časový průběh signálu QAM

Často se používá modulace QAM, která má obě nosné potlačeny a přenášejí se jenom postranní pásma. Tímto vzniká kombinovaný modulační způsob QAM/DSB. Signál $u_{QAM}(t)$ vytvoříme pomocí vztahu (3.6) tak, že nejdříve vynásobíme nosnou vlnu $u_c(t)$ modulačním signálem $s_1(t)$ a sečteme s nosnou vlnou $u_c(t)$ vynásobenou modulačním signálem $s_2(t)$. Výsledný signál modulace QAM vypadá následovně

$$u_{QAM}(t) = U_c \cos(2 \pi f_c t) s_1(t) + U_c \sin(2 \pi f_c t) s_2(t) \quad (3.10)$$

4 Frekvenční modulace FM

Frekvenční modulace FM jsou v porovnání s amplitudovou modulací výhodnější. Patří do kategorie úhlových modulací. Je znázorněna na obr. 2.4.

Signál s úhlovou modulací vyjádříme obecným vztahem

$$u_m(t) = A_c \cos[\Phi_i(t)] \quad (4.1)$$

kde A_c – konstantní amplituda nosné vlny, [V]

$\Phi_i(t)$ – okamžitá fáze modulované nosné vlny, [°]

U frekvenční modulace se okamžitá frekvence $f_i(t)$ modulovaného signálu rovná součtu konstantní frekvence f_c nemodulované nosné vlny a časově proměnné složky, přímo úměrné modulačnímu napětí $s(t)$, tedy

$$f_i(t) = f_c + k_{FM} s(t) \quad (4.2)$$

kde k_{FM} – frekvenční citlivost modulátoru, [Hz/V]

Integrací vztahu (4.2) podle t a vynásobením hodnotou 2π vznikne vztah pro okamžitou fázi signálu FM

$$\Phi_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_{FM} \int_0^t s(t) dt \quad (4.3)$$

Dosazením vztahu (4.3) do rovnice (4.1) získáme obecný vztah pro frekvenčně modulovaný signál v časové oblasti

$$u_{FM}(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_{FM} \int_0^t s(t) dt \right] \quad (4.4)$$

4.1 Parametry frekvenční modulační FM

4.1.1 Frekvenční zdvih

Jeden z parametrů, který se používá u frekvenční modulační je frekvenční zdvih Δf . Můžeme ho zapsat vztahem $\Delta f = k_{FM} A_m$. Ten odpovídá maximální odchylce okamžité frekvence modulované vlny od základní frekvence nosné vlny f_c , při dané amplitudě A_m modulačního signálu. Frekvenční zdvih je přímo úměrný amplitudě a nezávisí na modulační frekvenci f_m .

4.1.2 Index frekvenční modulační

Index frekvenční modulační se značí symbolem β . Definujeme ho jako poměr frekvenčního zdvihu Δf ku modulační frekvenci f_m , $\beta = \Delta f / f_m$. Je to fázový zdvih signálu FM a představuje maximální odchylku okamžité fáze $\Phi_i(t)$ modulovaného signálu od fáze nedomulované nosné vlny $2\pi f_c t$. Index frekvenční modulační β charakterizuje signál FM při sinusové modulaci.

4.1.3 Deviační poměr

Frekvenční modulační FM dále používá parametr zvaný deviační poměr D . Je vhodný pro nesinusové modulační $s(t)$. Je definován jako poměr maximálního frekvenčního zdvihu Δf_{max} k maximální frekvenci $f_{m max}$, která je obsažena v nesinusovém modulačním signálu a lze zapsat $D = \Delta f_{max} / f_{m max}$. Deviační poměr je pro každý systém dán FM konstantou.

4.2 Úzkopásmová modulační FM_{NB}

Představuje signál s jediným harmonickým modulačním signálem. Při úzkopásmové modulaci FM_{NB} musí být splněna podmínka $\beta < 1$. Pak platí tento vztah

$$u_{FM}(t) \approx U_c [\cos(2\pi f_c t) - \beta \sin(2\pi f_m t) \sin(2\pi f_c t)] = \quad (4.5)$$

$$= U_c \cos(2\pi f_c t) - \frac{U_c \beta}{2} \cos 2\pi(f_c - f_m) t + \frac{U_c \beta}{2} \cos 2\pi(f_c + f_m) t \quad (4.6)$$

Vztah (4.6) udává podobu frekvenčního spektra, které je složeno z nedomulované nosné vlny a dvou symetrických postranních složek, vzdálených od nosné o frekvenci $\pm f_m$. Výslednice obou postranních složek je fázově pootočená o 90° vůči nosné vlně. Šířka pásma rádiového kanálu je $B_{FMNB} \approx 2 f_{m max}$.

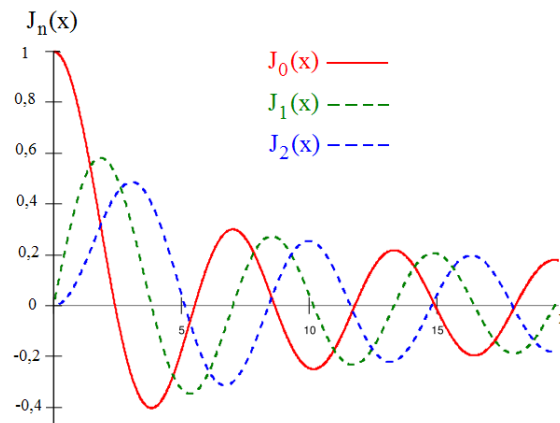
4.3 Širokopásmová modulace FM_{BB}

Podmínka širokopásmové modulace je $\beta > 1$. Hledané spektrum signálu FM_{BB} při harmonické modulaci získáme z těchto vztahů

$$\begin{aligned}
 u_{FM}(t) = & J_0(\beta) \cos(2 \pi f_c t) - J_1(\beta)[\cos(2 \pi f_c - 2 \pi f_m) t - \cos(2 \pi f_c + 2 \pi f_m) t] + \\
 & + J_2(\beta)[\cos(2 \pi f_c - 2 \cdot 2 \pi f_m) t - \cos(2 \pi f_c + 2 \cdot 2 \pi f_m) t] - \\
 & - J_3(\beta)[\cos(2 \pi f_c - 3 \cdot 2 \pi f_m) t - \cos(2 \pi f_c + 3 \cdot 2 \pi f_m) t] + \dots + \\
 & + J_n(\beta)[\cos(2 \pi f_c - n \cdot 2 \pi f_m) t - \cos(2 \pi f_c + n \cdot 2 \pi f_m) t]
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

