



Hudební signál a jeho syntéza

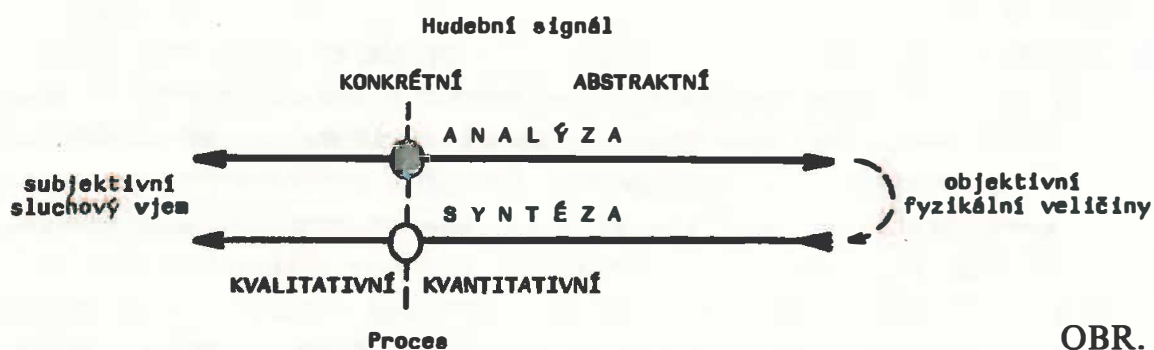
Syntéza hudebního signálu je převážně spojována s oblastí elektroakustické hudby, resp. s elektronickou generací signálů tradičního i netradičního charakteru. Avšak podstatně důležitější význam syntézy tkví především v poznávání obecných zákonitostí hudebního signálu, které přes sebedokonalejší analytický přístup jsou stále velmi obtížně postihnutelné ve vztahu k procesu jeho subjektivního vnímání. Syntéza hudebního signálu dává nejenom možnost ověření pravdivosti analýzy, ale též možnost redukce dat, které analýza jako taková v nepřeberném množství nabízí. Při zkoumání kvality hudebního signálu jako důsledku kvantitativního uspořádání jeho fyzikálních vlastností se nelze obejít bez analýzy a následující zpětné syntézy, která umožňuje porovnání „originálu“ hudebního signálu s jeho elektronickou „kopií“. Jedním z nejcennějších poznatků tohoto analyticko-syntetického přístupu je zjištění důležitosti jednotlivých fyzikálních parametrů signálu na subjektivním vjemu jeho kvality. Problematika syntézy nesmí být však v žádném případě zjednodušována na otázky pouhé generace „elektronických zvuků a pazvuků“, ale musí být chápána v dialektické jednotě s problematikou analýzy, která syntéze zákonitě předchází.

Předkládaná studie o syntéze hudebního signálu navazuje na studii o jeho analýze (lit. 16) a přináší základní informace o metodách syntézy, které jsou prakticky využívány jak v oblasti elektroakustické hudby, tak v oblasti základního hudebně-akustického výzkumu. Rozsáhlá obrazová příloha, vycházející z konkrétních zvukových ukázek, má za úkol prezentovat hudební signál v jeho abstraktní grafické podobě, která je v podstatě základní objektivní informací o jeho fyzikálních vlastnostech. Tento nejjednodušší analytický pohled na zvukové médium je samozřejmou součástí každého syntetického procesu a vedle toho dochází odůvodněného využití i v různých fázích přenosu hudebního signálu.

1. Základní metodické problémy syntézy hudebního signálu

Každý hudební, resp. zvukový signál je ze subjektivního hlediska charakterizován vjemem výšky, hlasitosti a barvy v daném časovém okamžiku. Na postavení vjemu barvy v této sestavě základních psychoakustických parametrů existuje celá řada názorů, důležité však je, že barva je primárně odrazem tvaru průběhu akustického tlaku zvukové vlny vstupující do našeho ucha. Tvar vlny zahrnuje tak v sobě i střídavý charakter okamžité výchylky určitého rozkmitu a tím také výšku i hlasitost uvažovaného signálu. Toto komplexní pojetí vjemu barvy hudebního signálu, nadřazené vjemu výšky a hlasitosti, vede potom logicky k preferování kvalitativního pohledu na problematiku zvukové syntézy. Avšak ta skutečnost, že změna tvaru časového průběhu signálu nemusí mít vždy odpovídající změnu v subjektivním vjemu, si vyžaduje i v oblasti syntézy hledání analytických souvislostí.

Souvislost barvy se spektrální strukturou je ve své podstatě odvozená až od matematického modelu rozkladu zvukového signálu na základní frekvenční složky sinusového průběhu. Tento rozklad, resp. spektrální analýza je v pravdě prostředkem pouze analytickým. Opačným syntetickým postupem lze sice dospět k původnímu signálu, ale tímto způsobem nepracuje žádný zdroj hudebního signálu, ať už je to hudební nástroj nebo elektronický generátor. Proto také nechápeme syntézu hudebního signálu jenom jako přechod od jednoduchého ke složitějšímu tvaru jeho časového průběhu, ale jako **kvalitativní změnu** jednoho signálu v druhý za účelem **realizace zvukového záměru**. Syntéza jako přechod od fyzikální abstrakce ke konkrétnímu zvukovému vjemu dochází vlastního naplnění až v subjektivním vyhodnocení tohoto vjemu v okamžiku zaujmutí hodnotícího postoje posluchače. Vztah objektivního a subjektivního v analyticko-syntetickém procesu hudebního signálu je schematicky ukázán na obr. 1.



OBR. 1

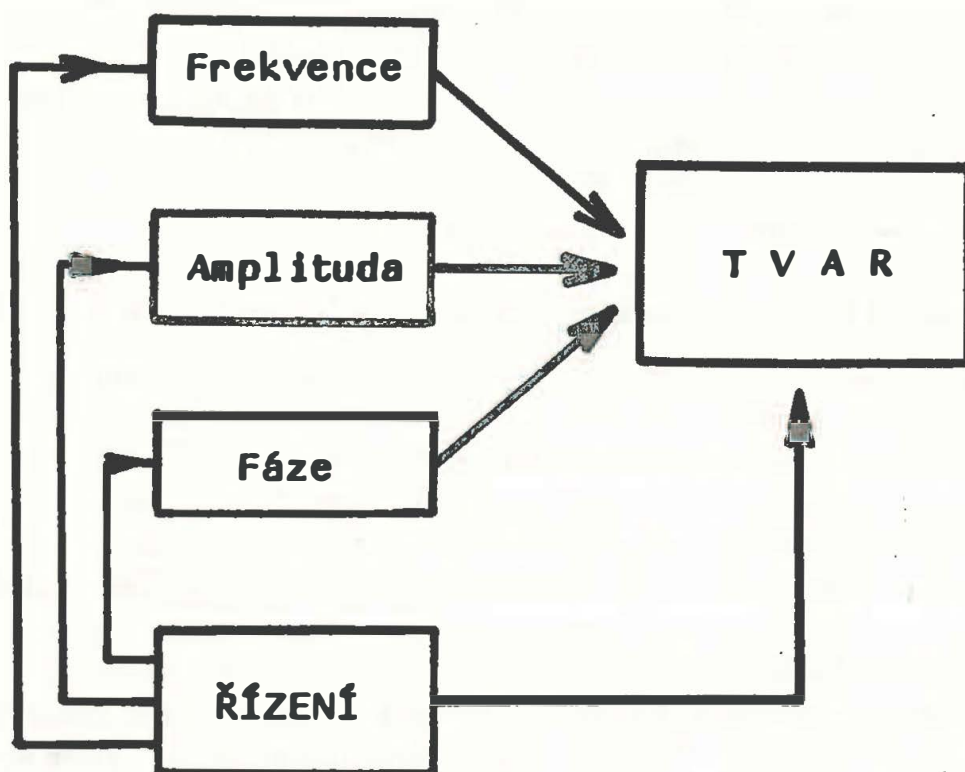
Výchozím bodem je zde konkrétní zvuková podoba hudebního signálu s analytickou vazbou kvalitativní směrem ke sluchovému vjemu a kvantitativní směrem k abstraktní podobě signálu (průběhu akustického tlaku atd.).

a jeho objektivním fyzikálním veličinám (amplitudě, frekvenci, fázi, spektru atd.). Syntéza, která vždy čerpá z předchozího analytického procesu, je potom charakterizována změnou zvukově fyzikální kvantity ve zvukově estetickou kvalitu. Tato studie se nadále zabývá pouze **kvantitativní stránkou zvukové syntézy**, protože její kvalitativní hodnocení patří do oblasti ryze psychoakustické a zvukově estetické.

Vlastní proces syntézy vychází zcela nezbytně, jak bylo již uvedeno, z analytického pohledu na jeho barvu. Z tohoto pohledu lze pak vymezit **základní dimenze barvy přirozeného hudebního signálu**:

1. Spektrum zakmitaného stavu
2. Časový vývoj složek
3. Frekvenční vztahy složek
4. Hlukové a šumové příměsi

I když toto vymezení obsahuje určité duplicity a nepostihuje vzájemnou hierarchii dimenzí, tvoří přesto základní analytický model zvukové syntézy. Nezávisle na použité metodě syntézy je totiž nutné zabývat se naplněním každé uvedené dimenze, což přirozeně vede k teoretické i praktické komplikovanosti vlastního syntetického procesu. Metod syntézy hudebního signálu existuje celá řada, všechny však vycházejí z jednoduchého modelu působení na abstraktní podobu tohoto signálu, nebo-li na tvar jeho časového průběhu prostřednictvím frekvence, amplitudy, fáze či přímého řízení. Schéma modelu syntézy přináší obr. 2.



OBR. 2

Obecně může být potom tvar průběhu hudebního signálu dán:

- a) Vhodným frekvenčním, amplitudovým a fázovým uspořádáním jednoduchých signálů sinusového i nesinusového charakteru.
- b) Vhodnou změnou frekvenčního, amplitudového a fázového uspořádání složitěho signálu různého charakteru.
- c) Vhodným působením na frekvenci, amplitudu nebo fázi jednoduchého či složitěho signálu různého charakteru.
- d) Vhodným působením přímo na tvar průběhu jednoduchého či složitěho signálu různého charakteru.

Na základě tohoto zobecnění způsobů syntézy hudebního signálu lze pro praktické potřeby zkonkretizovat tyto základní metody:

1. *Metody součtové* (additive synthesis)

Tyto metody (ad a) vycházejí ze součtu signálů v časové i frekvenční oblasti. Jestliže funkce $F(t)$ a $G(t)$ reprezentují dva zvukové signály, pak $F(t) + G(t)$ je novým signálem kvantitativně i kvalitativně odlišným. I když je tento postup klasickým způsobem syntézy, nemusí vždy vést ke složitějšímu typu signálu, např. v případě použití Walshových funkcí.

2. *Metody rozdílové* (subtractive synthesis)

Tyto metody (ad b) vycházejí z rozdílu frekvenčních charakteristik komplexního signálu a filtru. Jedná se v podstatě o analytický postup potlačování či zdůrazňování frekvenčních složek daného signálu filtrací. V tomto případě bývá výsledný produkt syntézy vždy jednodušší než výchozí signál.

3. *Metody modulační* (modulation synthesis)

Tyto metody (ad c) vycházejí z ovlivňování daného parametru hudebního signálu signálem jiným. V případě funkcí $F(t)$ a $G(t)$ odpovídá výsledný signál funkci $F[G(t)]$ nebo v případě tzv. kruhové modulace $F(t) \times G(t)$. Tento způsob syntézy vede vždy ke složitějšímu výslednému signálu.

4. *Metody tvarové* (waveshaping synthesis)

Tyto metody (ad d) vycházejí buď z přímého působení na signál v jeho časové oblasti nebo z realizace požadovaného tvaru jeho časového průběhu.

Metody součtové a rozdílové představují **lineární** proces zpracování zvukového signálu, protože výsledný signál může obsahovat pouze ty frekvenční složky, které již existovaly na počátku jeho syntézy, ať už v dílčích jednoduchých signálech nebo v jediném signálu složitěm. Naproti tomu modulační a tvarové metody dávají vznik zcela novým frekvenčním složkám, které nebyly ve výchozím signálu obsaženy. Tyto nové složky jsou důsledkem **nelineárních** závislostí, typických právě pro tyto způsoby zvukové syntézy.

Proces praktické syntézy, respektující podle typu realizovaného signálu různou měrou základní dimenze jeho barvy, je ve své složitosti odvislý přirozeně od použité metody. V zásadě však jeho realizační schema, které je uvede-



OBR. 3

no na obr. 3, zůstává neměnné. Jedná se vždy o proces **řízené generace** a **řízeného lineárního** či **nelineárního zpracování** zvukového signálu (v jeho elektrické podobě) za účelem naplnění zvukově estetického záměru. Přestože takto získaný hudební signál je ve své konečné podobě vždy analogového (spojitého) charakteru, může mít proces generace, zpracování i řízení podobu jak **analogovou**, tak **digitální** (číslicovou). Digitální podoba syntézy hudebního signálu znamená využití výpočetní techniky, protože každá metoda syntézy má svůj matematický model. Ryze analogové způsoby syntézy jsou především využívány v komerčních syntezeátorech, hybridní systémy mají digitalizovaný především proces řízení, event. i generaci signálu. Digitální metody zpracování zvukového signálu (lineární i nelineární) jsou technicky velmi náročné, jedná se o digitální podobu filtrace, modulace, tvarování atd., a proto ryze digitální systémy představují dosavadní technický vrchol zvukových syntezeátorů.

Z hlediska rychlosti realizace syntézy pracuje naprostá většina analogových systémů v **reálném čase**, kdy požadovaný tón resp. zvuk, odpovídající nastavení systému, se ozve okamžitě se spuštěním tohoto systému, tj. se stisknutím klávesy či jiného ovládacího prvku. Hybridní a ryze digitální systémy pracují s **realizační prodlevou**, ve které probíhá výpočet generace, zpracování nebo řízení syntézy. Ty nejdokonalejší systémy realizují proces syntézy tak vysokou rychlostí, jako by probíhal v reálném čase, což je typické při použití jednoúčelově zaměřeného technického a programového vybavení. Použití univerzální výpočetní techniky znamená vždy určitou realizační prodlevu v procesu zvukové syntézy, která však v laboratorních podmínkách hraje minimální roli.

Následující kapitoly přinášejí základní informace o v současné době nejuzívanějších metodách syntézy hudebního signálu pro komerční, studiové i vědecko-výzkumné použití se stručným rozбором jejich teoretické i praktické problematiky.

2. Součtová syntéza

Součtové metody syntézy patří k vůbec nejstarším a také v minulosti nejuzívanějším způsobům umělé generace hudebního signálu. Jsou založeny, jak bylo již uvedeno, na součtu jednoduchých signálů v časové i frekvenční oblasti. V zásadě je lze rozdělit na dvě velké skupiny fourierovských a nefourierovských metod.

Fourierovské metody syntézy vycházejí z Fourierova rozvoje periodického signálu. Podle tohoto rozvoje lze signál libovolného časového průběhu, vyhovujícího tzv. Dirichletovým podmínkám, tj. že je periodický s konečným počtem nespojitostí 1. druhu na uzavřeném intervalu periodicity, rozložit na řadu dílčích harmonických (sinusových) kmitů. Dirichletovy podmínky splňuje každý reálný hudební signál konkrétní výšky, resp. každý hudební tón, nemusí je však splňovat každý graficky zadaný průběh (např. průběh $\text{tg } x$). Tento zvukový signál si lze potom představit jako součet sinusových signálů, jejichž frekvence je celistvými násobky frekvence rozkládaného tónu.

$$F(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (1)$$

kde A_0 je stejnosměrná složka, pro syntézu bezvýznamná
 A_k amplituda k -té harmonické
 n počet harmonických, odpovídající požadované přesnosti analýzy či syntézy zejména při digitálním zpracování
 k číslo příslušné harmonické
 ω kruhová frekvence $\omega = 2\pi f$
 φ_k fázový posuv k -té harmonické
 t čas

Uvedený rozvoj periodického signálu v řadu jednotlivých harmonických, tj. v základní nebo první harmonickou a vyšší harmonické, příslušných amplitud a fází je nejrozšířenějším analytickým postupem v akustice. Ale právě tak, jako lze libovolný tón rozložit na jednotlivé harmonické sinusového průběhu, tak jej lze zpětně z těchto harmonických znovu složit. Tento nejjednodušší způsob zvukové syntézy řeší barvu hudebního signálu z hlediska zakmitaného stavu. Jeho praktické použití je známo už z poloviny 19. století a nejznámějšího komerčního uplatnění došlo v Hammondových elektrofonických varhanách. Princip této statické syntézy založené na konkrétních intervalových vztazích mezi harmonickými složkami není však typický jenom pro vnitřní strukturu izolovaného tónu, ale i pro každý hudební signál v té nejobecnější podobě např. souzvuku. Jako ukázka čís. 1 v příloze jsou demonstrovány právě uvedené intervalové vztahy mezi 2. až 15. a 1. harmonickou při jejich stejné amplitudě a nulovém fázovém posuvu. Další tři ukázky prezentují postupný nárůst harmonických v úrovněvé sestupné tendenci (-3 dB/harm.), ve stejné úrovni a v úrovněvé vzestupné tendenci ($+3 \text{ dB/harm.}$) pro 1. až 15. harmonickou, dále pro liché a sudé harmonické při obdobných změnách $-6, 0, +6 \text{ dB/harm.}$ Vliv úrovně harmonických na tvar kmitu a tím na barvu takto vytvořeného tónu je z ukázek zcela zřejmý.

