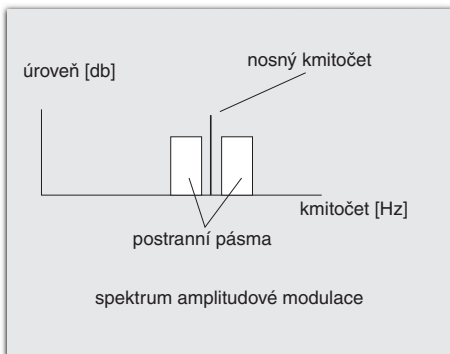


# Digitální signálový procesing pro AM

## Úvod

Vysílání s amplitudovou modulací na rozsahu středních a dlouhých vln spíše dožívá. Na rozsahu krátkých vln je situace mírně odlišná, neboť zde pracuje řada vysílačů zahraničního vysílání po celém světě. Není vyloučené, že amplitudovou modulaci nahradí v budoucnosti čistě digitální systém DRM (Digital Radio Mondiale), který se dá provozovat na mírně



Obr. 1 Spektrum amplitudové modulace

upravených vysílačích, původně určených pro amplitudovou modulaci. Technologie DRM však vyžaduje speciální přijímače.

tých letech. Od té doby nastal velký rozmach v technologii zpracování a přenosu signálu, klasická amplitudová modulace se však stále používá.

V jednotlivých regionech má použití AM svoje specifika. V Evropě se například vysílá AM s frekvenčním rozsahem zvukového signálu do 4,5 kHz, v USA s rozsahem do 9 kHz a v některých případech dokonce ve stereofonní verzi. V pásmu krátkých vln se většinou používá šířka zvukového pásma 4,5 nebo 5,5 kHz. V pásmu krátkých vln se používá i modifikace klasické AM – amplitudová modulace s potlačenou nosnou vlnou (SC). Taková modulace lépe využívá výkon vysílače, ale vyžaduje složitější demodulátor v přijímači.

Ani označení jednotlivých pásem, na kterých se AM provozuje není jednotné. U nás se zpravidla rozlišuje dlouhovlnné (DV) pásmo (153–279 kHz), středovlnné (SV) pásmo (531–1602 kHz) a krátkovlnná (KV) pásma (KV není přesně definováno, liší se u jednotlivých přijímačů, v řádu MHz). V anglicky psané literatuře tomu odpovídá označení LW, MW a SW. Krátkovlnnému rozsahu (SW) se někdy též říká HF. Kanálový rastr, ve kterém

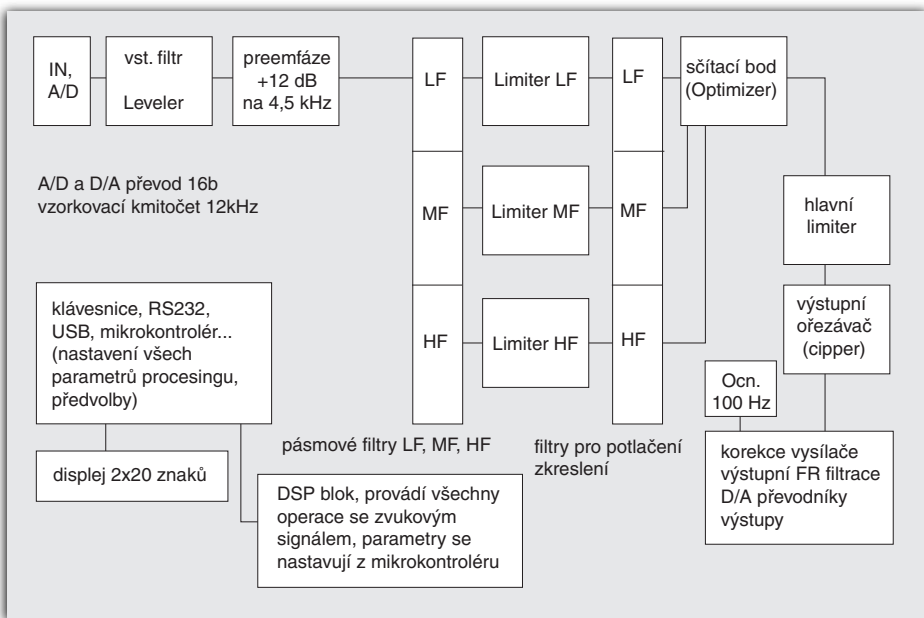
ho jedním vysílačem je tedy 9 kHz (viz obr. 1)