kde $J_n(\beta)$ – Besselova funkce 1. druhu, argumentu β a řádu n

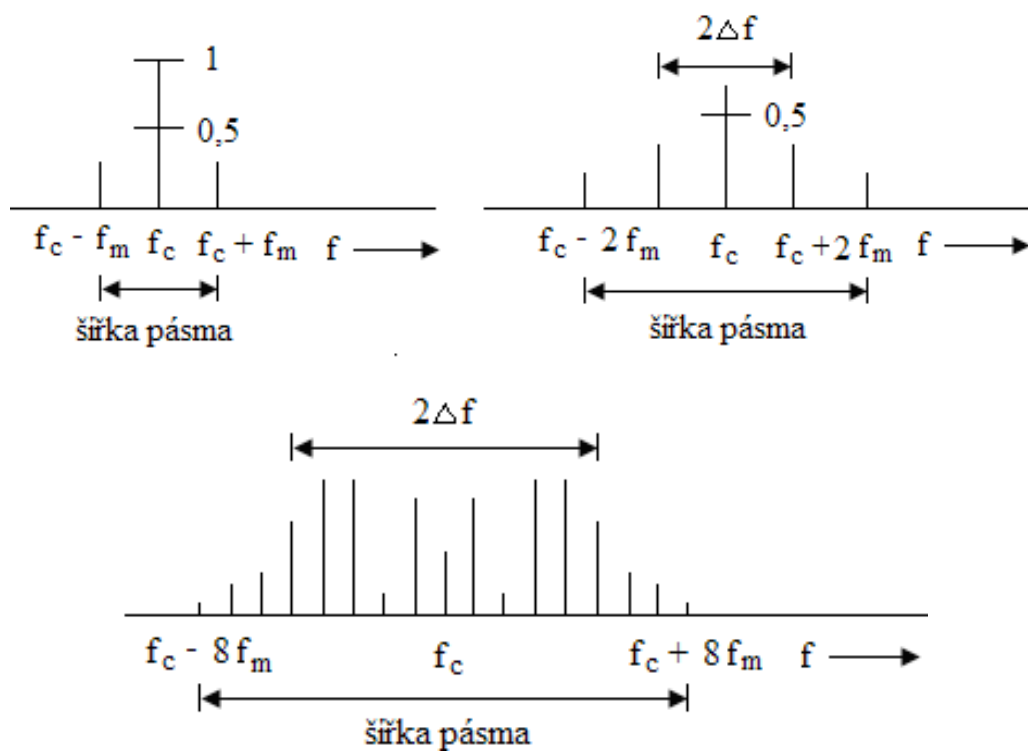
Besselovy funkce můžeme vidět na obr. 4.1.



Obr. 4.1 – Besselovy funkce[6]

Signál FM obsahuje nekonečně mnoho postranních složek, které jsou mezi sebou vzdáleny o modulační kmitočet $f_m = \omega_m / 2 \pi$. Při zvyšování indexu modulace β a řádu n Besselových funkcí se zmenšují amplitudy jednotlivých složek.

Na obr. 4.2 můžeme vidět spektra signálů s modulačním kmitočtem f_m a při indexech modulace $\beta = 0,2, \beta = 1, \beta = 5$, dosažených změnou modulačního napětí A_m a při stále stejném kmitočtu f_m . Při indexu modulace $\beta = 0,2$, což je úzkopásmová modulace, je šířka pásma rovna dvojnásobku modulačního kmitočtu. Pokud je $\beta > 1$, značí to širokopásmovou modulaci a šířka pásma se přibližuje dvojnásobku frekvenčního zdvihu.



Obr. 4.2 – Spektra signálu indexem modulace postupně $\beta = 0, 2, \beta = 1, \beta = 5$ [6]

5 Fázová modulace PM

Fázová modulace FM, nalezneme ji na obr. 2.5, spadá do kategorie úhlových modulací, kde se okamžitá fáze $\Phi_i(t)$ modulovaného signálu rovná součtu fázového úhlu $2\pi f_c t$ nemodulované nosné vlny a časově proměnné složky $\varphi(t)$. Ta je přímo úměrná modulačnímu napětí $s(t)$, tedy

$$\Phi_i(t) = 2\pi f_c t + \varphi(t) = 2\pi f_c t + k_{PM} s(t) \quad (5.1)$$

kde k_{PM} – fázová citlivost modulátoru PM, [rad/V]

Fázově modulovaný signál je dán vztahem

$$u_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)] = A_c \cos[2\pi f_c t + k_{PM} s(t)] \quad (5.2)$$

5.1 Šířka pásma signálu PM

Protože jsou časové průběhy signálů FM a PM podobné, jsou podobná i jejich kmitočtová spektra. Jediným rozdílem je, že se u modulace PM při změně modulačního kmitočtu f_m a konstantní amplitudy modulačního napětí A_m mění odstup spektrálních čar, ale amplituda je stále stejná. U modulace FM je oproti modulaci PM rozdíl v tom, že se při změně f_m mění odstup i amplituda spektrálních čar. Šířku pásma B_{PM} u modulace PM vyjádříme takto

$$B_{PM} \approx 2 f_{m \max} (1 + k_{PM}) = 2 f_{m \max} \left(1 + \frac{\beta_{PM}}{A_m} \right) \quad (5.3)$$

kde $\beta_{PM} = k_{PM} A_m$

Aby při demodulaci signálu PM nedošlo k fázové nejistotě, musí index fázové modulace β_{PM} splňovat podmínku $\beta_{PM} \leq \pi$, kde $\pi = 180^\circ$. Potom budou případné změny fáze v rozmezí $\pm\pi$. Pro úzkopásmovou modulaci, která je označována PM_{NB} , platí tato

podmínka $\beta_{PM} \ll \pi$. Jestliže je podmínka splněna, vyjádříme šířku pásma úzkopásmového signálu PM pomocí vztahu $\beta_{PM} \approx 2 f_{m \max}$.