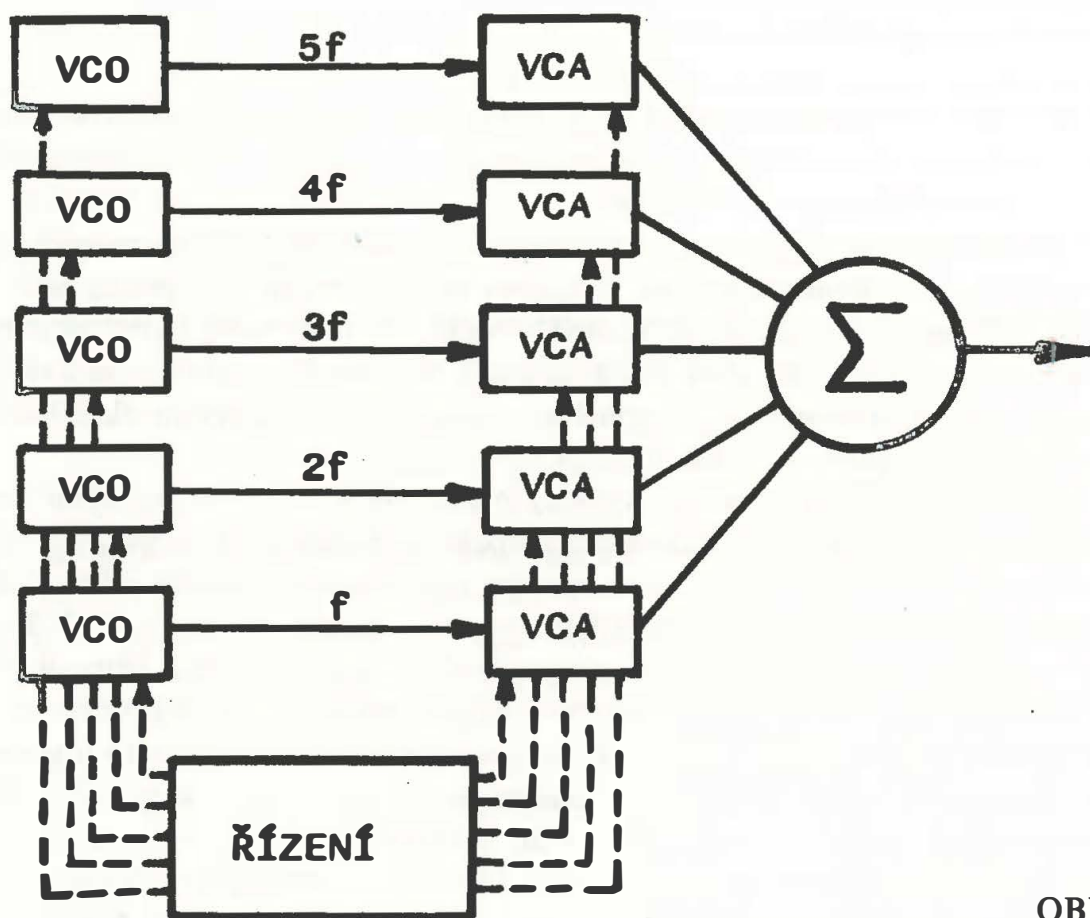
Vedle velikosti příslušné harmonické složky vstupuje do syntézy také její fázový posuv. Na vliv tohoto posuvu ve vztahu k subjektivnímu vjemu barvy

existovala řada protichůdných názorů, ale až použití digitální techniky prokázalo závislost vjemu barvy hudebního signálu na fázovém uspořádání jeho složek. Tento vliv je však kvantitativně podstatně menší a kvalitativně zcela odlišný od vlivu úrovně složek na barvu. Projevuje se hlavně při vyšším počtu a vysoké úrovni harmonických zejména pro posuvy $\pm 90^\circ$ (viz lit. 18). Ukázka čís. 5 přináší oscilogramy tónů s rozličným uspořádáním fáze harmonických složek. Z této ukázky je též zřejmé, že fázový posuv výrazně určuje tvar průběhu vlny při neodpovídajícím, evidentně menším vlivu na vjem barvy signálu. Zvuková identifikovatelnost fázových změn je přirozeně též odvislá od kvality záznamu a reprodukce ukázky zejména v souvislosti s fázovým zkreslením opakovaného přepisu záznamu.

Dosavadní ukázky součtové syntézy pracovaly s naprosto pevnými harmonickými vztahy ve svém frekvenčním spektru. Avšak u řady reálných hudebních signálů se objevují v tomto spektru určité neharmonicity jako důsledek nehomogenit a nelinearit kmitajícího systému (např. vliv materiálu). Tyto neharmonicity jsou postřehnutelné pouze kvalitativně, v žádném případě nejsou vnímány jako konkrétní frekvenční vztahy mezi složkami. V procesu zvukové syntézy neperkusních signálů se od simulace neharmonicit často upouští, avšak při generaci tónu některých vyladěných bicích nástrojů je nutné se neharmonickými vztahy ve spektru zabývat. Ukázka čís. 6 ilustruje jednak postupné rozlad'ování osmi harmonických a jednak syntézu typických tónových bloků užívaných v elektroakustické hudbě, často odvozovanou též od vzniku rozdílových kombinačních tónů.

Reálný hudební signál se od abstrakce neměnného stacionárního tónu, tak jak jej uvedený model syntézy prezentoval, dosti odlišuje. Pro zvuk většiny hudebních nástrojů jsou totiž typické přechodové (tranzientní) jevy spojené s jeho nasazením a dozníváním. V oblastech těchto jevů probíhají velmi rychlé změny amplitudy, frekvenci a fáze harmonických i neharmonických složek signálu, který se již vůbec neztotožňuje s fourierovským modelem periodické funkce. U neperkusních hudebních signálů s výraznou quasistacionární částí tónu je možné zavést pro harmonické složky časovou závislost a realizovat ji řízením velikosti jejich amplitudy. Tímto způsobem lze již dosáhnout poměrně kvalitních „kopií“ tónu některých hudebních nástrojů. Blokové schéma této dynamické syntézy viz výše na obr. 4. Kromě napěťově řízených zesilovačů (VCA) jsou zde též řízeny oscilátory (VCO) pro případné frekvenční posuvy vznikající při nasazení tónu. Vedle přechodových jevů je i ustálený stav signálu charakterizován pomalu probíhajícími změnami, tzv. Špeldovými fluktuacemi (lit. 20), v procesu subjektivního vnímání kvalitativně velice důležitými. Jejich realizace bývá nejčastěji spojována s použitím různých typů modulací.

Podstatně složitější situace však nastává při součtové syntéze zvuků perkusního charakteru. Frekvenční spektrum nemá v tomto případě podobu diskrétních harmonických složek, ale přechází v souladu s nad všechny meze ro-



OBR. 4

stoucí periodou tranzientního signálu ve spojitou čáru. Fourierův diskretní rozvoj (1) pak přechází v integrální transformaci (viz lit. 16),

$$F(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

kde $F(f)$ je spojitá spektrální funkce signálu $F(t)$

f frekvence
 t čas

Fyzikální interpretace této transformace v původním tvaru působí však určité potíže, ale mimořádného významu nabyla však její diskretní podoba při využití digitálního zpracování signálu. Diskretní Fourierova transformace (DFT) a zejména pak některé její výhodné algoritmy, známé pod označením Rychlá Fourierova transformace (FFT), došly též uplatnění v syntéze hudebních signálů. Pomocí této transformace lze totiž provádět zásahy do frekvenční struktury signálu, jako je např. jeho transpozice, filtrace či modulace na základě daného programu. Jednouúčelové procesory takto programově vybavené jsou potom schopny zpracovávat signál v reálném čase. Tímto způsobem je te-

dy možno generovat i zpracovávat signály perkusního i neperkusního charakteru, tónové i netónové povahy. Omezujícími faktory použití této transformace jsou právě otázky rychlosti a kapacity digitálního zařízení, vyplývající z nejjednoduššího programového vybavení. Tón ve svém reálném průběhu je totiž nutno doslova bod po bodu spočítat na základě dosti komplikovaného zadání, což značně omezuje komerčnější použití této jinak velmi dokonalé metody syntézy hudebního signálu. Z tohoto důvodu se velmi často fourierovská syntéza kombinuje s jinými metodami, popisovanými v dalších kapitolách.

Praktická realizace fourierovské syntézy je dnes převážně spojována s využitím digitální techniky, proto pro prvních pět ukázek v příloze bylo použito programu harmonické syntézy na mikropočítači. Vedle obdobných universálních výpočetních systémů se pro syntézu konstruuje též jednoúčelové digitální syntezátory, které potom pracují s podstatně vyšší rychlostí. Použití volných sinusových oscilátorů v ukázce čís. 6 je dnes už spíše historickou demonstrací statické syntézy hudebního signálu.

Přednosti digitální techniky a snahy po programovém zjednodušení vedly k vývoji součtových metod **nefourierovského** typu, které vycházejí z ryze diskrétních transformací signálu obecného charakteru. To znamená, že signál libovolného časového průběhu je rozkládán na řadu dílčích signálů nesinusového, diskrétního průběhu, které svými vlastnostmi vyhovují digitálnímu zpracování. Nejjednodušším signálem pro účely digitálního zpracování je signál obdélníkového průběhu, jehož amplituda nabývá v čase pouze dvou hodnot $+1$ a -1 , resp. 1 a 0 . Systém funkcí obdélníkového charakteru, vhodných pro analýzu i syntézu v našem případě hudebního signálu, byl poprvé popsán J. L. Walshem v roce 1922.

Walshovy funkce vytvářejí úplnou řadu ortogonálních funkcí a jsou jednoduše generovatelné digitální technikou. Grafické znázornění prvních šestnácti a digitální vyjádření prvních dvaatřiceti Walshových funkcí je přináší obr. 5. V terminologii Walshových funkcí je často uváděno též jejich rozdělení na funkce sudé $Ca_n(t)$ a liché $Sal_n(t)$ jako obdoba $\cos(t)$ a $\sin(t)$ spolu s náhradou frekvence pojmem „sequence“, definovaného jako polovina průměrného počtu průchodů nulou za sekundu.

Rozvoj periodické funkce v řadu Walshových funkcí je dán následujícím vztahem

$$F(t) = \sum_{k=0}^n C_k \text{Wal}_k(t) \quad (3)$$

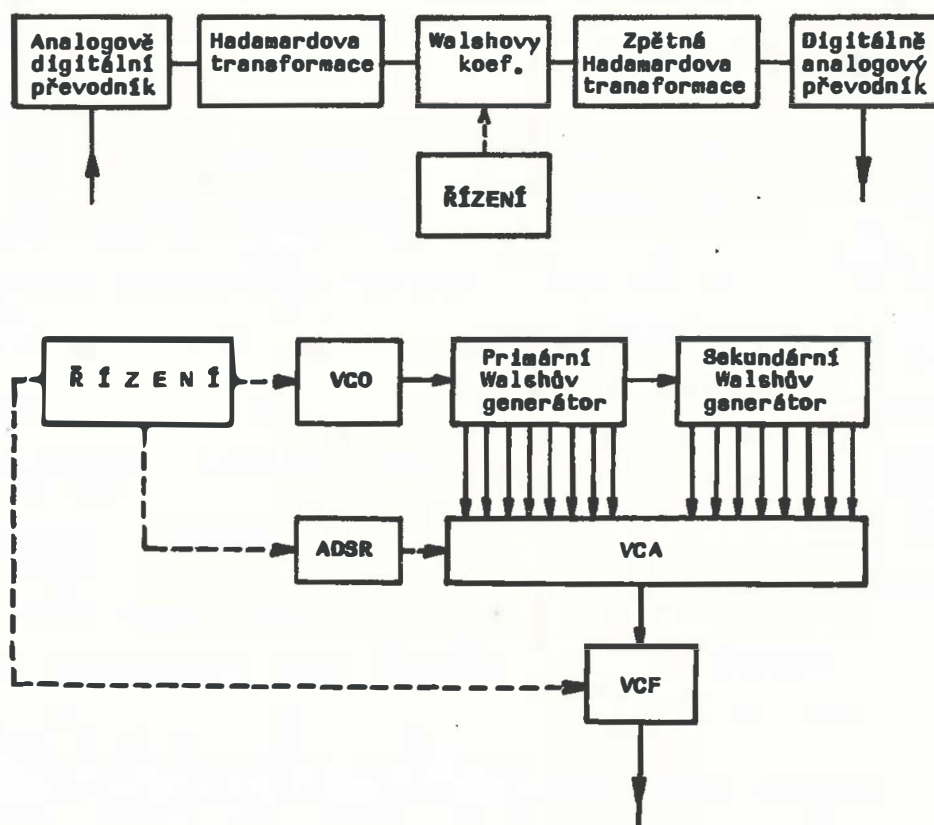
kde C_k je Walshův koeficient k -tého řádu

$\text{Wal}_k(t)$ Walshova funkce k -tého řádu

n nejvyšší použitý řád, odpovídající požadované přesnosti analýzy či syntézy

Výpočetní podoba Walshova rozvoje je označována jako Diskrétní Walshova transformace (DWT) a k jejím nejznámějším algoritmům patří transformace Hadamardova (HT). Její velkou předností oproti transformaci FFT je práce pouze s reálnými čísly, což se přirozeně odráží v jednodušším technickém i programovém vybavení.

Walshových funkcí se též používá ke generaci časových obálek tónu jako celku nebo obálek jeho Walshových složek. V tomto případě je generována jedna perioda zvoleného časového průběhu, která je ve své polovině, tj. při 32 složkách na 16. vzorku, v soulasu s trváním quasistacionární části tónu prodloužena. Ačkoliv Walshovy funkce slouží k vytváření periodických průběhů, lze z jejich základního souboru odvodit také složky neharmonické v daných frekvenčních vztazích pomocí sekundárního generátoru. Velikost Walshových koeficientů je možné též modulovat. Na obr. 6 je uvedeno blokové schéma



OBR. 6

analýzy a zpětné syntézy hudebního signálu Hadamardovou transformací v reálném čase a blokové schéma jednoduchého syntezátoru s generátorem Walshových funkcí.

Použití Walshových funkcí a diskretních transformací přináší při syntéze hudebního signálu řadu nesporných výhod. Jednoduchost technického i programového vybavení, časová nenáročnost a široké zvukové možnosti dávají této součtové metodě určité perspektivy. Vedle toho však nefourierovské pojetí

struktury signálu zejména z analytického hlediska bude stále značnou překážkou širšímu využití této metody.

Vedle uvedených součtových metod syntézy hudebního signálu existuje ještě celá řada jejich odvozených variant i kombinací, vyvinutých obvykle pro konkrétní zvukový účel. Předností všech součtových metod je hlavně jejich linearita a reciprocita i kompaktilita s daným analytickým postupem. Celkovou nevýhodou je však značná komplikovanost teoretická i praktická, která znemožňuje rozšíření těchto metod do oblasti komerčních syntezátorů a elektronických hudebních nástrojů. K tomu přistupuje také ta skutečnost, že uvedené součtové metody vycházejí z abstraktního rozkladu hudebního signálu a neodpovídají elektroakustickému modelu vzniku tónu na hudebním nástroji. Z uvedených důvodů je použití těchto metod omezeno na oblast hudebně-akustického výzkumu a více na studiovou než „živou“ realizaci elektroakustické hudby.