Energetická bilance vysílání s AM není příliš příznivá, přibližně polovina výkonu vysílače je vyzařována na kmitočtu nosné vlny, druhá polovina se dělí mezi obě postranní pásma, která nesou užitečnou energii (přesné rozdělení energie závisí na charakteru modulačního signálu). To platí v případě, že je vysílač modulován na 100 %. Pokud není podmínka plného vybuzení splněna, klesá výkon vyzařovaný v postranních pásmech a výkon na kmitočtu nosné naopak roste. Dá se tedy říci, že energetická účinnost amplitudové modulace je maximálně asi 50 % a to v případě 100 % promodulování, což je obtížné zaručit. Vysílač nesmí být totiž ani krátkodobě buzen do tzv. negativního přemodulování. Jedná se o stav, při kterém vymizí nosná vlna. Takový stav může vyvolat poškození vysílače, nebo alespoň vypnutí ochrany a tím přerušování vysílání. Aby k negativnímu přemodulování nemohlo dojít, nutí nás to (při provozu bez modulačního procesoru) ponechat velkou rezervu na přemodulování náhodnými špičkami. To samozřejmě dále snižuje energetickou účinnost, neboť 100% promodulování se stává nedostižným snem.

Principiálně špatná energetická bilance snižuje dosah vysílače ale na druhou stranu umožňuje konstrukci triviálně jednoduchých obálkových demodulátorů v přijímačích. To bylo důležité hlavně v minulosti (krystalka, dvoulampovka, elektronkový superhet atd.). Dnes se používají buď obálkové, nebo kvalitnější synchronní demodulátory.

Další problém AM modulace souvisí s konstrukcí přijímačů. Superheterodynní koncepce, používaná téměř u všech přijímačů vede na jedné straně k dobré selektivitě, na druhou stranu vlivem úzkého přenášeho pásma omezuje šířku pásma přenášeho zvukového signálu.

Při zpracování v přijímači této koncepce (superhet) prochází signál přes mezifrekvenční zesilovač. V něm je soustředěna prakticky celá selektivita přijímače. Proto bývá snaha vyrobit jej co nejselektivnější. Narozdíl od frekvenční modulace se v případě AM kmitočtová charakteristika mezifrekvenčního zesilovače přímo promítá do výsledné kmitočtové charakteristiky na audio výstupu demodulátoru. Selektivní mezifrekvence tedy typicky způsobí omezení vysokých kmitočtů ve zvukovém signálu. Tvarování mezifrekvence tak, aby byla zachována vysoká selektivita a současně byla pouze nevýznamně dotčena kmitočtová charakteristika na



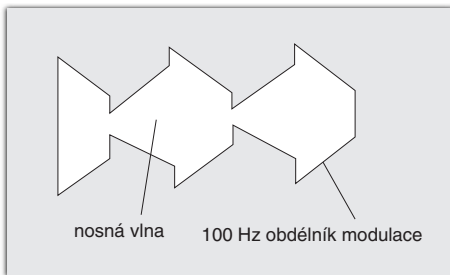
Obr. 2 Blokové schéma digitálního modulačního procesoru Trans-AM 2005 DIGITAL

Klasická amplitudová modulace (AM) se objevila na úsvitu rozhlasové éry, neboť je ze všech myslitelných modulací pro přenos zvukového signálu nejjednodušší. Stejně tak i konstrukce přijímačů pro tento druh modulace je triviální a to bylo v minulosti velmi podstatné. AM kralovala jako jediná používaná modulace až do příchodu frekvenční modulace v padesá-

pracují AM vysílače v Evropě je 9 kHz, v USA a některých dalších zemích je to 10 kHz.