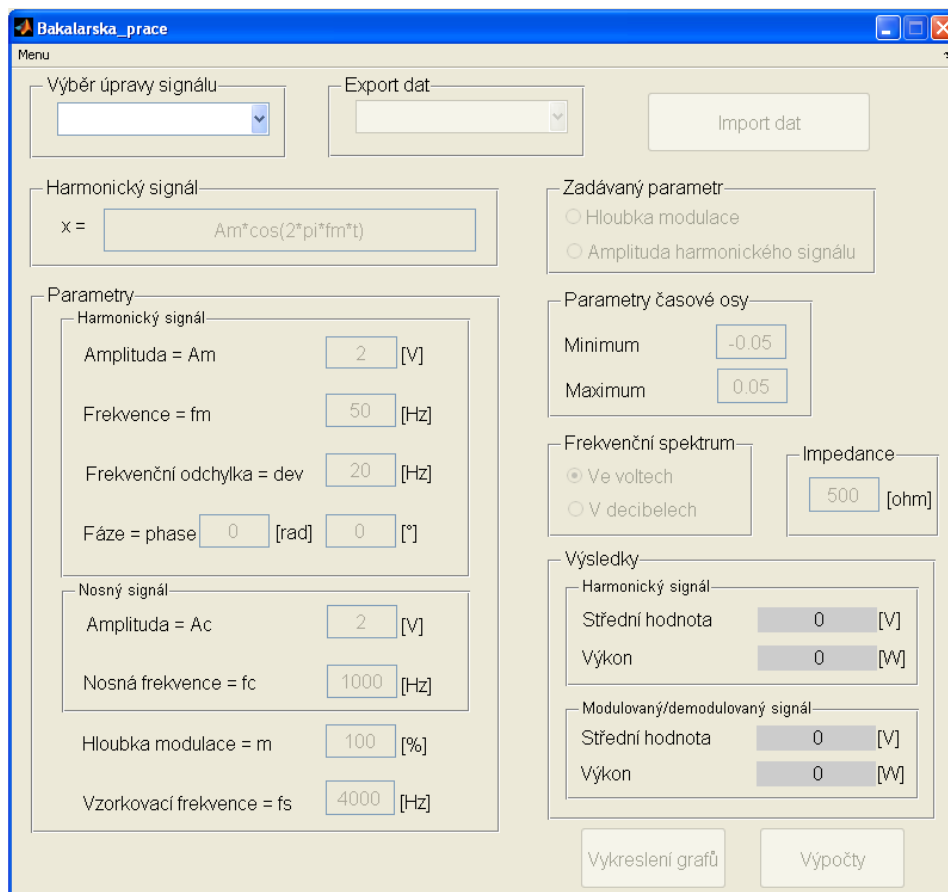
Nevýhoda fázové modulace PM je, že demodulaci signálu PM můžeme vytvořit pouze za pomoci referenční nosné vlny, která lze získat jenom velmi obtížně. Další nevýhodou jsou špatné šumové vlastnosti.

6 Praktická část

Praktická část spočívá ve vytvoření softwaru v programu Matlab. Software podle libovolně zadaných parametrů zobrazuje časové průběhy a frekvenční spektrum jednotlivých modulací a demodulací. Počítá také jejich střední hodnotu a výkon. Mezi další funkce patří import a export dat.

6.1 Popis softwaru

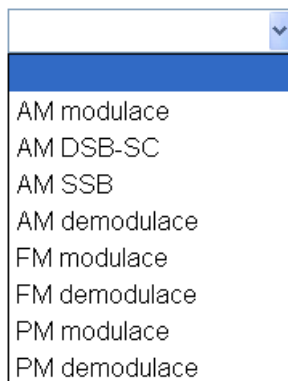
Následující část bude věnována popisu softwaru, který nalezneme na obr. 6.1. Popíšeme si funkce jednotlivých částí, abychom věděli, jak správně postupovat při jeho používání.



Obr. 6.1 – Náhled softwaru

6.1.1 Výběr úpravy signálu

Po spuštění softwaru si nejprve vybereme rozkliknutím nabídky v panelu „Výběr úpravy signálu“, jakou operaci se signálem provedeme. Na výběr máme z několika možností. Ty se nachází na obr. 6.2. Výběrem některé z modulací nebo demodulací se aktivují potřebné parametry pro danou operaci. Aktivují se také tlačítka „Vykreslení grafů“ a „Import dat“.



Obr. 6.2 – Výběr úpravy signálu

6.1.2 Parametry

Pokud máme vybranou operaci, kterou se chystáme provést, můžeme zadat potřebné parametry. Nejdříve zaškrtneme v panelu „Zadávaný parametr“ jednu z možností. Na výběr máme dvě varianty. Jsou to hloubka modulace a amplituda harmonického signálu. Při zaškrtnutí některé z variant se aktivuje příslušné políčko. Poté zadáme průběh harmonického signálu a jeho parametry, které jsou frekvence (f_m), amplituda (A_m) nebo hloubka modulace. U posledních dvou parametrů záleží na tom, který si zvolíme. Pro FM modulaci a demodulaci se navíc používá frekvenční odchylka. Modulace a demodulace PM zase navíc využívá fázi. Tu lze zadávat buď ve stupních nebo v radiánech. Dále musíme zadat parametry nosného signálu. Jsou to amplituda (A_c) a frekvence (f_c). K vykreslení signálu je potřebná ještě vzorkovací frekvence. Ta udává počet vzorků za sekundu. Panel pojmenovaný „Parametry časové osy“ slouží k zadání minimální a maximální hodnoty časové osy. Průběh frekvenčního spektra může být zobrazen ve voltech nebo v decibelech. K výběru některé z těchto možností se používá přepínací tlačítko frekvenční spektrum.

Aktivaci některých políček si můžeme prohlédnout na obr. 6.3. Zvolil jsem AM modulaci a zaškrtnul políčko hloubka modulace. Poté se aktivovala potřebná políčka.

Parametry

Harmonický signál

Amplituda = A_m [V]

Frekvence = f_m [Hz]

Frekvenční odchylka = dev [Hz]

Fáze = phase [rad] [°]

Nosný signál

Amplituda = A_c [V]

Nosná frekvence = f_c [Hz]

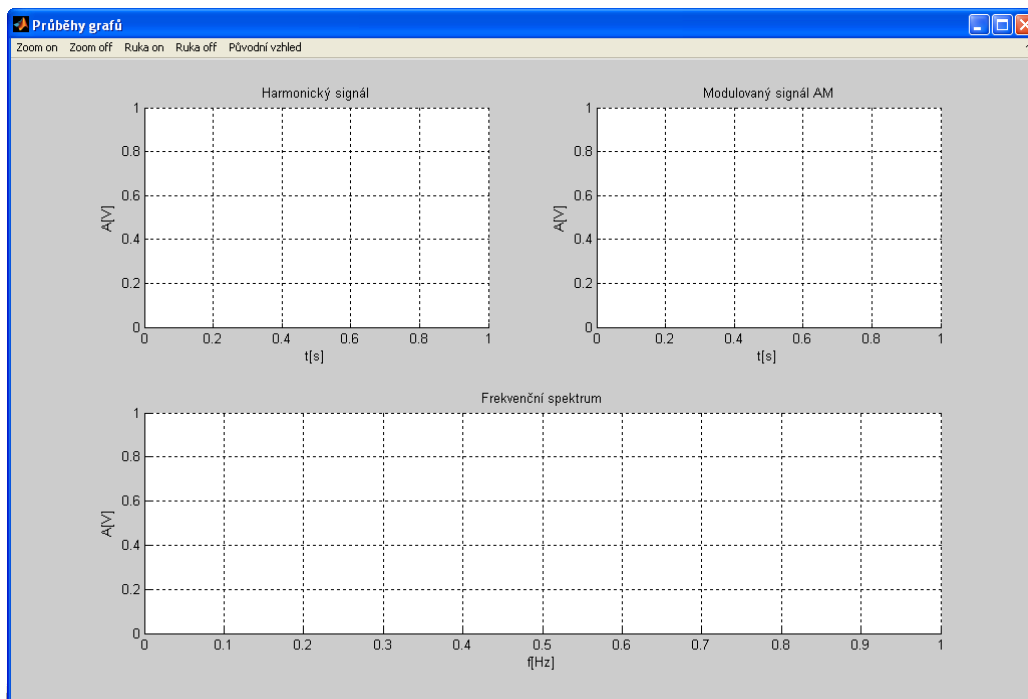
Hloubka modulace = m [%]