3. Rozdílová syntéza

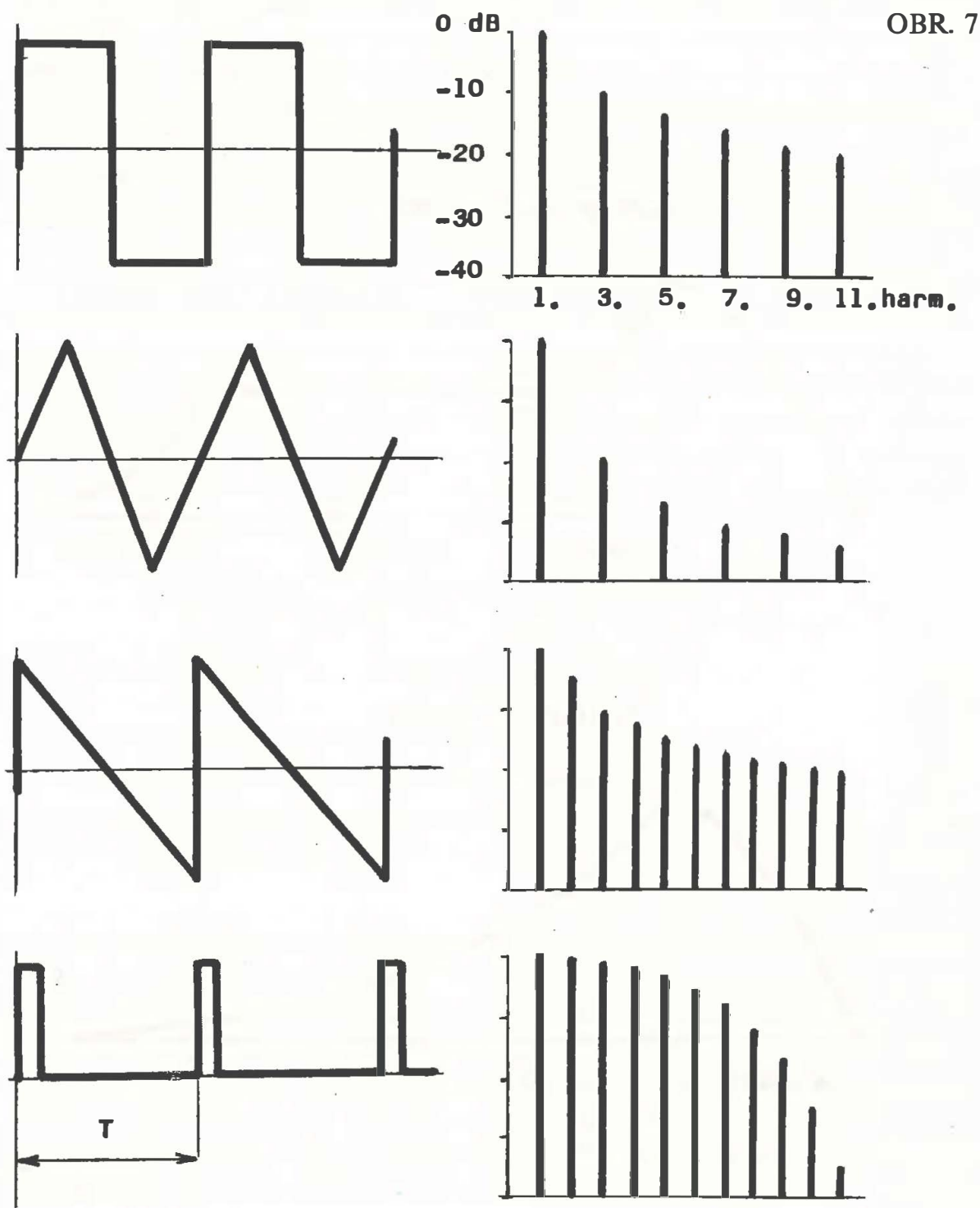
Rozdílové metody syntézy hudebního signálu, někdy též označované jako metody analytické, jsou založeny na **řízené filtraci komplexního signálu**. Tyto metody patří pro svoji jednoduchost a zvukovou účinnost k vůbec nejrozšířenějším způsobům syntézy zejména v komerční sféře. Filtrace zvukového signálu jako realizační postup provázela v podstatě celý dosavadní vývoj elektroakustické hudby, ale do postavení ryze syntetického postupu se dostala až důsledným využitím napěťového řízení funkce elektronických obvodů. Nástup napěťového řízení v oblasti zvukové syntézy je pak hlavně spojován se jménem R. A. Mooga, autora prvního komerčně využitelného syntezátoru.

Princip **napěťového řízení** funkce elektronických obvodů umožňuje ovládat parametry obvodů, tj. frekvenci u oscilátorů a filtrů, zesílení u zesilovačů atd., velikostí stejnosměrného napětí, které je přiváděno do obvodu zvenčí. V praxi to představuje např. závislosti: čím větší řídicí napětí, tím vyšší frekvence, větší zesílení apod. Tímto způsobem lze pak v krátkém časovém okamžiku měnit nastavení parametrů obvodů tak, aby odpovídalo v reálném čase vývoji složek hudebního signálu.

Ve smyslu obecného schematu syntézy dle obr. 3 je v případě rozdílové metody použit jako zdroj signálu **napěťově řízený oscilátor (VCO)**, který produkuje komplexní signál s bohatým frekvenčním spektrem. U tohoto oscilátoru je řízena jednak frekvence a jednak tvar průběhu signálu. Na obr. 7 jsou uvedeny nejužívanější typy komplexních signálů s jejich amplitudovými frekvenčními spektry. Řízení tvaru je realizováno jako přechod pilového průběhu v trojúhelníkový, event. „levého“ pilového průběhu přes trojúhelníkový v pilový průběh „pravý“, a jako přechod obdélníkového signálu v signál pulzní při změně tzv. střídy (viz lit. 17). Jako další zdroj signálu bývá používán též šu-

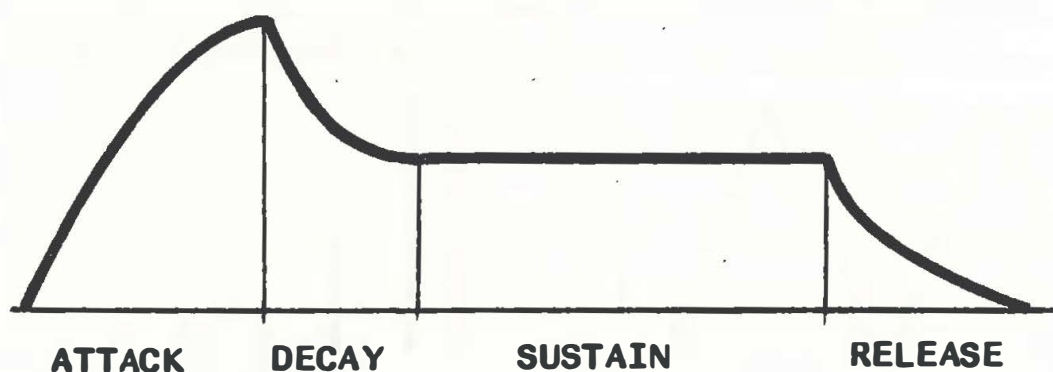
mový generátor (NOISE), produkující bílý šum (při stejném energetickém zastoupení všech frekvenčních složek) nebo barevný šum, nejčastěji růžový (s klesající efektivní hodnotou složek k vyšším frekvencím -3 dB/okt.)

Z napěťově řízeného oscilátoru nebo šumového generátoru je signál veden do **napěťově řízeného filtru (VCF)**, který přenáší signál pouze v daném frekvenčním intervalu. Nejužívanějšími typy filtrů jsou dolní propust, propou-



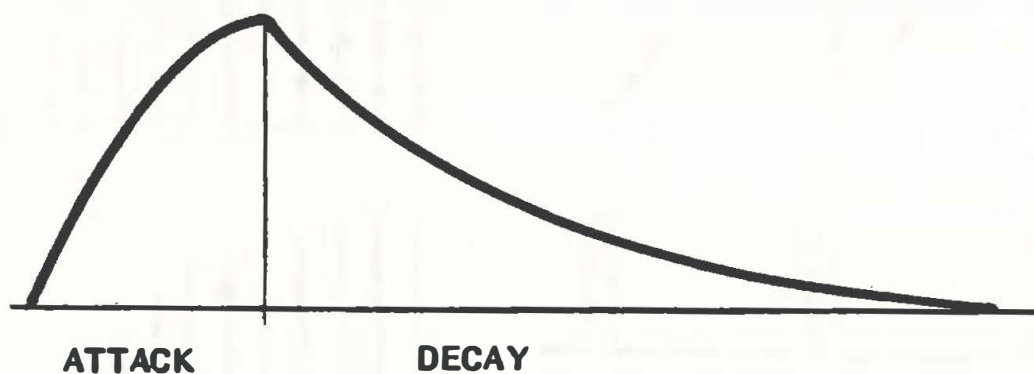
štějí frekvenční složky do určité zvolené mezní frekvence, a pásmová propust, propouštějící složky vybraného frekvenčního úseku. Pásmový filtr bývá také často realizován seriovou kombinací horní a dolní propustě. U dolnoproputního filtru je napěťově řízena poloha mezní frekvence, nad kterou dochází k více či méně strmému poklesu frekvenční charakteristiky přenosu. Tato strmost, která určuje účinnost filtrace, se většinou ovládá pouze „ručně“. U pásmového filtru se řídí poloha střední frekvence, šířka filtru, resp. jeho kvalita je opět nastavována jenom „ručně“. Ukázka čís. 7 v příloze demonstruje dolnoproputní a pásmovou filtraci pro skokově se snižující mezní a střední frekvenci u signálů označovaných jako pila, trojúhelník, obdélník a pulz. Z jejich průběhu je sice zřejmá tvarová nedokonalost, daná jednodu-

NEPERKUSNÍ SIGNÁL



Amplituda ↑

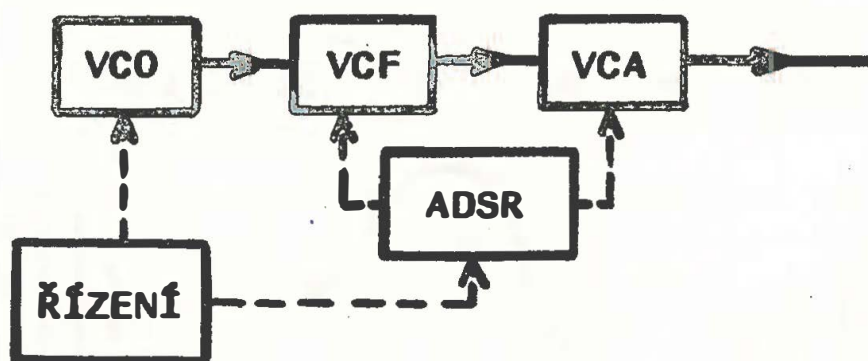
PERKUSNÍ SIGNÁL



→ čas

chou koncepcí napěťově řízeného oscilátoru komerčního syntezátoru, avšak zvukově barevná charakteristika je v souladu s teoretickými průběhy (obr. 7). V ukázce je vidět rozdílný vliv dolnoproustní a pásmové filtrace v oblasti vyšších frekvencí a možnost odfiltrování signálu až na základní harmonickou. Další ukázka čís. 8 již přináší příklady filtrace řízené exponenciální změnou napětí pro různé typy přeladění dolní a pásmové propusti. Výsledkem této řízené filtrace jsou značné změny ve tvaru časového průběhu tónu během krátkého časového úseku. Rychlost i průběh těchto změn lze nastavit, event. též odvozovat od funkce jiného obvodu. Filtrace bílého šumu při odlišné strmosti dolnoproustního a kvalité pásmového filtru je znázorněna v ukázce čís. 9.

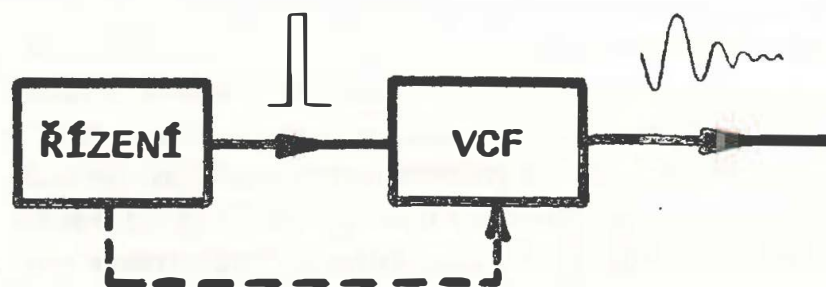
Uvedený způsob řízené filtrace slouží k syntéze dynamické závislosti barvy hudebního signálu. K tvarování jeho obálky, resp. jednorázové amplitudové modulaci, odpovídající perkusnímu či neperkusnímu charakteru tónu, je určen **napěťově řízený zesilovač (VCA)** spolu s **generátorem obálky**. Tento generátor produkuje jednorázově či opakovaně průběh typu ADSR či AD (Attack, Decay, Sustain, Release) pro uvedené typy signálů, viz obr. 8. Rychlost nárůstu či poklesu exponenciálních dílů A, D, R je nastavitelná v širokých mezích. Ukázka čís. 10 přináší příklady různé délky nasazení a dozívání tónu včetně přechodu ze zakmitaného stavu do dozívání. Řízená filtrace a zesílení, jak je schematicky znázorněna na obr. 9, tvoří základ každého syntezátoru, vycházejícího z principu rozdílové syntézy. Příklad tvarování obálky tónu za současného přeladování filtru, typický právě pro tento způsob syntézy, je uveden v ukázce čís. 11.



OBR. 9

Šumové a hlukové příměsi jsou získávány společně nebo individuálně řízenou filtrací a zesílením šumu. Nastavení neharmonických poměrů mezi frekvenčními složkami není u rozdílové syntézy realizovatelné, protože je zpracováván komplexní signál naprosto harmonického spektra bez možnosti vzniku nových složek. Napěťově řízené oscilátory nejsou ovládány pouze napětím z klávesnice, ale též dalšími signály periodického, neperiodického i nahodilého charakteru. Typické frekvenční zdvihy jsou obvykle odvozovány od obálek typu AD nebo ADSR (ukázka čís. 12).

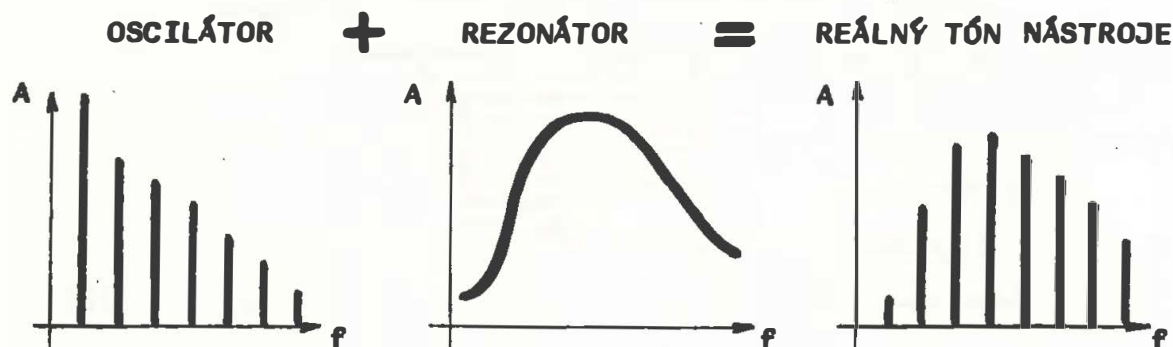
Zajímavým způsobem využití napěťově řízeného filtru je metoda **rezonanční syntézy** (obr. 10). V tomto případě se využívá filtru



OBR. 10

ve funkci oscilátoru. Při velmi úzké šířce pásma, resp. při vysoké kvalitě je filtr náchylný k rozkmitání na naladěné frekvenci a pak stačí vnější impulz ke generaci více či méně tlumených kmitů. Této metody se s výhodou používá v syntezátorech perkusních zvuků.

Rozdílový způsob syntézy hudebního signálu doznal největšího rozšíření ve sféře komerčních syntezátorů. Relativně jednoduchá konstrukce základních obvodů vedla k vývoji celé řady variant syntézy a praktického řešení monofonních i polyfonních syntezátorů analogového i hybridního provedení. Vysoká zvuková účinnost rozdílové syntézy hudebního signálu, která spolu s komerční dostupností patří k největším přednostem této metody, vyplývá především z realizace elektroakustického modelu vzniku tónu na hudebním nástroji ve spojení oscilátor—rezonátor (obr. 11).



OBR. 11

K nevýhodám uvedené metody patří zejména nemožnost aktivního zásahu do struktury zpracovávaného komplexního signálu, u něhož jsou následnou filtrací pouze stávající složky zdůrazňovány či potlačovány. Proto se u zvukově náročné syntézy kombinují rozdílové metody se součtovými nebo ještě častěji s modulačními metodami.