AM vytváří při modulaci na nosnou vlnu dvě postranní pásma, symetricky k nosné vlně. Šířka postranních pásem závisí na šířce pásma modulačního signálu. Ta je u nás normou limitována na 4,5 kHz. Celková šířka pásma, zabraně-

audio výstupu je nesmírně technicky náročná. Proto výrobci preferují přijímové vlastnosti (selektivitu) před kvalitním zvukem. Výsledkem je celkem typický zvuk bez výšek, kde není zdaleka dosaženo ani teoreticky možných 4,5 kHz, které

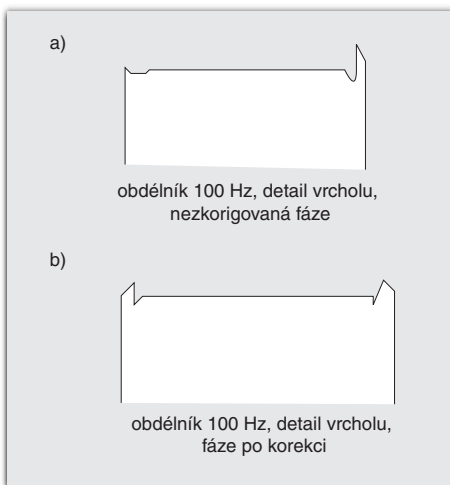


Obr. 3 Typický vysokofrekvenční signál modulovaný obdélníkem 100 Hz

vysílač vysílá (nebo by měl). Útlum přijímače pro zvukový signál začíná zpravidla stoupat již od 1 kHz výše a na kmitočtu 4 kHz dosahuje zpravidla asi 10–15 dB.

Filtrace zvukového signálu na vysíláči musí zaručit spektrální čistotu v oblasti nad 4,5 kHz. Norma požaduje útlum vyšší než 20 dB na kmitočtech přesahujících 6 kHz. Realizace filtru pro zvukový signál, který má na kmitočtu zhruba 4,5 kHz útlum blízký nule a na kmitočtu 6 kHz útlum s rezervou větší než 20 dB není s využitím klasických prostředků jednoduchá. Proto na horním mezním kmitočtu 4,5 kHz filtr již zpravidla nějaký útlum (řádů desetiny až jednotek dB) má. To dále zhoršuje celkové vlastnosti systému vysíláče-přijímače na vyšších akustických kmitočtech.

Pro dobrou srozumitelnost, dojem hlasitosti a maskování rušení při přenosu sig-



Obr. 5 Detail vrcholu obdélníkového signálu 100 Hz: (a) nezkorigovaná fáze a (b) po korekci fáze

nálu z vysíláče do přijímače jsou přitom nejdůležitější spektrální složky zvukového signálu v okolí 3–4 kHz.

Vezmeme-li v úvahu všechny zmíněné vlastnosti AM vysílání a AM přijímačů, lze definovat požadavky na smysluplné zpracování zvukového signálu před vysílačem, který může celkový efekt z provozu

AM vysíláče znatelně zlepšit. Podrobnější analýza ukazuje, že takové zpracování nelze realizovat jinak než v přímé součinnosti s vysílačem, a že některá nastavení parametrů procesoru musí korespondovat s určitými vlastnostmi vysíláče. Procesor tedy musí být umístěn přímo u vysíláče.

### Základy modulačního zpracování signálu pro AM

Mezi hlavní cíle zpracování signálu pro AM patří:

- zajištění maximálního promodulování vysíláče na 100 % s přesností jednotek procent a úplné zabránění tzv. negativního přemodulování, při kterém krátkodobě vymizí nosná vlna,
- zvýšení střední hodnoty zvukového signálu oproti špičkové hodnotě a nastavitelné parametry zpracování,
- spektrální omezení zvukového signálu nad 4,5 kHz.

Abychom mohli dosáhnout přesného řízení špičkové modulační úrovně, potřebujeme získat přístup k ideálnímu modulačnímu signálu, který přeneseme budič modulačního signálu přesně na obálku vysokofrekvenčního signálu. Reálné vysíláče ovšem zpravidla nepracují s modulačním signálem, který by se ideálnímu příliš blížil. Typickými nedostatky jsou problémy na kmitočtové a fázové charakteristice v dolní části a fázové charakteristice v horní části zvukového pásma. Tyto nedostatky způsobují, že v případě, kdy provedeme pouze zpracování zvukového signálu ve smyslu pečlivého řízení špiček a kmitočtového omezení do 4,5 kHz stejně nebudeme schopni řídit modulaci přesně.