Vzorkovací frekvence = f_s [Hz]

Obr. 6.3 – Aktivace políček

6.1.3 Tlačítko „Vykreslení grafů“

Tlačítko pojmenované „Vykreslení grafů“ se nachází v pravé spodní části softwaru, viz obr. 6.1. Po správném zadání všech důležitých parametrů se stisknutím tlačítka zobrazí grafické okno nazvané „Průběhy grafů“, o kterém je napsáno více v následující kapitole. K nahlédnutí je na obr. 6.4. Stisknutím tlačítka se aktivuje parametr impedance a další funkce softwaru, mezi které patří export dat a tlačítko nazvané „Výpočty“.



Obr. 6.4 – Grafické okno

6.1.4 Grafické okno „Průběhy grafů“

Grafické okno, nacházející se na obr. 6.4, je složeno ze tří grafů. V levé horní části grafického okna vidíme průběh harmonického signálu, který jsme si sami zadali. Pravou horní část zaujímá graf, kde je vykreslen průběh jednotlivých modulací a demodulací (AM, FM, PM). Spodní část grafického okna patří frekvenčnímu spektru.

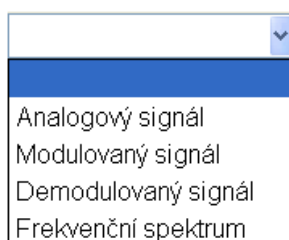
Pro úpravy jednotlivých grafů je připraven panel nástrojů s několika funkcemi. Důležitá je funkce zoom. Tu aktivujeme kliknutím na „Zoom on“. Je vhodná především pro přiblížení jakékoliv části grafu. Funkci vypneme stisknutím „Zoom off“. Další funkce je ruka. Používá se tak, že uchopíme graf a můžeme s ním pohybovat ve všech směrech. Kliknutím na „Ruka on“ a „Ruka off“ se funkce aktivuje, respektive vypne. Jestliže potřebujeme vrátit graf do původní polohy a velikosti, musíme ho označit a poté stisknout funkci „Původní vzhled“.

6.1.5 Tlačítko „Výpočty“

Tlačítko „Výpočty“ se používá pro výpočet středních hodnot a výkonů. Tyto veličiny počítá u harmonického signálu a modulovaného nebo demodulovaného signálu. Pro výpočet výkonu musíme zadat velikost impedance.

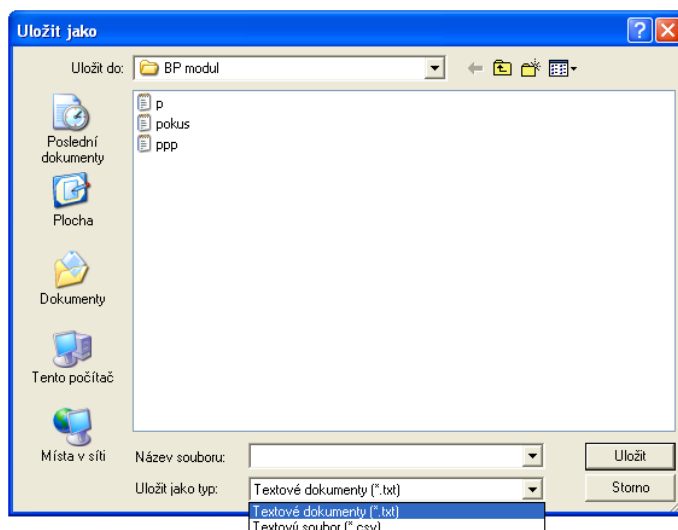
6.1.6 Export dat

Export dat může sloužit například k pozdějšímu zpracování hodnot. Rozkliknutím nabídky v panelu pojmenovaném „Export dat“ se zobrazí čtyři možnosti. Jsou zobrazeny na obr. 6.5.



Obr. 6.5 – Export dat

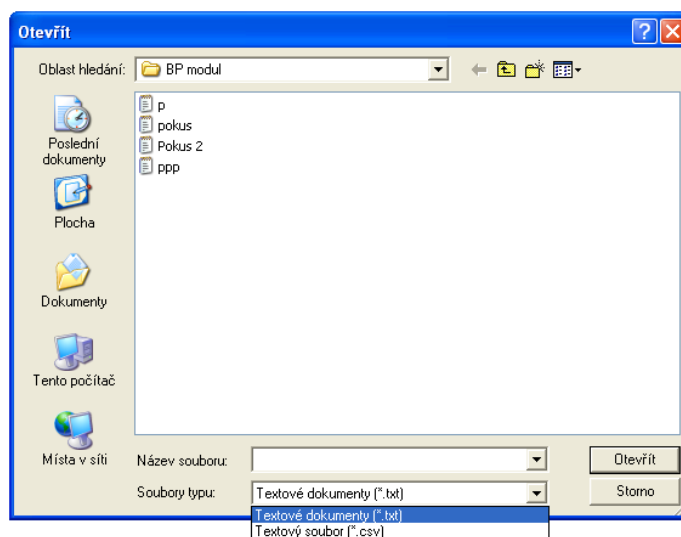
Vybereme si jednu z možností a po kliknutí na ni se otevře okno pro export dat. Software umožňuje ukládat data do dvou typů souborů. Jsou to textový dokument s příponou .txt a textový soubor s příponou .csv. Po vyplnění názvu a výběru souboru si zvolíme, kam budeme soubor ukládat (např. plocha). Poté stiskneme tlačítko uložit.



Obr. 6.6 – Okno pro export dat

6.1.7 Tlačítko „Import dat“

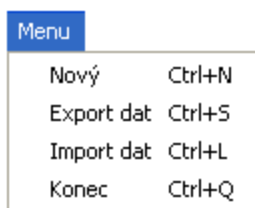
Tuto funkci může uživatel používat, jestliže potřebuje modulovat nebo demodulovat data, která jsou uložena v souborech s příponami .txt nebo .csv. Uživatel si nejdříve vybere, jak potřebuje signál upravit (AM modulace, FM modulace,...). Stisknutím tlačítka „Import dat“ se objeví okno pro import dat, viz obr. 6.7. Nalezneme si požadovaný soubor. Potom dvojklikem na název souboru nebo označením souboru a stisknutím tlačítka „Otevřít“ vznikne grafické okno s výslednými grafy.