4. Modulační syntéza

Modulací zvukového signálu je označována změna jeho fyzikálních vlastností v důsledku působení jiného signálu. Tato změna, periodická či neperiodická, jednorázová či opakující se, je spojována zejména s přirozeným charakterem hudebního signálu. Z tohoto hlediska spočívá význam modulace především v kvalitativním přístupu k zvukově estetickým vlastnostem signálu, jako je tremolo, vibráto nebo různé druhy fluktuací. Pokud však velikost působení jednoho signálu na vlastnosti druhého překročí určitou hranici, dojde ke změnám, které vedou ke vzniku signálu úplně nového.

V procesu syntézy hudebního signálu může být modulační technika využita dvojím způsobem, buď jako prostředek **kvalitativních** změn již realizovaného signálu, nebo jako prostředek **kvantitativních** změn pro realizaci nového signálu. Význam kvalitativních nebo kvantitativních změn je nutno chápat v tomto případě důsledně z hlediska **subjektivního** vjemu, např. jako rozdíl v tónu hraném vibráto a non vibráto na jednom hudebním nástroji nebo jako rozdíl v tónech různých hudebních nástrojů. Naproti tomu z objektivního hlediska by význam kvalitativních a kvantitativních změn byl přirozeně opačný. Hranice mezi kvalitativními a kvantitativními změnami signálu v důsledku jeho modulace je velmi široká a odvislá od řady objektivních i subjektivních faktorů. I když je modulace procesem nelineárním, tzn. že při něm vznikají zcela nové složky, lze ji ze subjektivního hlediska rozdělit na **quasilineární** a **nelineární**. Při quasilineární modulaci je úroveň nově vzniklých složek tak nízká, že jsou na hranici postřehnutelnosti, kdežto u nelineární modulace jsou nové složky tak zřetelné, že zcela změní charakter signálu. Z praktického realizačního hlediska je snad nejvýstižnější rozdělení na základní typy modulací, které převážně **pasívně** zpracovávají stávající signál, a na vyšší typy modulací, které vedou **aktivně** ke generaci nového signálu.

K **základním typům modulací** patří modulace amplitudová, frekvenční, fázová a spektrální. Mezi **vyšší typy modulací** jsou zahrnovány modulace kruhová, frekvenční (Chowningova) a parametrická. Do tohoto rozdělení lze ještě zařadit modulaci pulzní, která má však větší význam v přenosu a zpracování hudebního signálu než přímo v jeho generaci.

Při **amplitudové** modulaci nastává změna amplitudy c_0 nosného signálu $F(t)$ modulujícím signálem $G(t)$. Obecný výraz pro tuto modulaci má potom tvar

$$f(t) = c_0(1 + m \cdot G(t)) F(t) \quad (4)$$

kde m je hloubka modulace, která se pohybuje v rozmezí 0 až 1. Nosný modulovací signál $F(t)$ může nabývat nejrůznějších podob periodického i neperiodického signálu, modulující signál $G(t)$ pak od sinusového průběhu přes obdélníkový až k jednorázové modulaci obálkou ADSR. Výsledný signál $f(t)$ má

potom spektrum obohacené o součtové a rozdílové kombinace frekvenčních složek modulovaného a modulujícího signálu, tzv. postranní pásma. Při malých hloubkách modulace nejsou zvukové změny signálu příliš zajímavé, avšak při tremolu, např. u bicích nebo smyčcových nástrojů jako sledu rychle opakovaných tónů jsou vznikající postranní pásma již tak subjektivně zřetelná, že zapříčiňují určitý „barevný“ posuv ne-li přímo změnu charakteru signálu. Příklad 100% amplitudové modulace ($m = 1$) je uveden na začátku ukázky čís. 13 v příloze.

U frekvenční modulace nastává změna frekvence ω , nosného signálu $F(t)$ modulujícím signálem $G(t)$. V praxi má modulovaný signál periodický průběh komplexního charakteru (pila, trojúhelník, obdélník, pulz), modulující signál pak průběh periodický, nahodilý (odvozený od šumu) či jednorázový při modulaci obálkou AD nebo ADSR. V případě, že modulovaný i modulující signál má sinusový průběh, lze frekvenční modulaci popsat výrazem

$$f(t) = c_0 \sin \left(\omega t + \frac{\Delta \omega}{\Omega} \sin \Omega t \right) \quad (5)$$

kde $\Delta \omega$ je tzv. modulační zdvih a poměr zdvihu k modulující frekvenci $\frac{\Delta \omega}{\Omega}$

$= \beta$ je označován jako modulační index. Na velikosti tohoto modulačního indexu do značné míry závisí zvukový výsledek modulace. Pro $\beta < 0,1$ je frekvenční spektrum výsledného signálu obdobné spektru amplitudové modulace. Tato frekvenční modulace při nejčastější modulující frekvenci kolem 7 Hz je označována jako vibráto a je typická pro zvuk smyčcových a dechových nástrojů. Příklad vibráta přináší též ukázka čís. 13. Pro $\beta > 0,1$ se již objevují další postranní pásma, která lze výhodně využít ke změně charakteru modulovaného signálu. Takto aktivně zaměřená frekvenční modulace je potom zařazována mezi vyšší typy modulací hudebního signálu.

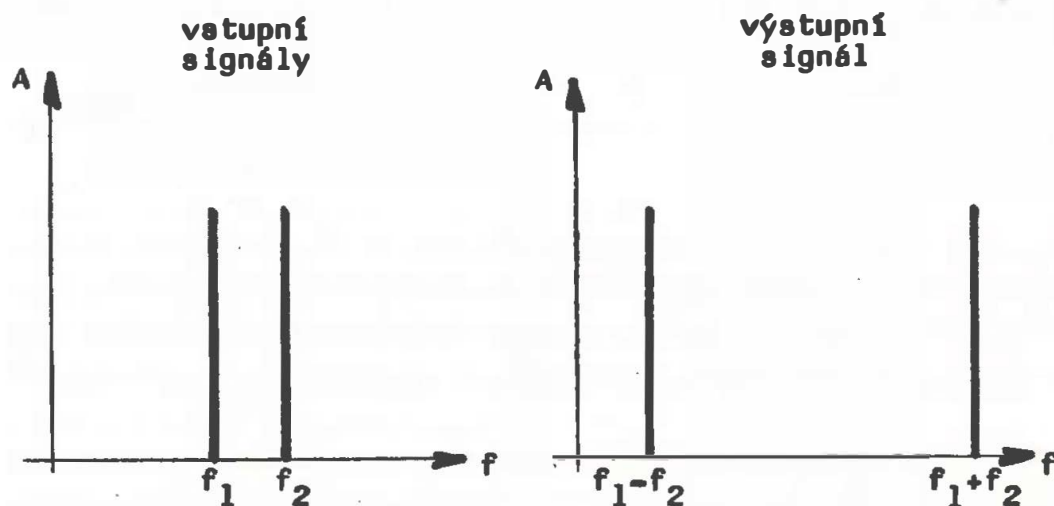
Při fázové modulaci se u modulovaného signálu periodicky či nahodile mění fáze. Ve srovnání s frekvenční modulací se jedná o jeden typ kmitů, což znamená, že změna fáze se zvukově projeví jako změna frekvence. Souvislost s Dopplerovým efektem, podle kterého se mění výška vnímaného zvuku při pohybu jeho zdroje nebo posluchače, je u fázové modulace zcela evidentní. Důležitý praktický rozdíl vůči frekvenční modulaci spočívá především v tom, že frekvenčně lze modulovat pouze zdroj signálu, zatím co fázově lze modulovat již realizovaný libovolný signál. Fázová modulace patří k nejefektivnějším a nejrozšířenějším úpravám zvukového signálu v komerční i nekomerční oblasti elektroakustické hudby.

Použitím quasiperiodické modulační funkce a paralelní modulace s konstantními fázovými vztahy vzniká velice působivé vibráto, typické např. pro soubor smyčcových nástrojů. Pomalá verze tohoto vibráta bývá označována

jako chorus efekt (viz ukázka čís. 13). Vedle vlivu rychlosti fázových změn na charakter signálu přináší v příloze ukázka čís. 14 příklad použití tzv. vazby při fázové modulaci. Jedná se vlastně o součet modulovaného a nemodulovaného signálu, při kterém nastává potlačování a zdůrazňování určitých frekvenčních oblastí spektra signálu v rytmu modulující funkce. Tento jev, podobný již spektrální formantové modulaci, se nazývá phasing.

Spektrální modulace, jako periodické či nahodilé ovlivňování frekvenční struktury modulovaného signálu, je realizována buď změnou tvaru průběhu signálu nebo přeladěním filtru. Modulaci **změnou tvaru** je možné uskutečnit na napěťově řízeném oscilátoru (VCO) mezi signály obdobného průběhu, tj. mezi trojúhelníkovým a pilovým a mezi obdélníkovým a pulzním. Příklad přináší ukázka čís. 15. Modulace **přeladěním filtru**, nebo též modulace **formantová**, je spojována vždy s použitím napěťově řízeného filtru (VCF) ve funkci dolní či pásmové propusti (ukázka čís. 15). Spektrální modulace, zejména pak modulace formantová, je zvukově velice účinná a oproti fázové modulaci přináší možnost konkrétní frekvenční orientace ve spektru modulovaného signálu.

Kruhová modulace, patřící již k vyšším typům modulací, provádí násobení dvou signálů. Na výstupu modulátoru se potom objeví součtová a rozdílová složka s potlačením původních signálů, viz obr. 12. Jsou-li vstupní signály komplexního charakteru,

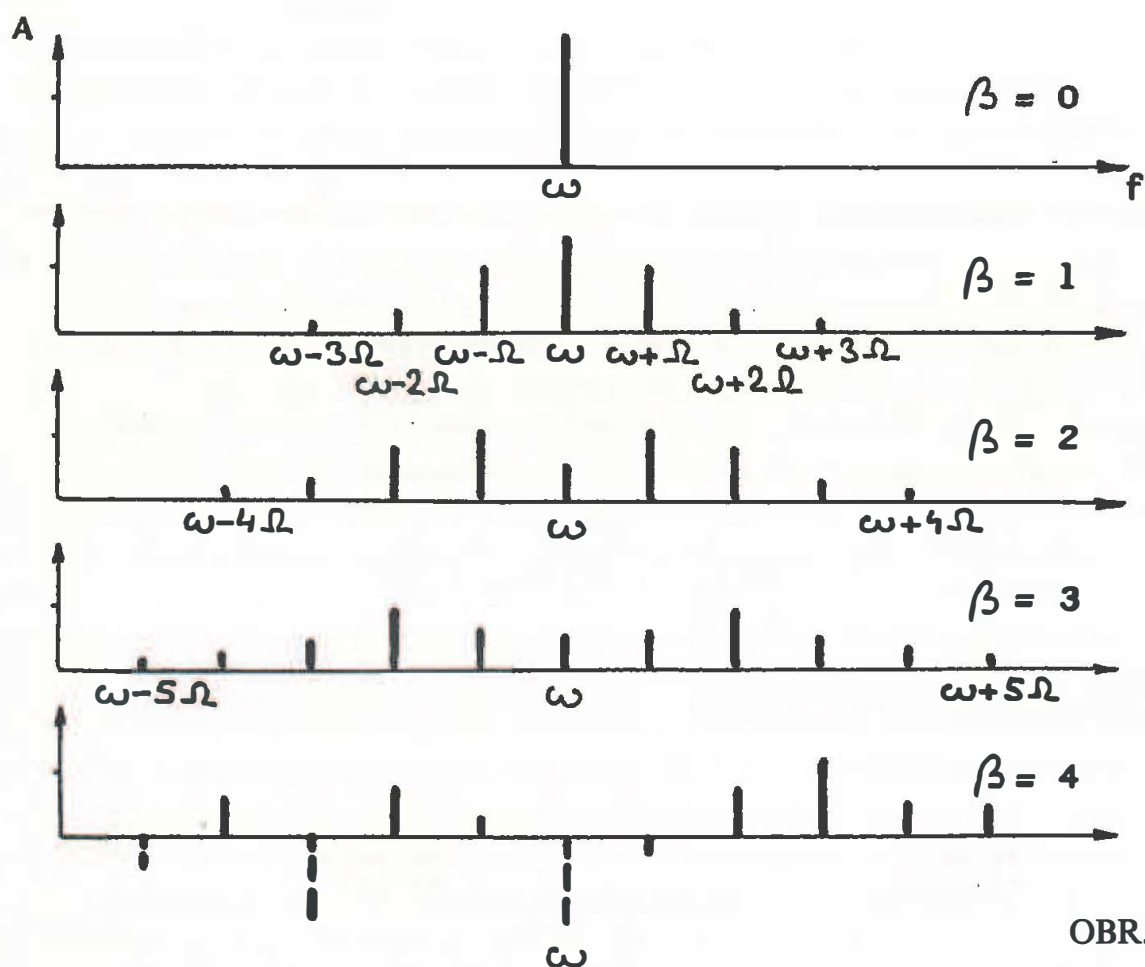


OBR. 12

je pak vlastně realizováno násobení všech jejich frekvenčních složek mezi sebou. Vznik zcela nových složek se složitými frekvenčními vztahy vede nejenom k radikální transformaci signálů původních, ale až k syntéze signálu zcela odlišného charakteru. Ukázka čís. 16 toto demonstruje pro harmonický i neharmonický vztah vstupních signálů.

Použití **frekvenční modulace** pro generaci hudebního signálu popsal poprvé v roce 1973 J. M. Chowning (lit. 8). Modulujícím i modulovaným signá-

lem je signál sinusového průběhu. Na obr. 13 je

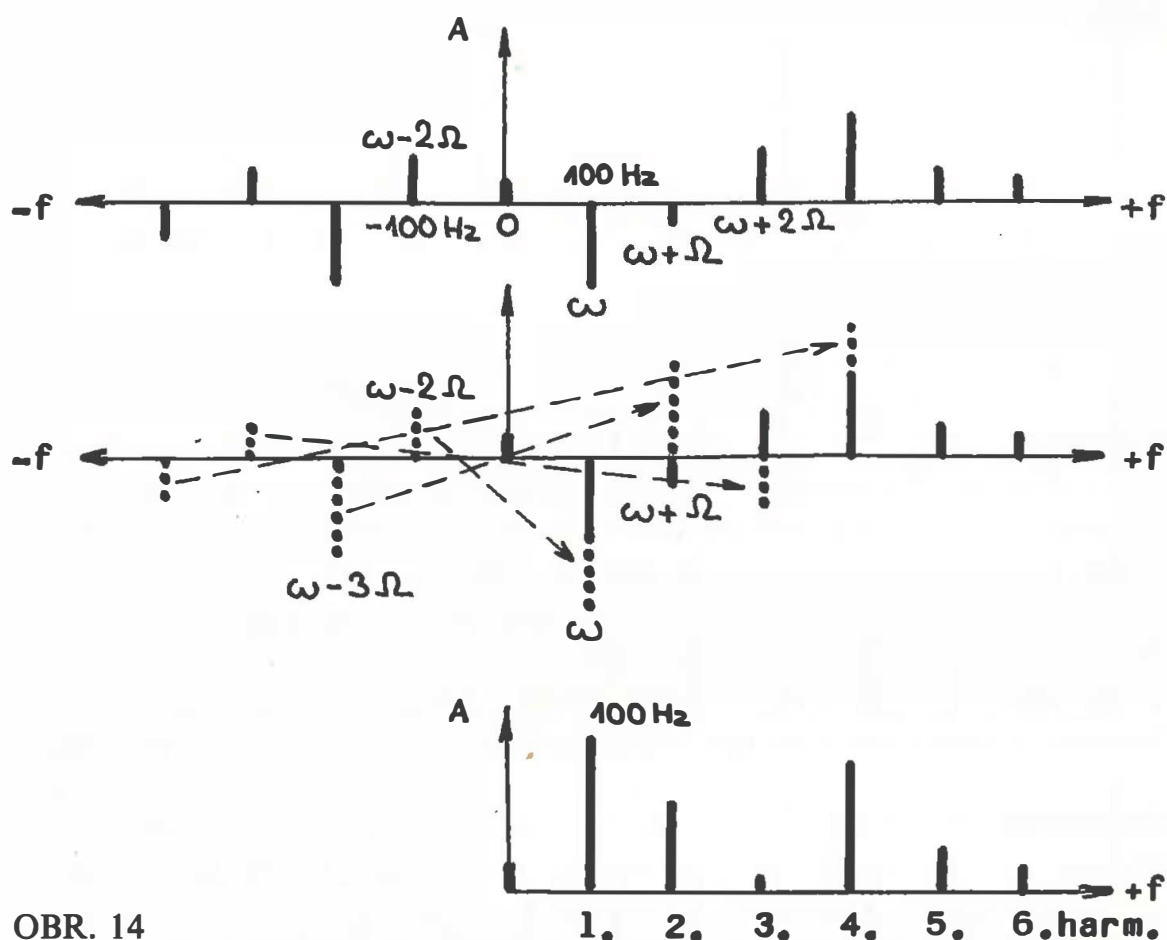


OBR. 13

znázorněno narůstání postranních frekvenčních pásem při stoupajícím indexu modulační pro vztah (5). Amplitudy nosné a postranních složek jsou dány Besselovými funkcemi a mohou nabývat i záporných hodnot, které vyjadřují protifázi. Spektrum s respektováním polarit složek je vyneseno na obr. 13 pro $\beta = 4$.