V případě buzení přirozeným signálem (ne pouze sinusovkou) bude zdanlivě náhodně docházet k přemodulování a to i v případě, že byl systém pečlivě nastaven pomocí sinusového měřicího signálu. Vlastnosti modulačního způsobí, že se v procesu modulačního komplexního signálu (který se skládá z více spektrálních složek) znovu vytvoří nové špičky, které způsobí přemodulování. O velikost těchto špiček budeme následně nuceni snížit vstupní citlivost vysíláče a tím i snížit průměrnou modulační úroveň.

### Struktura modulačního procesoru pro AM

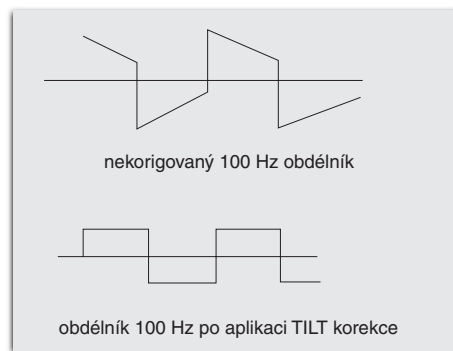
Modulační procesor pro AM musí tedy sestávat ze dvou hlavních částí. První je vlastní vícepásmový modulační procesor a druhou obvodu korekce vlastností vysíláče (modulátoru).

Toto rozdělení může, ale nemusí být v procesoru realizováno fyzicky. V případě digitálního modulačního procesoru pro AM se jedná o programové bloky, které běží v DSP (digitálním signálovém procesoru tvořeném jedním nebo sadou integrovaných obvodů specializovaných na zpracování analogových signálů).

Realizace v digitálním prostředí umožňuje použít některé metody zpracování a algoritmy, které nemají přímý protějšek v analogovém prostředí. Jako příklad může posloužit limitace řízená předem (look ahead limiting) nebo filtrace typu FIR (filtr s omezenou impulzní odezvou), které jsou fázově naprosto lineární. To umožňuje dosáhnout takové úrovně zpracování signálu, která by byla klasickými analogovými metodami nedostupná, nebo dostupná pouze s krajními obtížemi.

Věnujme se nejprve popisu druhé části schématu, tedy části, která má za úkol korigovat vlastnosti modulačního vysíláče (označení bloku – korekce vysíláče).

Modulátor vysíláče má zpravidla dva hlavní druhy nedostatků. První se projevuje ve spodní části pásma zvukového signálu, druhý v horní části. Problém v oblasti nízkých kmitočtů se projevuje jejich lineárním poklesem v pásmu pod



Obr. 4 Nezkorigovaný obdélník 100 Hz a stejný signál po korekci TILT

určitý mezní kmitočet. Tento pokles může být vyvolán nedokonalostí modulačního, ale stejně i předřazeným filtrem hloubek, který do vysíláče záměrně aplikoval výrobce. Omezení hlubokých kmitočtů pod, řekněme, 40 Hz bylo dříve považováno za žádoucí. To ovšem platí pouze v případě, kdy nepoužíváme žádné zpracování modulačního signálu. V tom případě omezení hlubokých kmitočtů může pozitivně ovlivnit spektrum zvukového signálu i energetickou bilanci zvukového spektra.

Pokud ovšem zpracování používáme, omezení spektra na straně nízkých kmitočtů závažně ovlivňuje přenos časového průběhu modulačního signálu a tím vytváří překmity na reálném signálu. Jinými slovy požadujeme věrnou reprodukci časového průběhu modulačního signálu, tedy vyrovnanou amplitudovou charakteristiku a vyrovnanou charakteristiku skupinového zpoždění.