Obr. 6.7 – Okno pro import dat

6.1.8 Menu

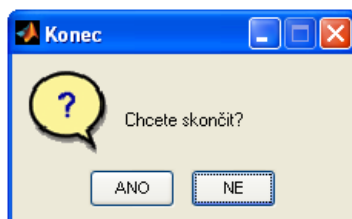
Menu obsahuje dvě nabídky, náhled na obr. 6.8.



Obr. 6.8 – Menu

První nabídka je „Nový“. Uživatel ji může využívat pro vynulování všech hodnot softwaru. Zavolat tuto funkci lze pomocí klávesové zkratky Ctrl+N. Další nabídky jsou Export a Import dat, o kterých již bylo napsáno výše.

Pokud uživatel nepotřebuje dále pracovat s programem, slouží k jeho ukončení druhá nabídka nazvaná „Konec“. Kliknutím na funkci „Konec“ se objeví okno, viz obr. 6.9. Na výběr je ze dvou možností. Pokud se opravdu chystáme program ukončit, stiskneme možnost „ANO“. Jestli potřebujeme dále s programem pracovat, klikneme na možnost „NE“.



Obr. 6.9 – Konec

6.2 Průběhy a výsledky jednotlivých modulací a demulací

V rozbalovací nabídce „Výběr úpravy signálu“ budeme postupně vybírat jednotlivé metody a ukazovat si jejich parametry a průběhy signálů a spekter. Výsledky střední hodnoty a výkonu jsou zaokrouhlené na dvě desetinná místa.

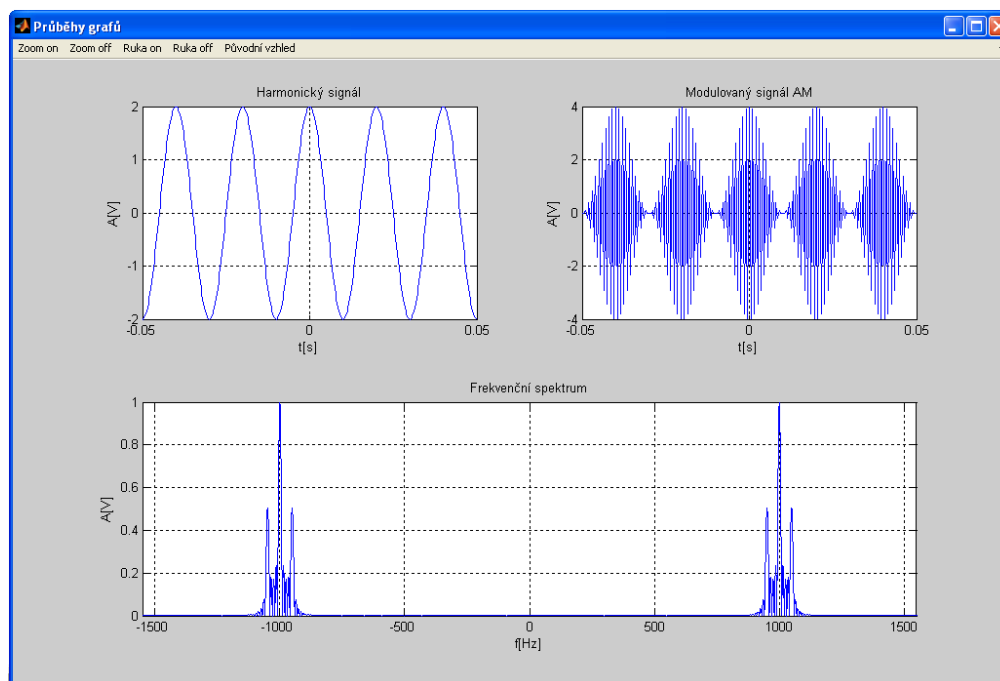
6.2.1 Amplitudová modulace AM

Pro zobrazení modulovaného signálu AM jsem použil parametry, které nalezneme v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1 – Zadávané parametry

Zadávaný parametr	Hodnota
Amplituda harmonického signálu	2V
Frekvence harmonického signálu	50Hz
Amplituda nosného signálu	2V
Frekvence nosného signálu	1000Hz
Hloubka modulace	100%
Vzorkovací frekvence	4000Hz
Harmonický signál	$A_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)$
Impedance	50Ω

Po stisknutí tlačítka „Vykreslení grafů“ se zobrazí grafické okno.



Obr. 6.10 – Grafické okno modulace AM

Dále se také vypočítá výkon a střední hodnota harmonického signálu, viz tabulka 6.2. V tabulce 6.3 nalezneme hodnoty modulovaného signálu AM.

Tabulka 6.2 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

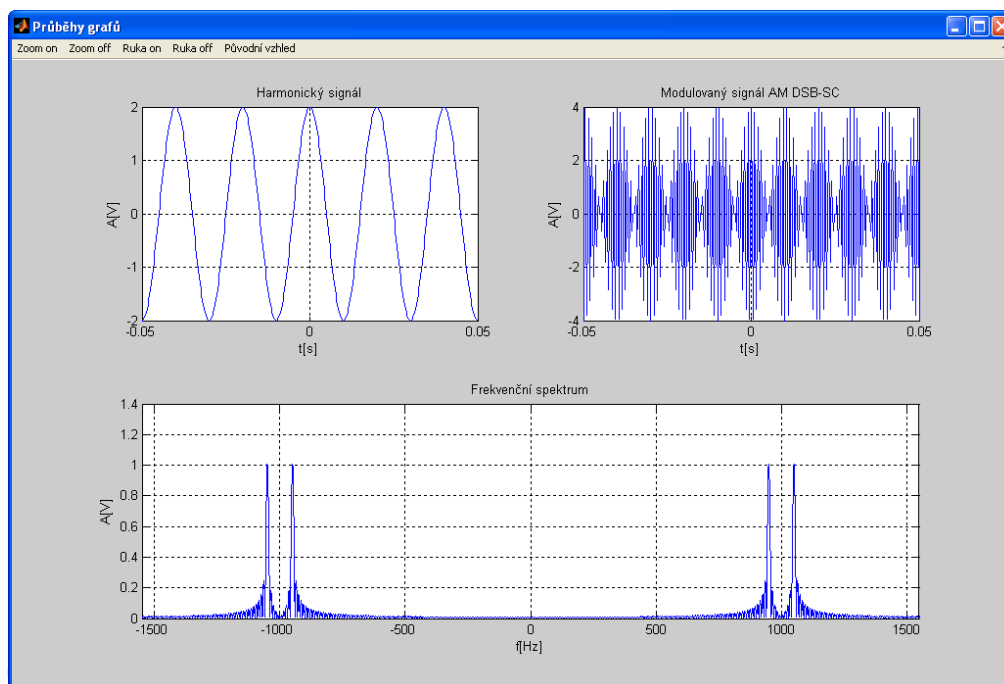
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.3 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,06	W

6.2.2 Amplitudová modulace AM DSB-SC

U amplitudové modulace AM DSB-SC jsem zvolil stejné parametry jako v předchozím případě. Nalezneme je v tabulce 6.1. Po zadání všech potřebných parametrů se stisknutím tlačítka „Vykreslení grafů“ zobrazí dialogové okno, které se nachází na obr. 6.11. Vypočítanou střední hodnotu a výkon vidíme v tabulkách 6.4 a 6.5.