Polarity složek se potom s výhodou využívá v tzv. zrcadlení postranních pásem podle bodu 0 Hz. Na tomto jevu je založena široká variabilita syntézy frekvenční modulační. Při vhodné volbě nosné a modulační frekvence a velikosti indexu modulační spadají totiž spodní postranní pásma do oblasti záporných frekvencí. Z této oblasti se potom zrcadlí podle nulové frekvence při změně polarit do oblasti kladných frekvencí. Princip zrcadlení pro nosnou i modulační frekvenci 100 Hz a index modulační $\beta = 4$ přináší obr. 14.

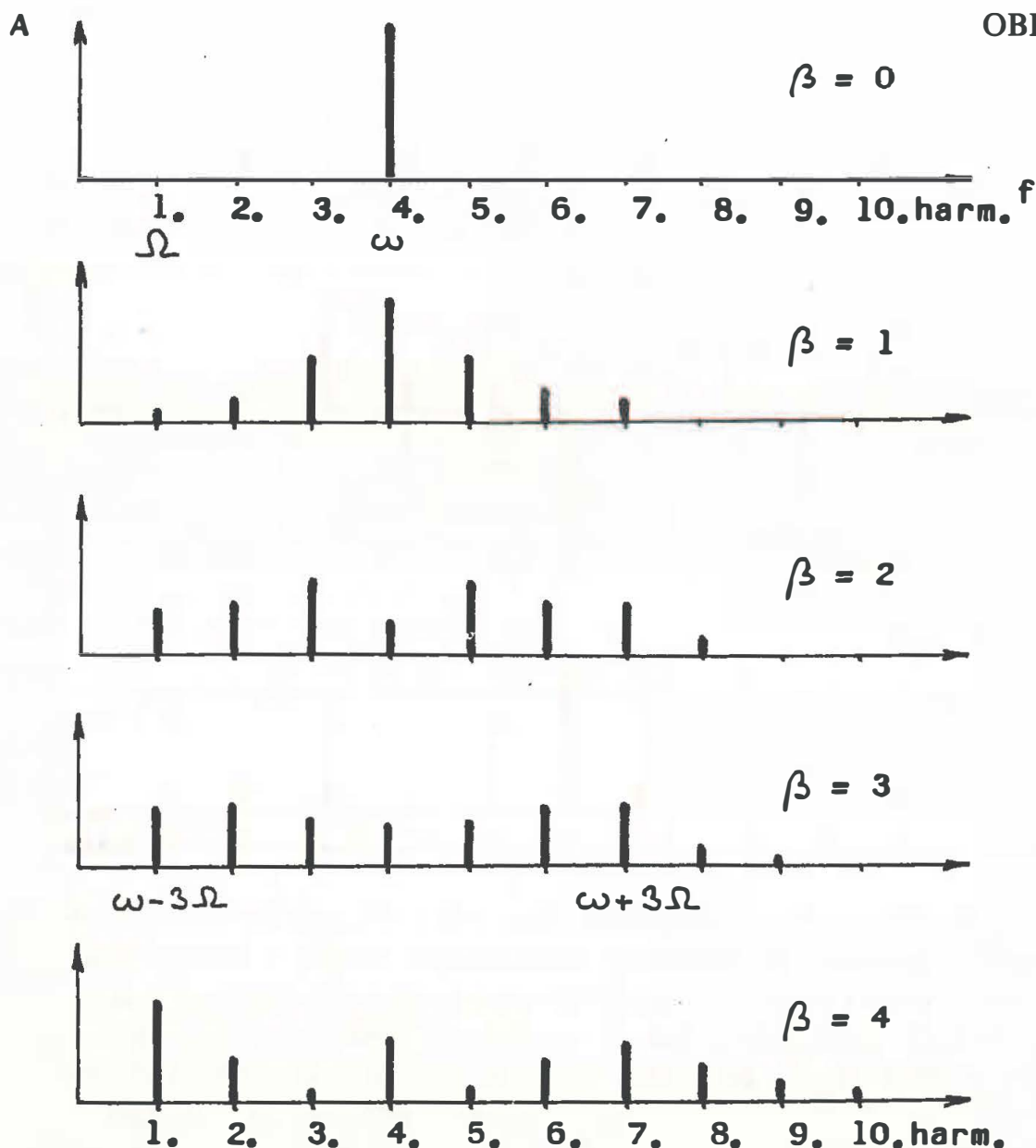
Je-li poměr nosné frekvence k modulační poměrem racionálních čísel, pak je spektrum výsledného signálu harmonické. Tvar tohoto spektra závisí také na velikosti indexu modulační, jak ukazuje obr. 15 pro frekvenční poměr 4 : 1.



OBR. 14

V případě poměru iracionálních čísel, při $1 : \sqrt{2}$, spadají složky z oblasti záporných frekvencí po zrcadlení mezi stávající složky v oblasti kladných frekvencí a vzniká neharmonické spektrum (viz obr. 16). Závislost tvaru spektra na indexu modulace se potom využívá při simulování časového vývoje spektra reálného tónu, kdy index modulace je generován jako jednorázová funkce. Vedle už uvedených parametrů vstupuje ještě do procesu syntézy velikost amplitud nosného a modulujícího signálu. Ukázka čís. 17 uvádí příklad syntézy frekvenční modulací pro různé poměry nosné k modulační frekvenci a pro stoupající modulační index.

Technika frekvenční modulace podstatně obohatila zvukové možnosti syntézy hudebního signálu. Nejprve byla implementována na jeden z prvních komplexních programů zvukové syntézy na počítači (lit. 7) a později začala být využívána též v komerčních syntezátorech. Nespornou předností syntézy frekvenční modulací je rozsáhlá zvuková variabilita při skutečně minimálním počtu zadávajících parametrů, které jsou teoreticky 3, prakticky jich bývá 6 až 8. Možnost syntézy neharmonického spektra nejrůznějších frekvenčních vztahů, včetně plynulého přechodu do spektra harmonického při jednoduché realizaci, využívající techniky digitálního řízení, to vše učinilo tuto metodu prozatím nejprogresivnější syntézou v oblasti komerčního využití. K nevýho-



dám syntézy frekvenční modulací patří nemožnost ovlivňování vývoje jednotlivých složek a individuálního zásahu do jejich úrovně a frekvenční polohy ve spektru. Proto také nelze využívat tuto metodu při skutečně exaktní syntéze v oblasti hudebně-akustického výzkumu, avšak pro komerční potřebu i ne zcela věrné napodobení tradičního zvuku, ale charakteristické a hlavně efektní při jednoduché realizaci, je víc než dostačující.

Zajímavou odvozeninou techniky frekvenční modulace je tzv. syntéza **lineárním rozmítáním**, založená na lineární změně frekvence sinusového signálu, který je násoben modulačním zvukem, jehož perioda je shodná s trváním jednoho cyklu rozmítnutí. Touto metodou lze získat mimo jiné též zcela neobvyklé signály, jako je např. Moebiov zvuk se spojitým přechodem mezi časovou a frekvenční oblastí (paralela s Moebiovým kroužkem) (lit. 13).



Parametrická modulace patří ke zvláštním způsobům syntézy efektových signálů. Její podstata spočívá v uzavření zpětné vazby z výstupu generátoru na vstup řízení některého parametru generovaného signálu, nejčastěji jeho amplitudy. Tímto způsobem lze vytvářet periodické i neperiodické průběhy nejrůznějšího charakteru, jejichž vlastnosti se však předem jenom těžko určují. Průběh oscilací závisí totiž nejenom na těsnosti vazby, ale zejména na chování systému za atypického nelineárního, mezního provozu. Proto se tento způsob modulace signálu „sebou samým“ užívá hlavně při experimentální syntéze zvuků netradičního charakteru. Ukázka čís. 18 prezentuje příklady parametrické modulace amplitudy u obdélníkového signálu a frekvence u sinusového signálu.

Modulační syntéza představuje nejrozšířenější způsob nelineárního zpracování zvukového signálu. Ve své pasívní podobě základních typů modulací je neodmyslitelnou součástí téměř každého realizačního řetězce elektroakustické hudby. Avšak skutečného významu pro syntézu hudebního signálu doznaly až vyšší typy modulací, zejména pak modulace frekvenční. Praktická realizace všech uvedených způsobů modulačních syntéz má dnes už digitální charakter, daný hlavně širokým komerčním uplatněním. Přes skutečně rozsáhlé zvukové možnosti mají však všechny modulační metody jednu společnou nevýhodu, vyplývající z praktické stránky realizace. Proces modulace není totiž beze zbytku kontrolovatelný, což přináší do vlastní generace hudebního signálu určitý prvek náhody, za určitých okolností nežádoucí. Přesto však i tuto skutečnost lze při realizaci elektroakustické hudby záměrně využít.

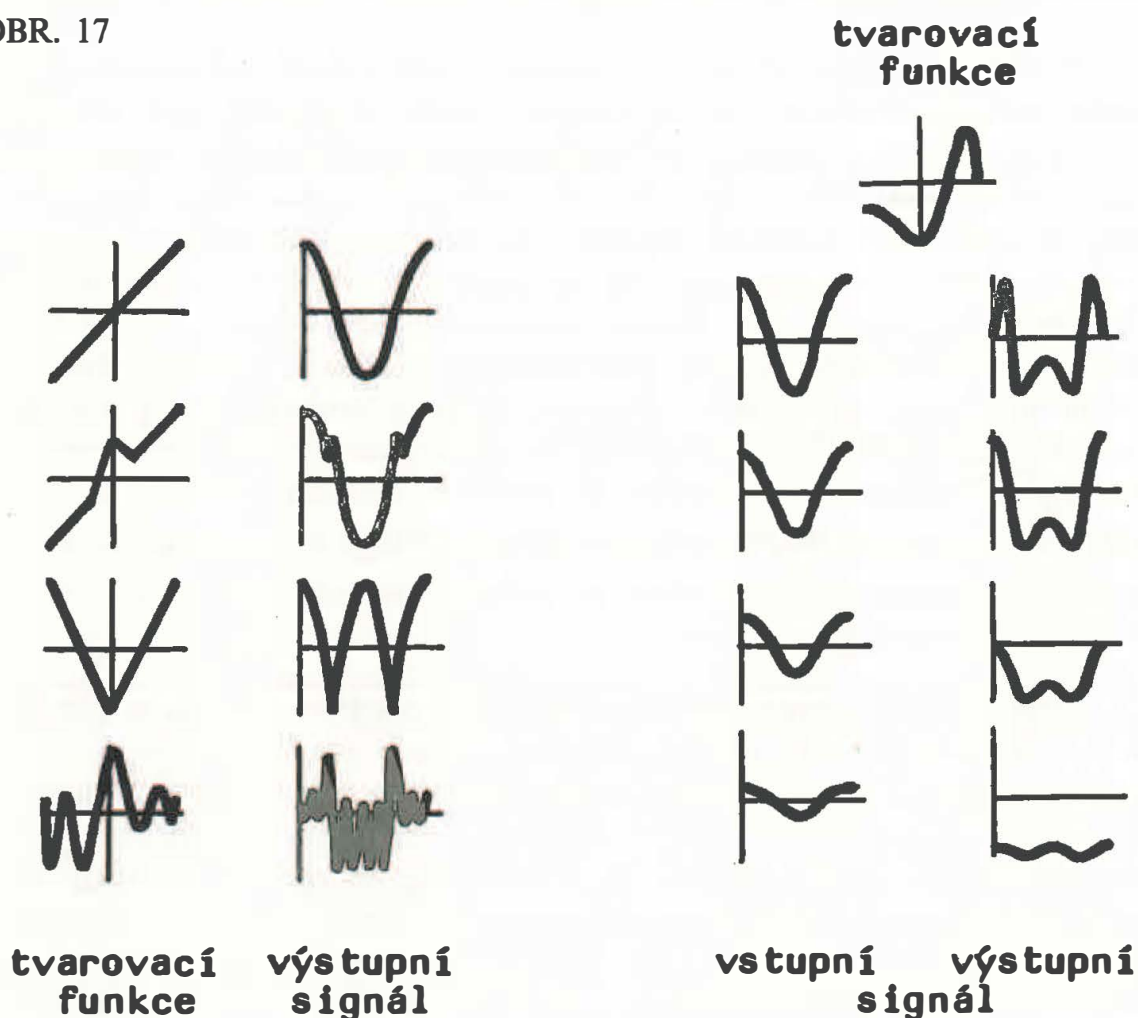
5. Tvarová syntéza

Metody tvarové syntézy hudebního signálu představují zcela odlišný pohled na celou oblast jeho umělé generace. Jsou totiž založeny na přímé tvorbě průběhu signálu jeho nelineárním tvarováním nebo přímým grafickým zadáním a zdánlivě ztrácejí jakoukoliv souvislost s klasickým analytickým pohledem na strukturu tohoto signálu. Vývoj těchto metod, spjatých převážně s digitální technikou, byl a je dosud dán snahou dospět úplně jinou cestou ke konkrétní podobě tradičního i netradičního hudebního signálu. Tato cesta musí být však co nejjednodušší a naprosto exaktně kontrolovatelná, což je

motivováno především komerčním využitím digitální generace signálu v reálném čase, bez aplikace programově i technicky náročných součtových metod syntézy.

Metoda **nelineárního tvarování** je založena na zkreslení sinusového signálu při průchodu obvodem s nelineární charakteristikou. Na obr. 17 je znázorněna tvarová změna sinusového, resp. kosinusového průběhu použitím uvedených nelineárních charakteristik, které bývají označovány jako tvarovací funkce. Nelinearita tvarování se však projevuje nejenom při statickém přenosu, ale i v dynamickém vývoji signálu. V další části obr. 17 je uvedena závislost tvaru výstupního signálu na amplitudě signálu vstupního pro danou tvarovací funkci. Realizace neharmonických poměrů ve spektru tvarovaného signálu se potom provádí sečtením signálů na nelineární impedanci s výsledkem obdobným frekvenční modulaci. Z toho vyplývá, že vlastnosti výsledného signálu závisí pouze na tvarovací funkci, časové závislosti amplitudy vstupního signálu a frekvenčních poměrech sečítaných signálů. Největší pozornost je věnována tvarovací funkci, resp. jejímu výpočtu, který vychází z požadovaných vlastností generovaného signálu. Tvarovací funkce může také vykazovat záměrnou