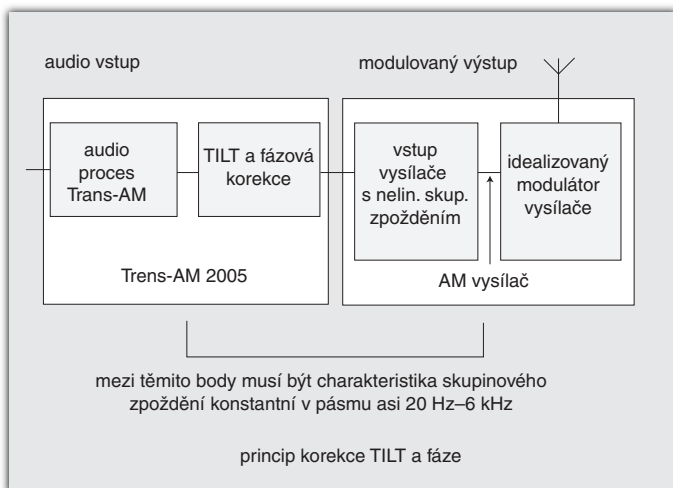
Na vysokých kmitočtech (v oblasti 4–5 kHz) způsobuje modulační a často i vazba na anténu problémy na fázové charakteristice, které mohou ovlivnit přesnost reprodukce vyšších oblastí spektra zvukového signálu. Vysílač může v těchto oblastech

vykazovat nevyrovnanou charakteristiku skupinového zpoždění.

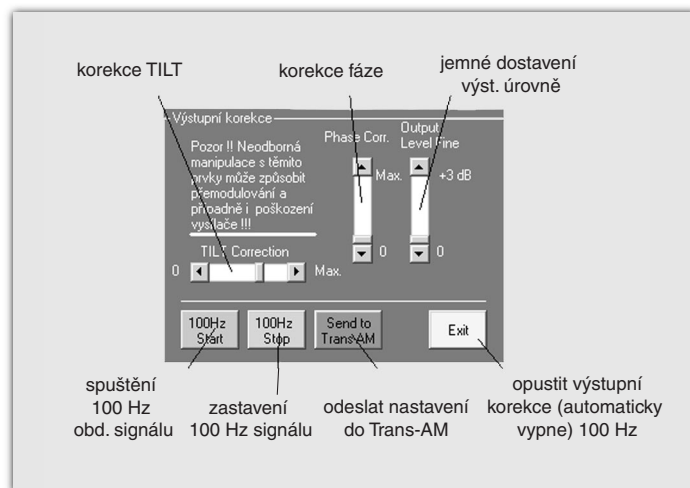
Nastavení výstupní části procesoru je třeba provést tak, aby byly tyto nedostatky pokud možno přesně vykompenzovány. K tomu se používá měřicí signál obdélní-

Pokud správně nastavíme korekce vlastností vysílače, jsou charakteristiky korekčních obvodů a modulátoru vysílače vzájemně inverzní. Tím získáváme na vstupu korekčních obvodů přístup k (pseudo) ideálnímu modulátoru, viz *obr. 6*. Signá-

zifrekvenčního zesilovače. Tato „preemfáze pro AM“ má zesílení 12 dB na kmitočtu 4,5 kHz a je realizována filtrem druhého řádu. Její aplikací se dosáhne akceptovatelného přenosu kmitočtů důležitých pro srozumitelnost v oblasti 3–4,5 kHz.



Obr. 6 Princip korekce TILT a korekce fáze v obvodu Trans-AM 2005



Obr. 7 Prvky pro nastavení korekcí

kového průběhu s kmitočtem 100 Hz, generovaný digitálně v procesoru, omezený dolní propustí 4,5 kHz. Takový signál v sobě obsahuje řadu kmitočtových složek (100 Hz, 300 Hz, atd.) které vytvářejí obdélník pouze v případě, že jsou správně sečteny z hlediska fáze a amplitudy. Pokud přivedeme takový signál na vstup vysílače a sledujeme výslednou modulační obálku na anténním výstupu, spatříme pravděpodobně typický obrázek uvedený na *obr. 3*.

Sklon týlů 100 Hz průběhu způsobují nedokonalosti kmitočtového průběhu vysílače na nízkých kmitočtech, nesymetrické překmity v oblasti skoků signálu jsou naopak způsobeny nedokonalostmi fázové charakteristiky na horním okraji spektra.