Obr. 6.11 – Grafické okno modulace AM DSB-SC

Tabulka 6.4 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

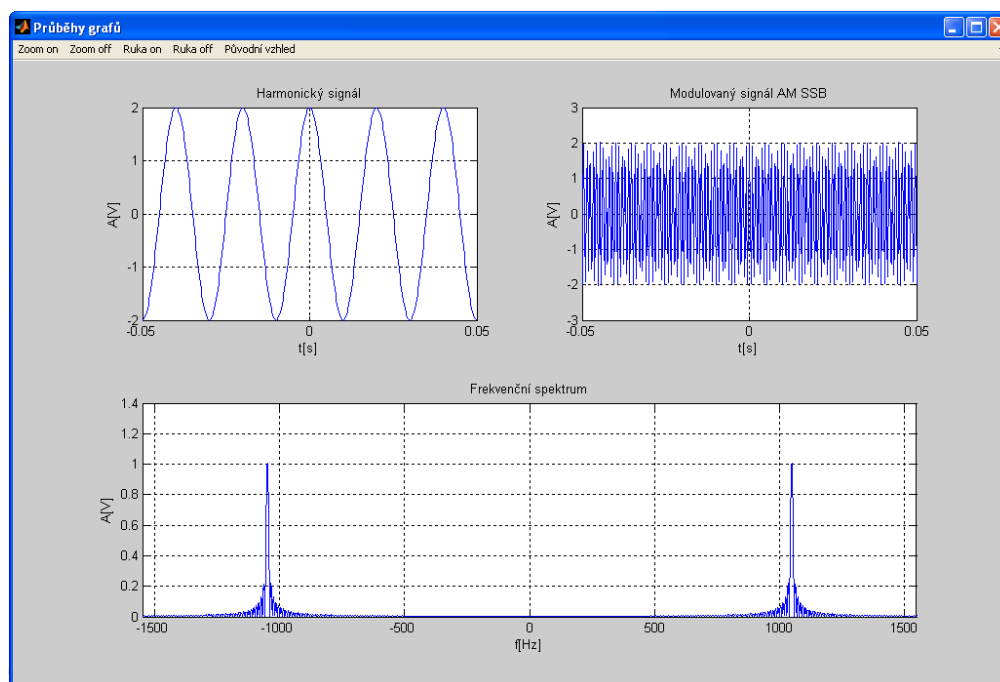
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.5 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM DSB-SC

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,08	W

6.2.3 Amplitudová modulace AM SSB

Použil jsem opět stejné parametry pro vykreslení jednotlivých grafů a spekter. Parametry se nachází v tabulce 6.1. Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM SSB nalezneme v tabulce 6.6 a 6.7.



Obr. 6.12 – Grafické okno modulace AM SSB

Tabulka 6.6 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

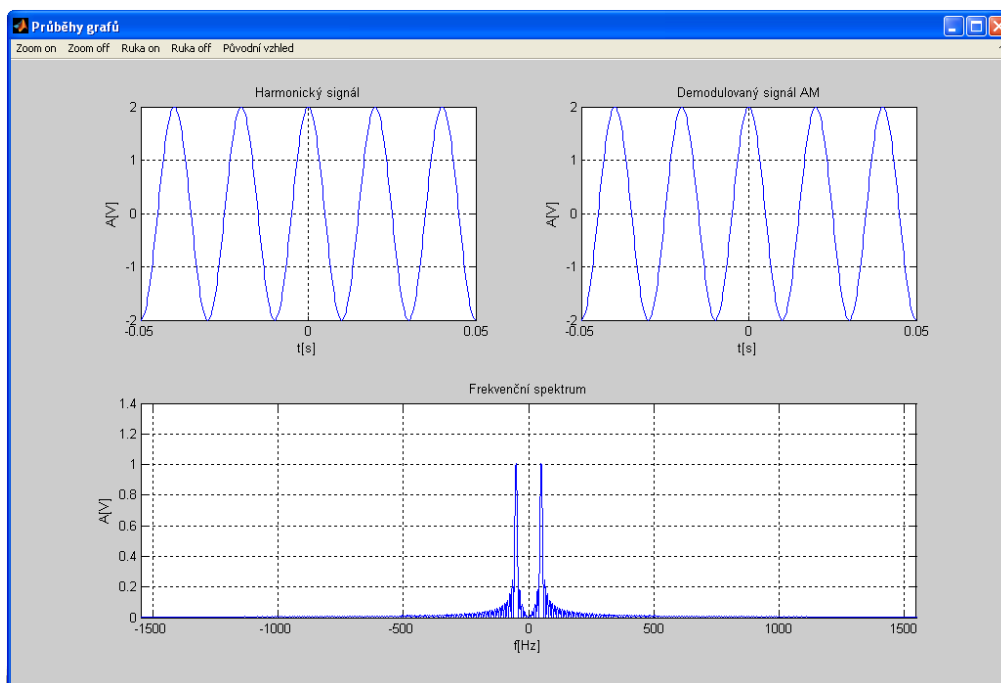
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.7 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu AM SSB

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

6.2.4 Amplitudová demodulace AM

Amplitudová demodulace se provádí z modulovaného signálu AM. Zadal jsem parametry, které vidíme v tabulce 6.1.