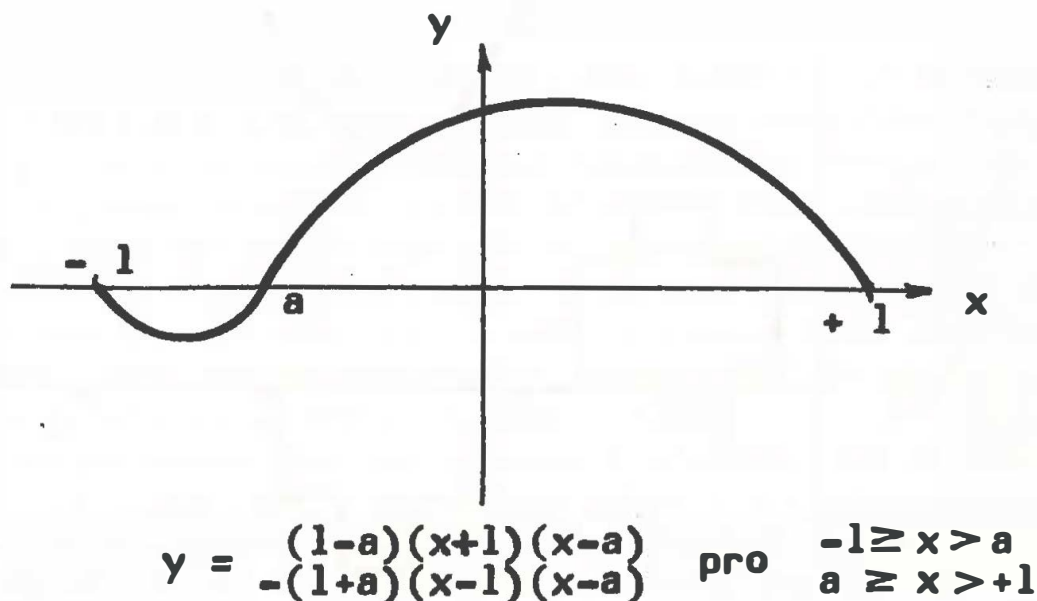
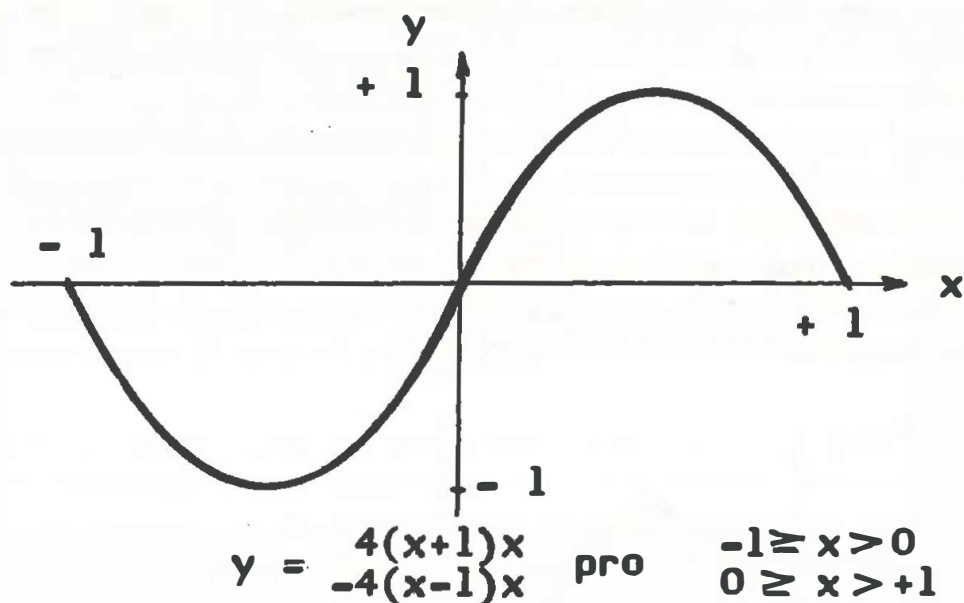
OBR. 17



časovou závislost v souladu s požadovanými dynamickými charakteristikami vývoje tohoto signálu. Příklady základních zkreslujících zásahů na signál sinusového průběhu jsou uvedeny v ukázce čís. 19. Zajímavou vlastností této metody syntézy je možnost interpretace ostatních metod, zejména pak modulálních pomocí nelineárního tvarování harmonického signálu.

K dalším metodám tvarové syntézy patří **přímé zadávání časového průběhu** signálu. Tento způsob generace zvukového signálu, často používaný v elektroakustické hudbě, je spojován především s funkčními generátory. Jejich nedokonalým analogovým předchůdcem byl např. optický snímač křivek libovolného průběhu. Současné digitální funkční generátory umožňují sice realizovat průběh na základě zadání jednotlivých vzorků signálu, ale jejich praktické,

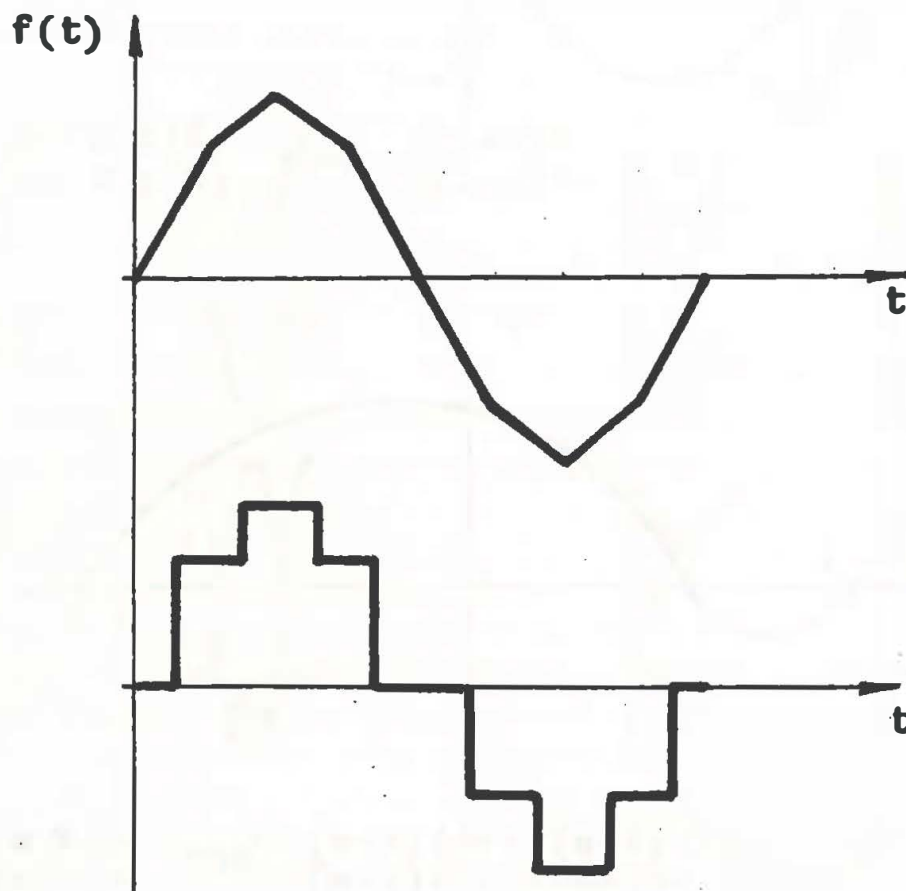
OBR. 18



hlavně komerční využití je vzhledem k náročnosti zařízení omezeno na laboratorní podmínky.

Podstatou metod přímého zadávání není jen statická realizace periodického či neperiodického signálu, ale možnost dynamické manipulace s jeho průběhem. To ovšem znamená, že zadání průběhu musí vycházet z jednoduché funkce proměnného argumentu — parametru. Aproximační metody tvarové syntézy nahrazují sinusový průběh matematicky jednoduše vyjádřitelnou křivkou, např. parabolou různého stupně. Zkreslení při aproximaci kvadratickou parabolou činí cca 3,8 %, pro kubickou parabolou už jenom 1,2 %. Ze zvukového hlediska nehraje toto zkreslení při syntéze složitějších signálů žádnou roli. Pro účely vlastní syntézy je zapotřebí měnit tvar této aproximované sinusovky a proto se zavádí parametr, jehož velikost je řízena jiným signálem. Obr. 18 přináší parabolickou aproximaci sinusového průběhu včetně matematického vyjádření a průběh tzv. jednoduché funkce, která pro nulovou hodnotu parametru a přechází v původní aproximovaný průběh. Tato technika okamžitě nabízí možnost modulace parametru a s výsledným efektem podobným frekvenční modulaci. Uvedený způsob aproximační syntézy bývá označován jako **tvarová parametrická modulace**.

Segmentační metody tvarové syntézy skládají požadovaný průběh signálu z dílů — segmentů exaktně zadaných křivek. Na obr. 19 je znázorněn příklad



OBR. 19

lineární a obdélníkové segmentace sinusového průběhu. Pro použitých 8 segmentů v periodě činí u lineární segmentace zkreslení 2,47 % a u obdélníkové segmentace 22,47 % pro uvažovaných 100 harmonických. Značné zkreslení obdélníkově segmentovaného sinusového průběhu jenom podtrhuje význam dolnoproustní filtrace u restituovaného digitalizovaného signálu a signálu generovaného Walshovými funkcemi. Vedle uvedených typů segmentací se používají též segmentace nelineární, např. parabolická apod. Délka segmentu, resp. počet segmentů v periodě či časové jednotce je dán přesností aproximace požadovaného průběhu nebo častěji přímo účelem syntézy. Segmentační metody syntézy lze aplikovat jak v analogových, napěťově řízených systémech, tak i v zařízeních digitálních. Lineárně i nelineárně lze segmentovat i veškeré řídicí signály, např. obálku ADSR. Nejrozšířenější tvarovou metodou je obdélníková segmentace, kterou představuje digitalizace zvukového signálu v tzv. vzorkovacích (sampling) syntezeátorech. Příklady segmentační tvarové syntézy přináší ukázka čís. 20.

Při realizaci tvarové syntézy počítačem lze vedle uvedených metod přímo číselně zadat průběh signálu. V pokračování ukázky čís. 20 jsou jednak experimentálně zadané průběhy na základě grafické předlohy a jednak průběhy, jejichž perioda je dána příslušným matematickým výrazem. Rekonstrukci ustáleného stavu průběhu tónů tří jazykových varhanních rejstříků demonstruje ukázka čís. 21.

Neobvyklý způsob generace zvukového signálu, který by bylo možno zahrnout do tvarových metod syntézy, je využití seriového výstupu počítače. Tento výstup, sloužící ke komunikaci s periferními zařízeními, produkuje číselné údaje v seriové (po sobě jdoucí) digitální podobě jako sled dvou nebo tří úrovní pulzů různé hustoty. Vhodným programem lze potom tyto pulzy seřadit do podoby periodických i neperiodických signálů, viz např. čís. 22.

* * *

Uvedený přehled základních metod syntézy hudebního signálu nemohl a ani si nekladl za cíl poskytnout zevrubnou informaci o této oblasti hudební akustiky. Vývoj těchto metod je totiž úzce spjat s prudkým rozvojem mikroelektroniky a výpočetní techniky a z toho důvodu by nemělo smysl popisovat konkrétní problematiku současných způsobů syntézy, z nichž velká část se stává během krátké doby historickou záležitostí. Hlavním účelem bylo poskytnutí shrnujících informací o takových otázkách, které syntézu hudebního signálu provázely, provází a budou stále provázet. Jednou z takových otázek je problém, který byl zcela záměrně v předchozích kapitolách opomíjen, a to **problém dokonalé syntézy**. Přes všechny uváděné nedostatky různých způsobů syntézy lze s jistotou tvrdit, že už v současné době je možné elektronickou cestou vytvořit dokonalou kopii tradičního hudebního signálu. V čem ale spočívá dokonalost této kopie? V naplnění fyzikální podstaty hudebního signálu, jen-

že zvuková kvalita tohoto signálu má ještě svoji estetickou nadstavbu, která je doménou subjektivního přístupu k hodnocení (lit. 19). Právě toto hodnocení, jak bylo již uvedeno v první kapitole, je vlastním naplněním a tím také konečným kriteriem dokonalosti syntézy. O dokonalé syntéze lze tedy hovořit pouze v případě dokonalosti fyzikální i estetické. Z tohoto hlediska zůstane i sebedokonalější umělý zvukový signál vždy jenom signálem reprodukováním. Avšak smyslem syntézy není napodobování tradiční podoby hudebního signálu, ale hledání a naplňování zvukových prostředků v souladu s realizací zvukových představ, odpovídajících kompozičnímu záměru. Jaké však je estetické působení této umělé zvukové matérie, jakým způsobem formuje umělý hudební signál naše zvukové zkušenosti a postoje? Na tyto otázky bylo dosud podáno velmi málo přesvědčivých odpovědí, protože v problematice syntézy hudebního signálu, hlavně pak ve sféře jejího komerčního využití, je věnována podstatně větší pozornost technice než estetice hudebního projevu. Elektronizace současné populární hudby je toho dostatečným důkazem.

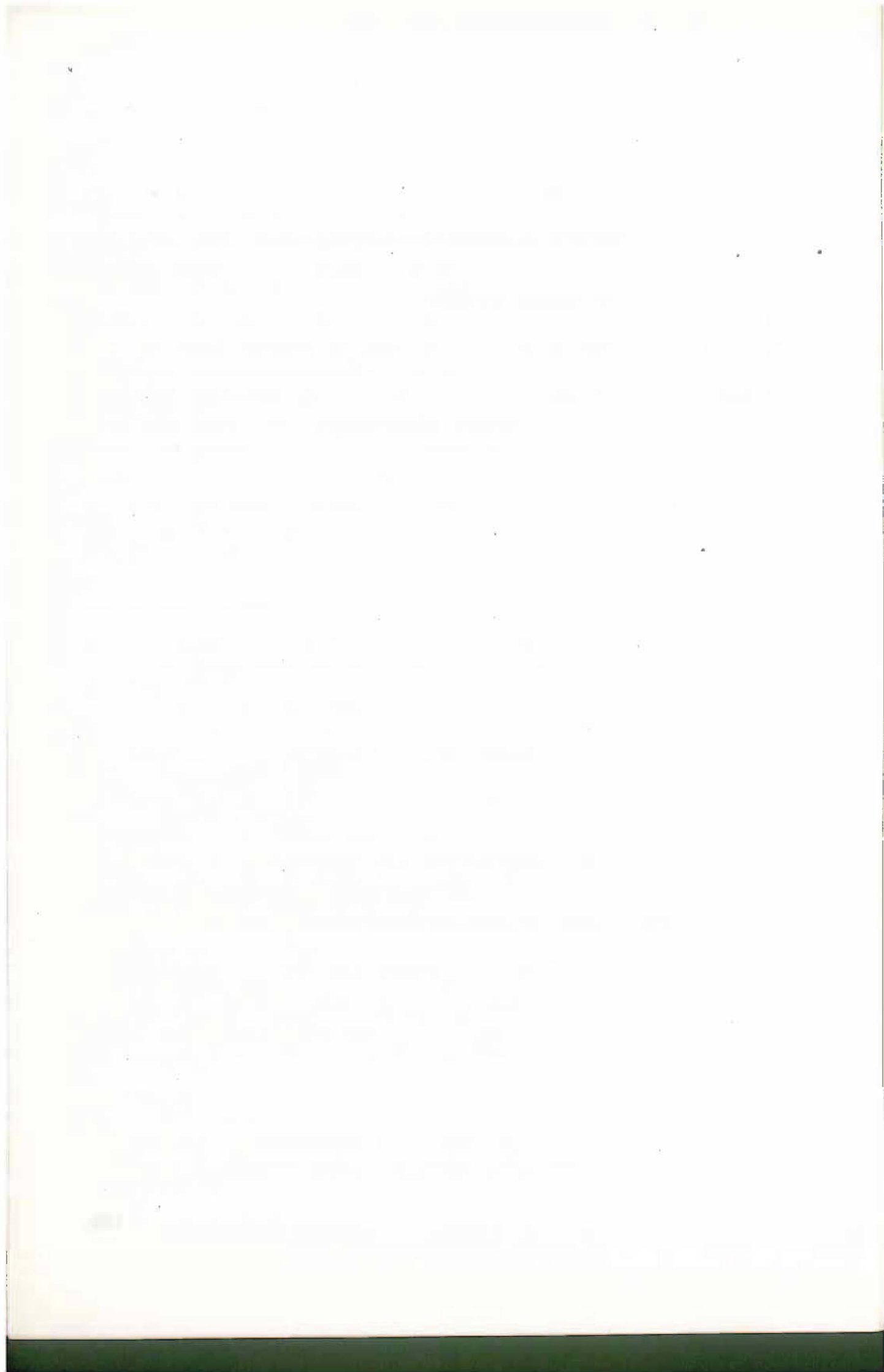
Milou povinností autora je poděkovat doc. PhDr. Václavu Kučerovi, CSc. a ing. Miloši Bláhovi za kritické pročtení rukopisu a cenné podněty, které vedly ke vzniku této studie.