Tyto nedostatky se korigují nezávisle na sobě. Nejprve se pomocí korekce týlu impulzů vyrovná sklon týlů modulovaného signálu. Následně se minimalizují překmity v oblasti skoků signálu pomocí tzv. fázové korekce. (Na následujících obrázcích pro přehlednost nekreslíme celý modulovaný vysokofrekvenční signál, ale jen jeho jednostrannou obálku.) Oba zásahy jsou znázorněny na *obr. 4* a *obr. 5*.

Korekce týlu je realizována zpravidla pomocí přenosové funkce druhého řádu se dvěma zlomy na kmitočtové charakteristice. První zlom se nachází na kmitočtu řádu desetin Hz, druhý v oblasti pod předpokládaným začátkem poklesu kmitočtové charakteristiky typického vysílače, tedy asi na 20 Hz. Mohutnost korekce je nastavitelná jako parametr. Fázová korekce je realizována pomocí fázovacího článku, její mohutnost je též nastavitelná jako parametr.

lem, který přivedeme do tohoto bodu bude prakticky přesně modulován vysílač z hlediska tvaru obálky nosné vlny AM. Okno programu pro nastavení korekcí vysílače vidíme na *obr. 7*, opět se jedná o případ Trans-AM 2005 DIGITAL.

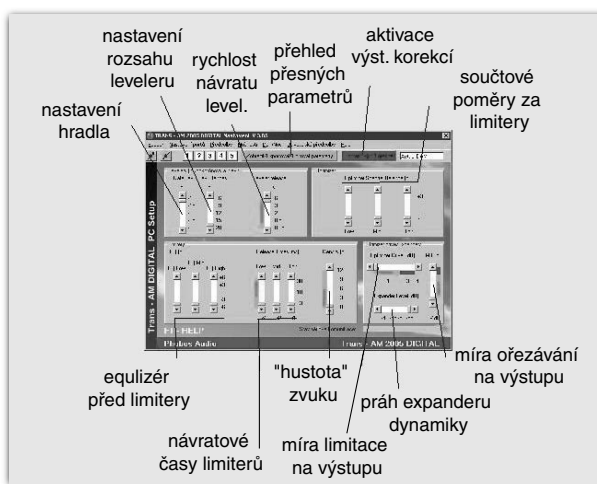
Obvody korekcí vysílače předchází vlastní modulační zpracování. Jak jsme již naznačili, jsou na něj kladeny některé specifické požadavky. V blokovém schématu jej znázorňují všechny bloky signálového zpracování před korekcí vysílače.

Požadujeme především eliminaci jakýchkoli překmitů s přesností řádu jednotek

Všechny tyto cíle mohou být dosaženy pomocí vícepásmového zpracování zvukového signálu. Vzhledem k malé šířce pásma používané při modulaci AM (do 4,5 kHz) vychází optimální rozdělení celého zvukového pásma do tří subpásem. Při dalším popisu budeme vycházet z konkrétního blokového schématu digitálního modulačního procesoru Trans-AM 2005, viz *obr. 2*. (Struktura na tomto schématu ovšem představuje strukturu signálového zpracování, které je realizováno programově v DSP, nikoliv fyzickou strukturu zařízení.) Na *obr. 8* je pro ilustraci nastavovacích možností pohled na hlavní okno programu pro Trans-AM 2005. Procesor Trans-AM 2005 obsahuje tři výrobce definované předvolby a šest uživatelem definovatelných předvoleb.

Na úplném vstupu procesoru se nachází vstupní hornopropustný filtr 3. řádu s mezním kmitočtem 120 Hz a čebyševovou aproximací. Úkolem tohoto filtru je omezit pronikání nízkých kmitočtů do systému. Vzhledem k silně omezenému hornímu meznímu kmitočtu je velmi žádoucí, aby byl omezen i dolní mezní kmitočtet. Jen tak lze dosáhnout subjektivně vyrovnaného dojmu výsledného zvukového obrazu.