Obr. 6.13 – Grafické okno demodulace AM

Tabulka 6.8 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.9 – Vypočítané hodnoty demodulovaného signálu AM

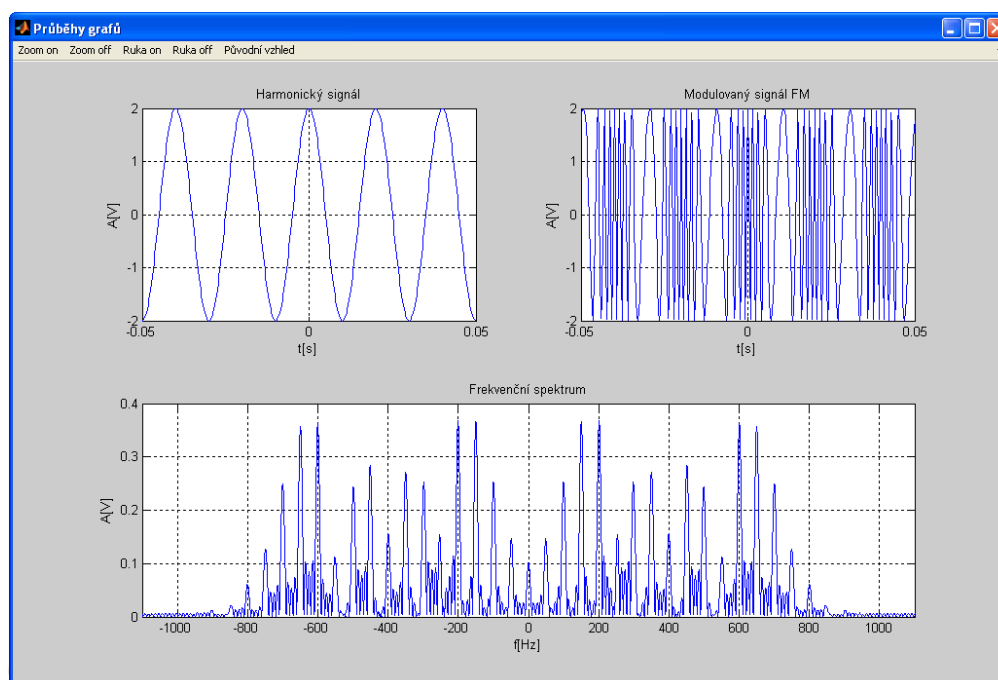
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

6.2.5 Frekvenční modulace FM

Průběhy frekvenční modulace získáme z parametrů, které jsou uvedeny v tabulce 6.10. Oproti předchozím modulacím jsem nepoužil parametr hloubka modulace, ale navíc jsem zadal parametr Frekvenční odchylka.

Tabulka 6.10 – Zadávané parametry

Zadávaný parametr	Hodnota
Amplituda harmonického signálu	2V
Frekvence harmonického signálu	50Hz
Amplituda nosného signálu	2V
Frekvence nosného signálu	400Hz
Frekvenční odchylka	150Hz
Vzorkovací frekvence	4000Hz
Harmonický signál	$A_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)$
Impedance	50Ω



Obr. 6.14 – Grafické okno modulace FM

Tabulka 6.11 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

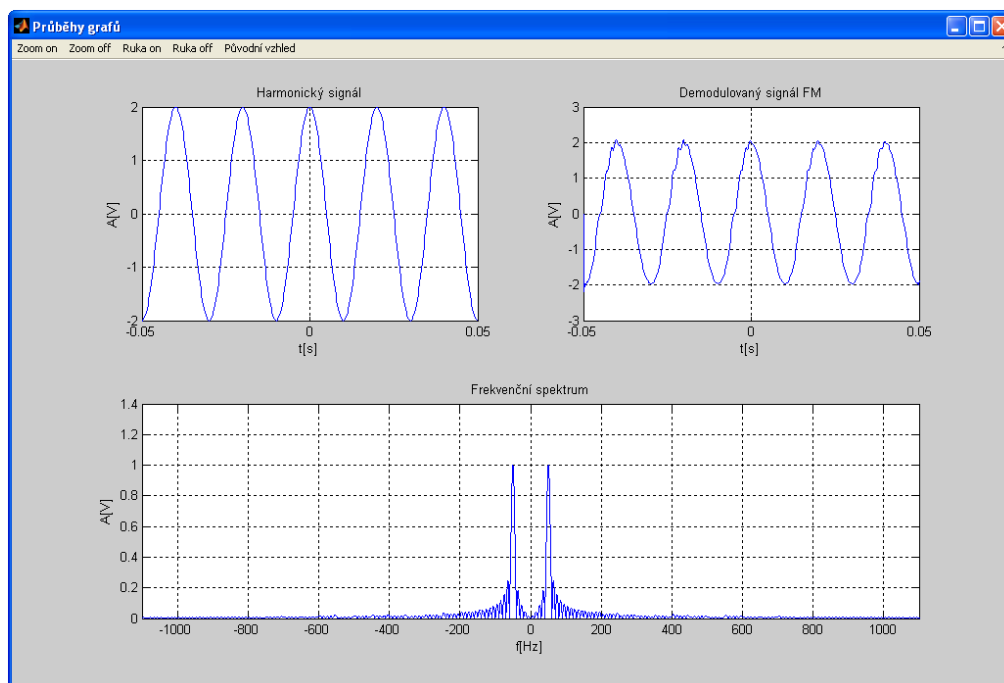
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.12 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu FM

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

6.2.6 Frekvenční demodulace FM

Parametry potřebné pro průběh frekvenční demodulace FM jsou uvedeny v tabulce 6.10.



Obr. 6.15 – Grafické okno demodulace FM

Tabulka 6.13 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.14 – Vypočítané hodnoty demodulovaného signálu FM

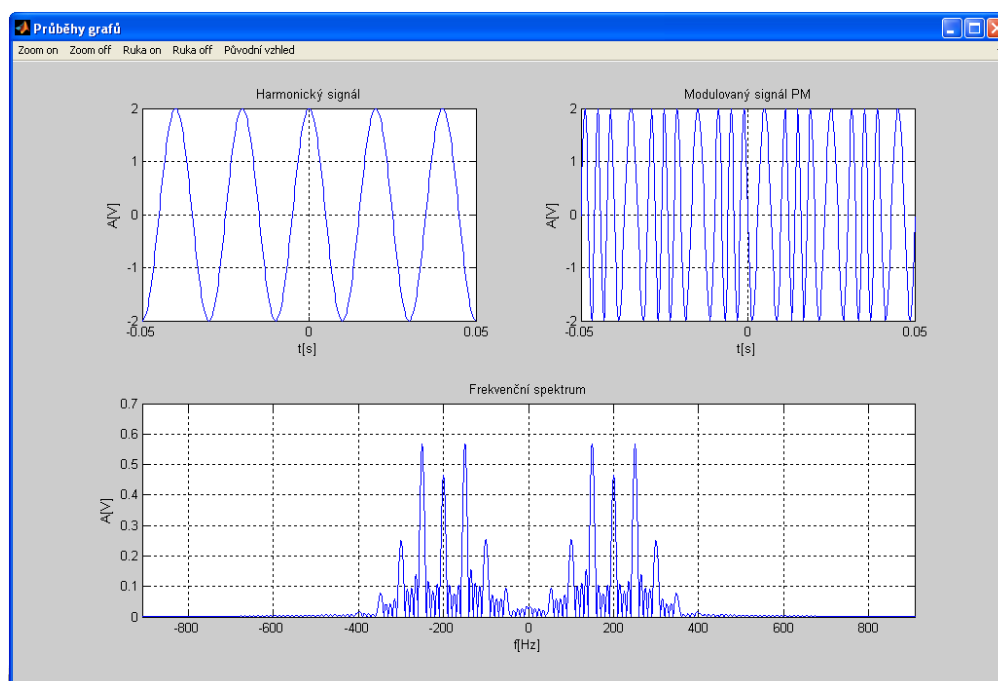
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

6.2.7 Fázová modulace PM

Pro zobrazení fázové modulace jsem použil parametry zadané v tabulce 6.15. Zadal jsem nový parametr, kterým je Fáze.