Literatura a prameny:

- (1) Beauchamp J. W.: Synthesis by spectra amplitude and „brightness“ matching of analyzed musical instrument tones, JAES 30, 6/1982, 396—406
- (2) Bernstein A. D., Cooper E. D.: The piecewise-linear technique of electronic music synthesis, JAES 24, 6/1976, 446—454
- (3) Le Brun M.: Digital waveshaping synthesis, JAES 27, 4/1979, 250—266
- (4) Hutchins B. A.: Application of a real-time Hadamard transform network to sound synthesis, JAES 23, 7/1975, 558—562
- (5) Hutchins B. A.: Experimental electronic music devices employing Walsh functions, JAES 21, 8/1973, 640—645
- (6) Hutchins B. A.: Musical engineer's handbook, Electronotes NY 1975
- (7) Howe H. S., Electronic music synthesis, Dent&Sohns, London 1975
- (8) Chowning J. M.: The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation, JAES 21, 7/1973, 526—534
- (9) Insam E.: Walsh functions in waveform synthesizers, JAES 22, 6/1974, 422—425
- (10) Mathews M. V.: The technology of computer music, MIT Press, Boston 1969
- (11) Mitsunashi Y.: Audio signal synthesis by functions of two variables, JAES 30, 10/1982, 701—706
- (12) Mitsunashi Y.: Waveshape parameter modulation in producing complex audio spectra, JAES 28, 12/1980, 879—895
- (13) Rozenberg M.: Linear Sweep Synthesis, Computer Music Journal, Vol. 6, 3/1982, 65—71
- (14) Schaefer R. A.: Electronic musical tone production by nonlinear waveshaping, JAES 18, 4/1970, 413—417
- (15) Strange A.: Electronic music, Wm. C. Brown Co., 1972
- (16) Syrový V.: Hudební signál a jeho analýza, Živá hudba, Sborník prací HAMU 1983, 301—399

- (17) Syrový V.,: Technické základy elektroakustické hudby, skripta SPN, Praha 1984
- (18) Syrový V.,: Vliv fázového spektra tónu na vjem jeho barvy, Sborník 23. akustické konference, Č. Budějovice 1984, 275—278
- (19) Syrový V.,: Zvuková kvalita a její klasifikace, Hudební nástroje, 3/1979, 95—97
- (20) Špelda A.,: Hudební akustika, SPN, Praha 1978
- (21) Urbanek E. D.,: Waveform is synthesized from linear segments, Electronics 3/1975, 100—101

JAES — Journal of the Audio Engineering Society

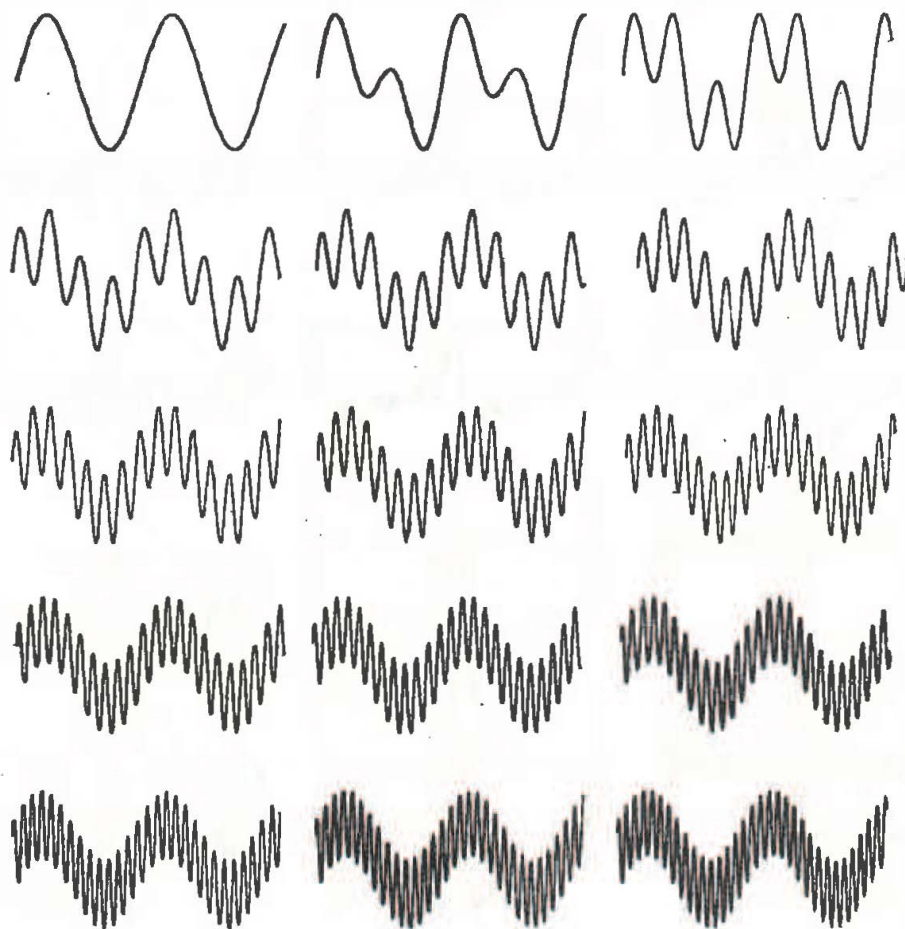


OBRAZOVÁ PŘÍLOHA

Obrazová příloha shrnuje příklady praktické syntézy hudebního signálu v podobě oscilogramů jejich časového průběhu. Všechny tyto příklady vycházejí z konkrétních zvukových ukázek, pořízených ve zvukovém studiu hudební fakulty AMU v Praze, a jsou případným zájemcům k dispozici ve formě magnetofonového záznamu.

SOUČTOVÁ SYNTÉZA

Ukázka čís. 1



1. harm.

1. + 4. harm.

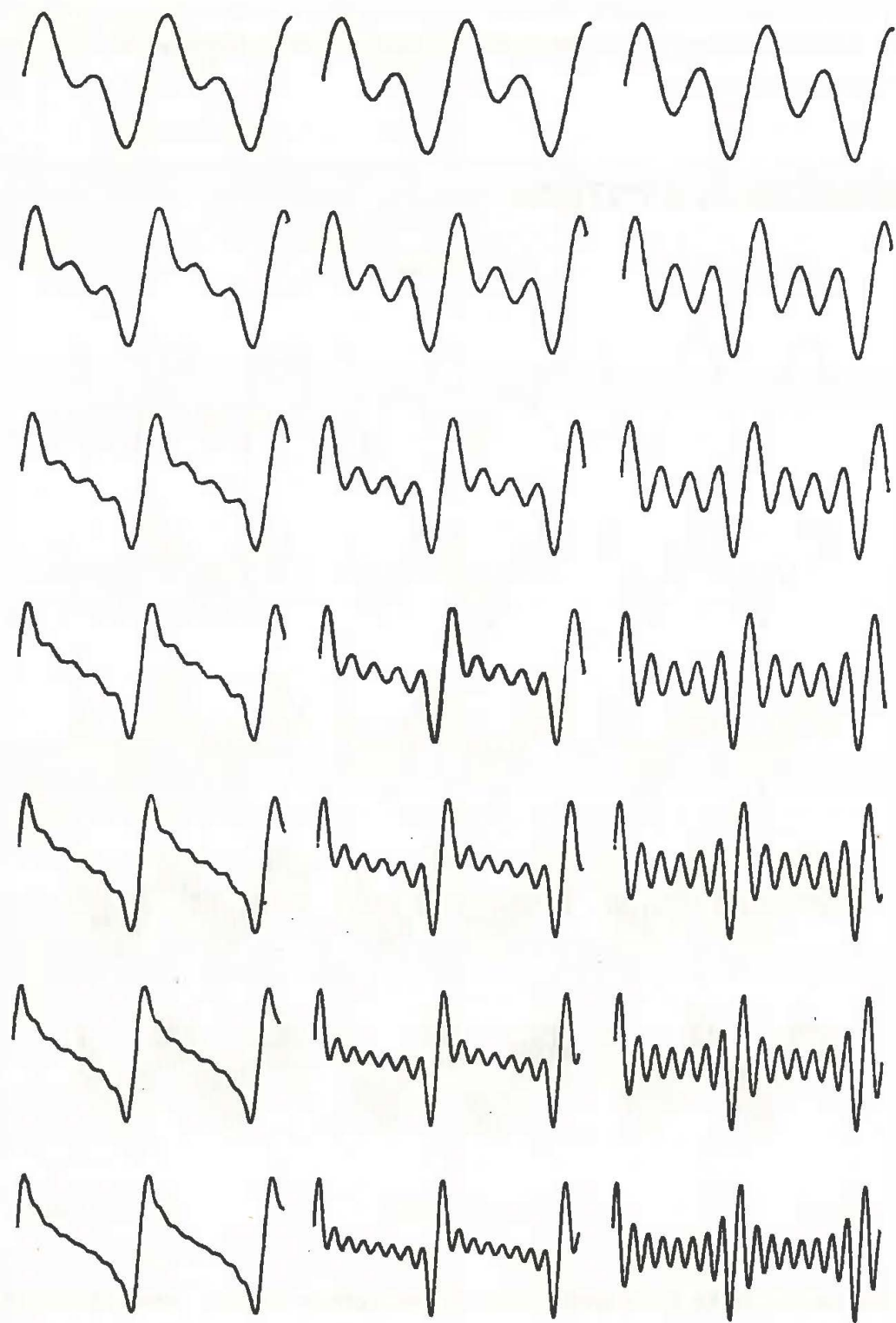
1. + 2. harm.

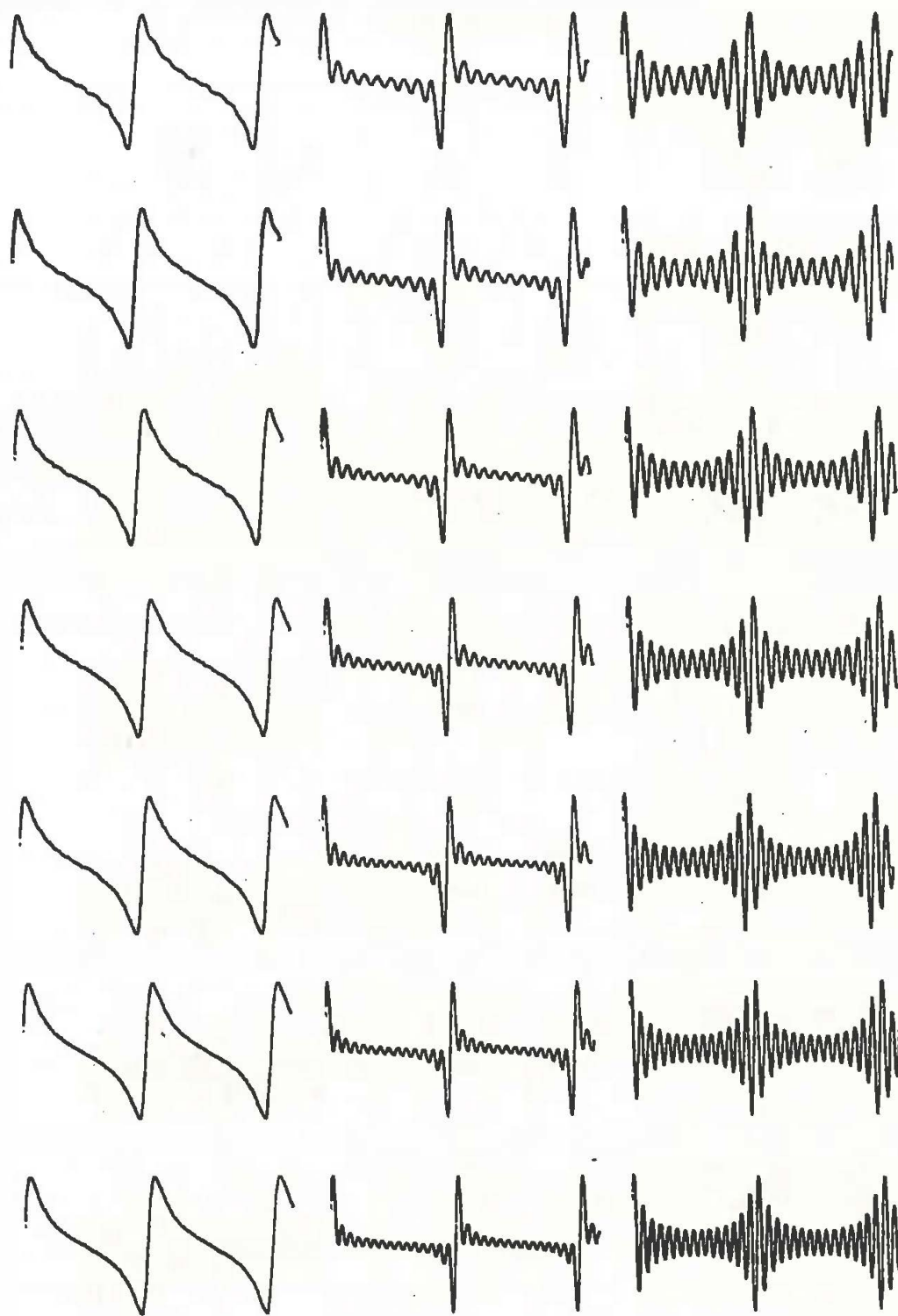
atd.

1. + 3. harm.

Všechny harmonické jsou stejné úrovně, vzájemný fázový posuv roven nule.

Ukázka čís. 2





—3 dB/harm.

1.+2. harm.

1.+2.+3. harm.

1.+2.+3.+4. harm.

0 dB/harm.

1.+2. harm.

1.+2.+3. harm.

atd.

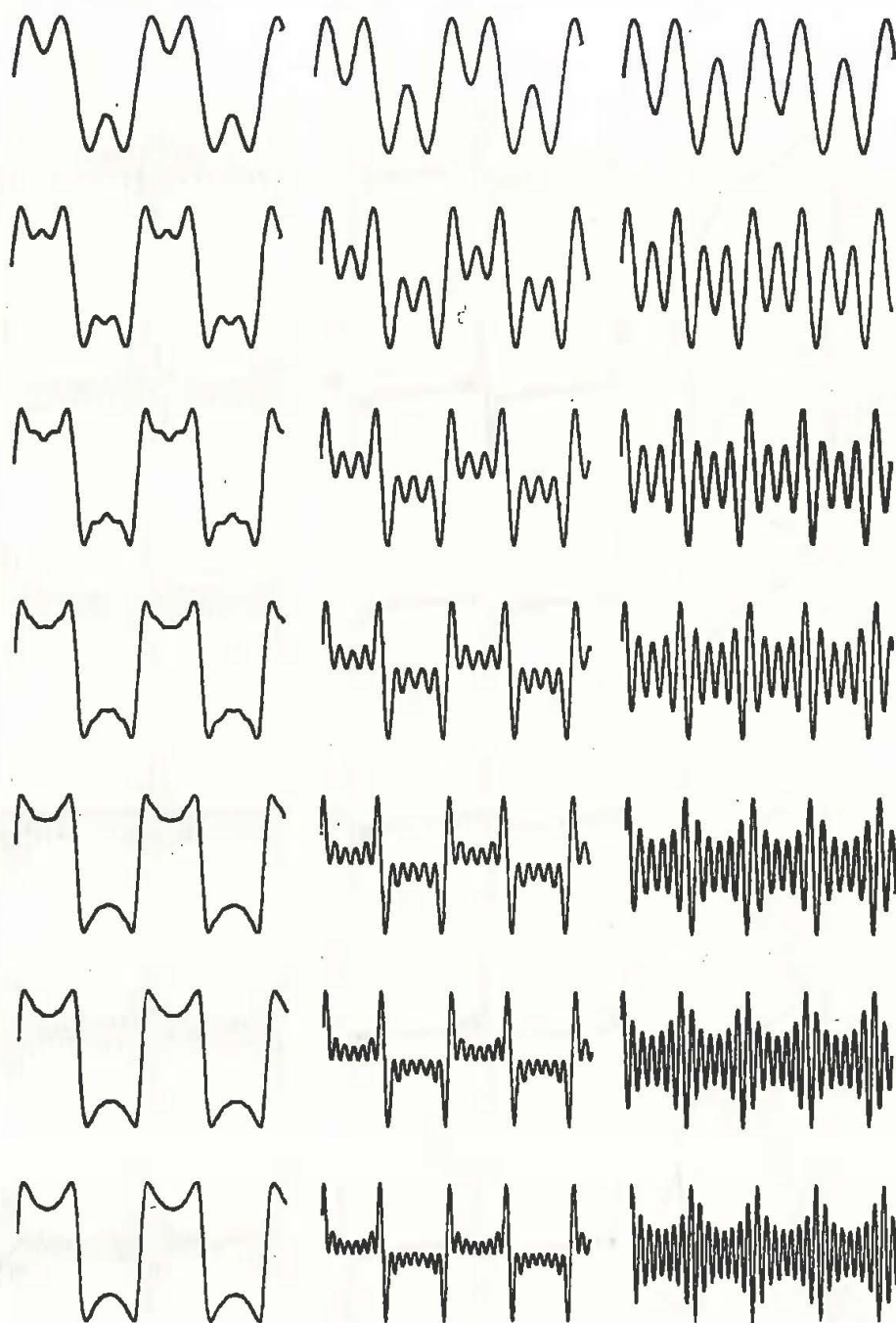
+3 dB/harm.

1.+2. harm.

1.+2.+3. harm.

Vzájemný fázový posuv roven nule.

Ukázka čís. 3



—6 dB/harm.

1. + 3. harm.