Dále je signál omezen strmým FIR-filtrem s mezním kmitočtem 4500 Hz. Tento filtr eliminuje z procesu zpracování všechny složky, které stejně leží mimo přenášené pásmo. Následuje leveler (obvod s řízeným ziskem), který normuje úroveň vstupního signálu. Je spojen s tzv. hradlem, které blokuje růst zisku leveleru v případě, že dojde k velkému poklesu vstupní úrovně. Tím omezuje zesilování



Obr. 8 Hlavní okno řídicího programu

procent a současně strmé omezení šířky pásma zvukového signálu nad 4,5 kHz. Navíc sledujeme i všechny běžné cíle modulačního zpracování jako zvýšení střední hodnoty signálu, konzistentní zvukový projev, spektrální normování, zvýšení srozumitelnosti řečových signálů atd. Zavádí se dodatečné zesílení vyšších kmitočtů pro kompenzaci vlastností typického me-

případných šumů, které se mohou vyskytovat na vstupu procesoru. Leveler i hra-dlo mají nastavitelné parametry.

Dále se signál rozkládá do tří subpásem (nazývaných LF, MF a HF) pomocí filtrů 4. řádu. Filtry s čebyševovou aproximací jsou poměrně strmé, aby relativně úzké zvukové pásmo bylo rozděleno účinně.

Rozložení subpásem a mezních kmitočtů:

- LF 120–280 Hz,
- MF 280 Hz až 1,6 kHz,
- HF 1,6–4,5 kHz.

Následují tři pásmové limity, které zvyšují poměr mezi střední a špičkovou úrovní signálu v daných pásmech a tím přispívají ke zvýšení energetické účinnosti modulace. Časové konstanty limiterů se v jednotlivých pásmech liší, jak to odpovídá kmitočtovým rozsahům pásem. Odběhové časové konstanty jsou nastavitelné jako parametry. Blok limiterů navíc způsobuje tzv. spektrální normování. Znamená to, že spektrum zvukového signálu na výstupu limiterů nezávisí plně na vstupním spektru, ale je stále skoro stejné, tj. normované. Intenzita tohoto jevu závisí i na míře buzení

limiterů, tedy na nastavení prvku Density (úroveň hustoty zvuku na *obr. 8*).

Limity způsobí svou činností určitou míru nelineárního zkreslení. Po jejich průchodu signál pokračuje trojicí filtrů pro eliminaci zkreslení, které leží zpravidla mimo přenášené pásmo daného limiteru. To přispívá značnou měrou k eliminaci subjektivně vnímaných zkreslení.

Výsledné produkty těchto tří pásem vstupují do součtového bodu, kde lze nastavit celkovou spektrální bilanci zpracování signálu. Protože na výstupu limiterů je signál spektrálně „zanormován“, nastavení spektrální balance je proces, který vytvoří spektrální charakter zvuku, víceméně nezávislý na vstupním signálu. To přispívá ke konzistentnosti zvukového projevu dané stanice.

Následuje výstupní hlavní limiter, který pracuje již se součtem všech pásem. Překmity, které nezachytí jsou odstraněny ořezávačem (clipper), který omezí jakoukoli maximální hodnotu signálu, která přesahuje jeho práh. Míru záběru hlavního limiteru i ořezávače lze nastavit a tím vy-

tvořit kompromis mezi spektrální ziskovou intermodulací, nelineárním zkreslením a výslednou hlasitostí.

Následují obvody korekce vysílače, popsané v úvodu, tedy koterce týlu impulzů (TILT) a korekce horního okraje pásma (fáze). Tyto obvody obsahuje procesor dva, je tedy možné zkompenzovat nezávisle dva vysílače (například jeden pro denní a jeden pro noční vysílání).

Signál dále prochází FIR-filtry s mezním kmitočtem 4,5 kHz a je přiveden na dvojici výstupních D/A převodníků, pracujících s osminásobným převzorkováním. Z nich jsou již přes výstupní zesilovače přímo buzeny vysílače.

## Závěr

Popsaný digitální modulační procesing signálu pro AM umožňuje lepší využití vysílače spolu s kompenzací některých typických nedostatků AM přijímačů. Výsledkem je zřetelně lepší pokrytí obsluhovaného území spolu s výraznější, srozumitelnější a konzistentnější reprodukcí.

Ing. Pavel Straňák