Tabulka 6.15 – Zadávané parametry

Zadávaný parametr	Hodnota
Amplituda harmonického signálu	2V
Frekvence harmonického signálu	50Hz
Amplituda nosného signálu	2V
Frekvence nosného signálu	200Hz
Fáze	$\pi/4$ rad nebo-li 45°
Vzorkovací frekvence	4000Hz
Harmonický signál	$A_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)$
Impedance	50Ω



Obr. 6.16 – Grafické okno modulace PM

Tabulka 6.16 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

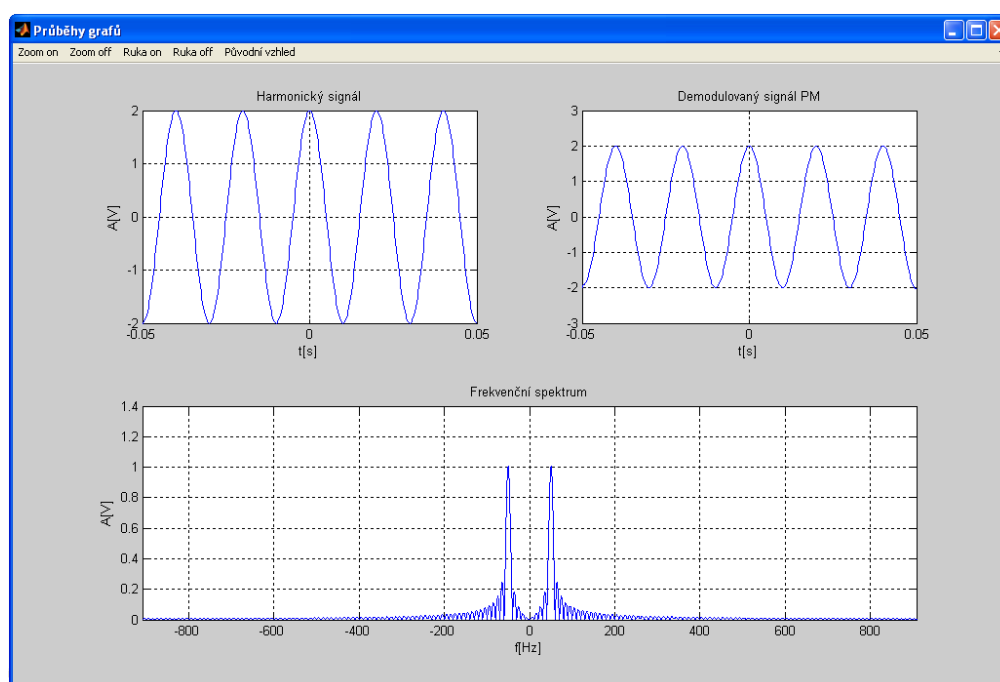
Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.17 – Vypočítané hodnoty modulovaného signálu PM

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

6.2.8 Fázová demodulace PM

Parametry pro zobrazení průběhu fázové demodulace se nachází v tabulce 6.15.



Obr. 6.17 – Grafické okno demodulace PM

Tabulka 6.18 – Vypočítané hodnoty harmonického signálu

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

Tabulka 6.19 – Vypočítané hodnoty demodulovaného signálu PM

Počítané veličiny	Hodnota	Jednotky
Střední hodnota	0	V
Výkon	0,04	W

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit funkční software, který bude sloužit pro práci s analogovými modulacemi. Teoretická část se zabývá podrobným popisem vybraných analogových metod AM, FM, PM. V praktické části se povedlo vytvořit funkční software. Uživateli bude po zadání potřebných parametrů zobrazovat časové průběhy harmonického signálu a frekvenční spektrum, u kterého je možnost zvolit průběh ve voltech nebo v decibelech. Dále zobrazuje modulovaný nebo demodulovaný signál podle toho, jakou operaci si dotyčný zvolí. Software také umožňuje výpočet střední hodnoty a výkonu. Tyto hodnoty počítá u harmonického signálu a také u modulovaného nebo demodulovaného signálu. Pokud si uživatel potřebuje uložit data některého z průběhů nebo spektrum, může využít nabídky export dat. Možnost uložení dat je buď do textového dokumentu s příponou .txt nebo do textového souboru s příponou .csv. Jestliže si potřebuje nechat zobrazit data, která má uložená v textovém souboru nebo textovém dokumentu, použije funkci import dat.

Software byl vytvořen v programu Matlab pomocí grafického uživatelského rozhraní. Měl by posloužit především pro snadnější výuku a názornou ukázkou jednotlivých časových průběhů a spekter u modulací a demodulací. Součástí bakalářské práce je manuál, kde je popsána funkce jednotlivých funkcí programu. Manuál může uživatel využít pro práci s programem, pokud nemá k dispozici tuto práci.

Literatura

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

[2] ZAPLATÍLEK, K.; DOŇAR, B. *MATLAB – tvorba uživatelských aplikací*. Praha : BEN, 2004. 216 s. ISBN 80-7300-133-0.

[3] ZAPLATÍLEK, K.; DOŇAR, B. *MATLAB – pro začátečníky*. Praha : BEN, 2005. 152 s. ISBN 80-7300-175-6.

[4] ZAPLATÍLEK, K.; DOŇAR, B. *MATLAB – začínáme se signály*. Praha : BEN, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0.

[5] Němec, Z. *Přednášky z předmětu Sdělovací technika – Pr7 – ISTEE – FM*. Univerzita Pardubice.

[6] *Online slovník, slova A-Z* [online]. 25. 1. 2011 [cit. 2011-1-28]. Slova od M. Dostupné na: <<http://slovník.online-clanky.cz/m/strana-52/>>.

Přílohy

Všechny přílohy, včetně softwaru, zdrojových kódů, manuálu abakalářské práce v elektronické podobě jsou umístěny na příloženém CD.