1. + 3. + 5. harm.

0 dB/harm.

1. + 3. harm.

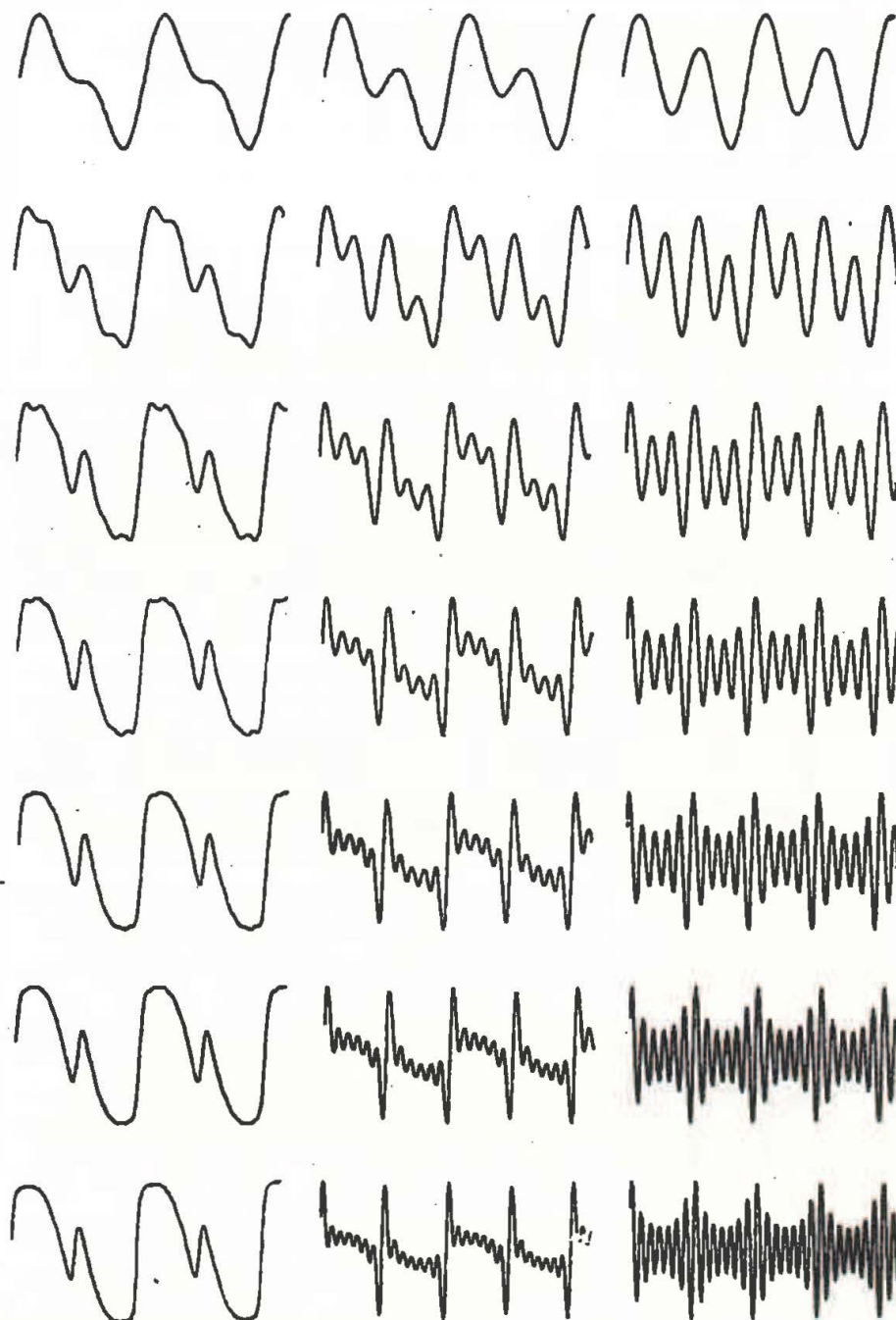
atd.

+6 dB/harm.

1. + 3. harm.

Syntéza lichých harmonických při nulovém vzájemném fázovém posuvu.

Ukázka čís. 4



—6 dB/harm.

1. + 2. harm.

1. + 2. + 4. harm.

0 dB/harm.

1. + 2. harm.

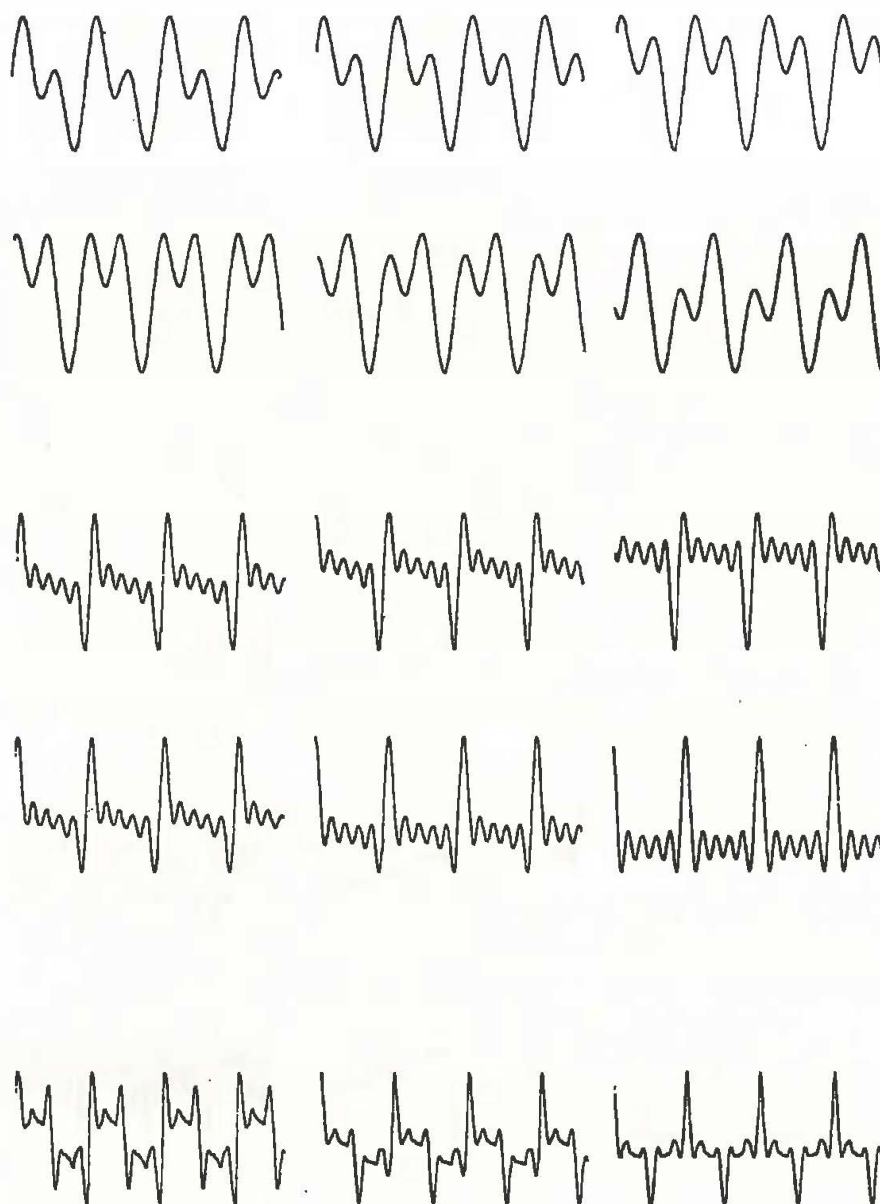
atd.

+6 dB/harm.

1. + 2. harm.

Syntéza sudých vyšších harmonických při nulovém vzájemném fázovém posuvu.

Ukázka čís. 5



Vliv fázového posuvu.

1. + 2. harm.	posuv 0°	posuv 30°	posuv 120°
	posuv 90°	posuv 0°	posuv 180°

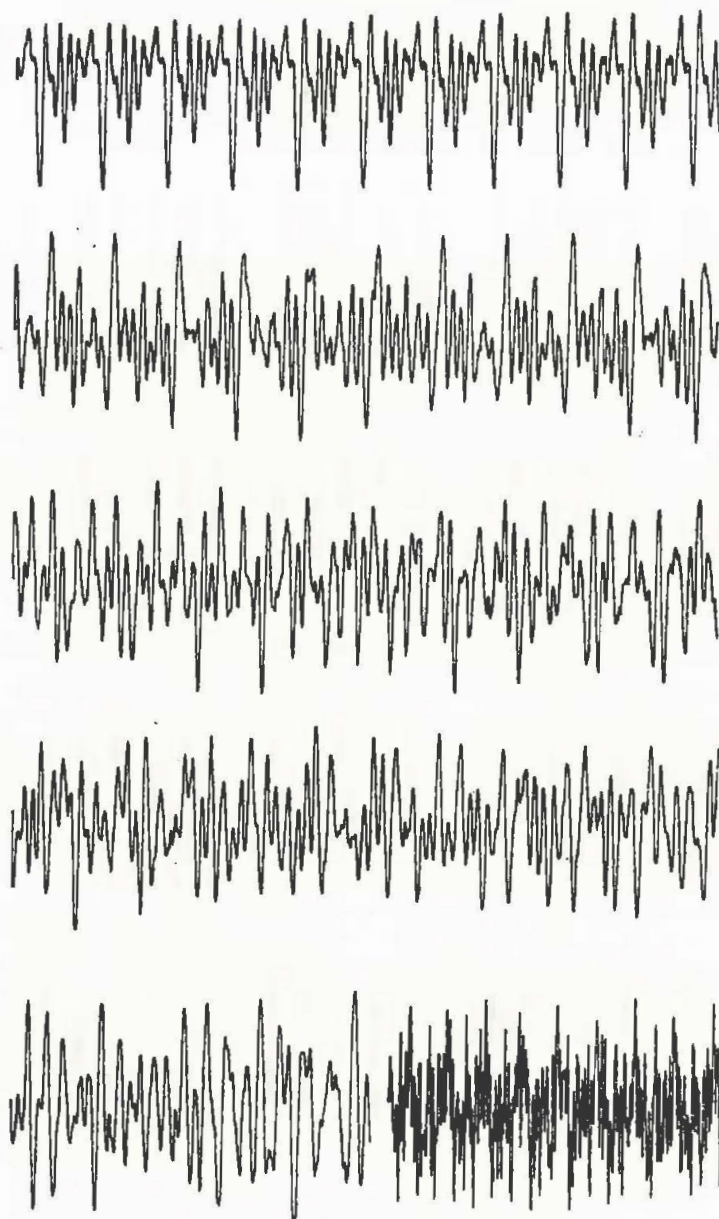
1. + 2. + 3. + 4. + 5. harm.

nárůst posuvu 0° /harm.	30° /harm.	60° /harm.
konstantní posuv 30°	60°	90°

Tón klarinetu, 25 harmonických.

konstantní posuv 0°	45°	90°
----------------------------	------------	------------

Ukázka čís. 6



Neharmonicity, 8 složek stejné úrovně.

reálné neharmonicity
znatelné neharmonicity
zřetelné rozladění složek
výrazné rozladění složek

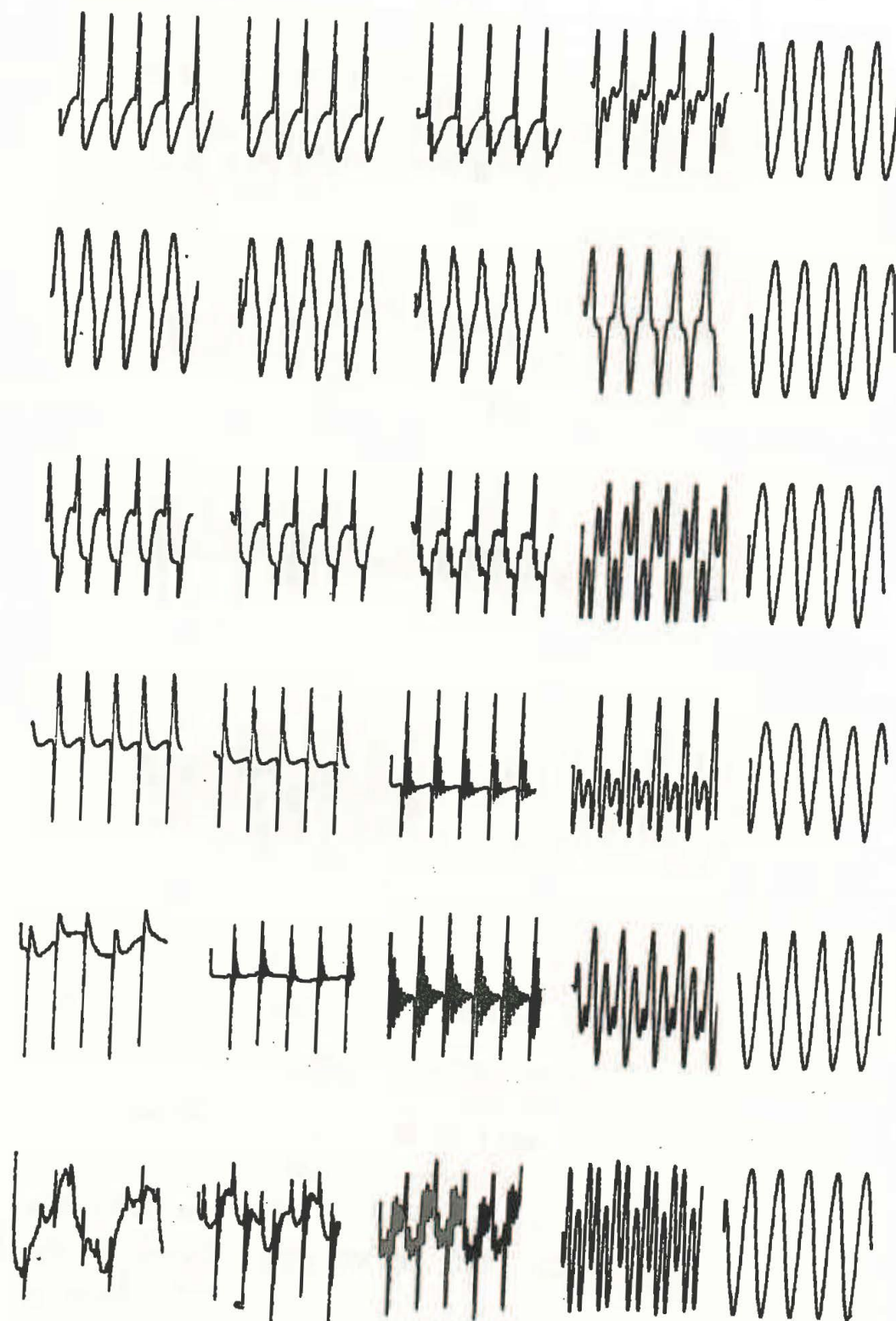
Tónový blok

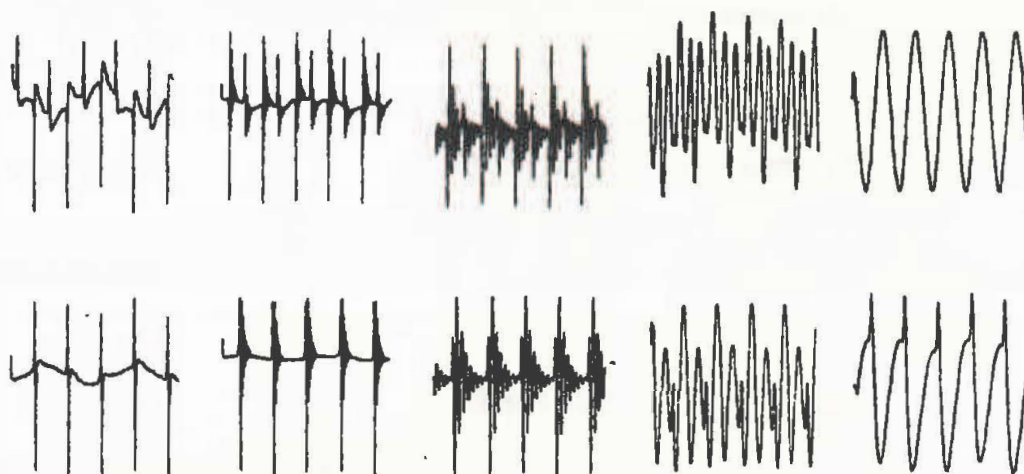
300, 350, 420, 470
626 630, 800, 890 Hz

200, 445, 850, 1 750
2 100, 2 590, 5 820,
6 600 Hz

ROZDÍLOVÁ SYNTÉZA

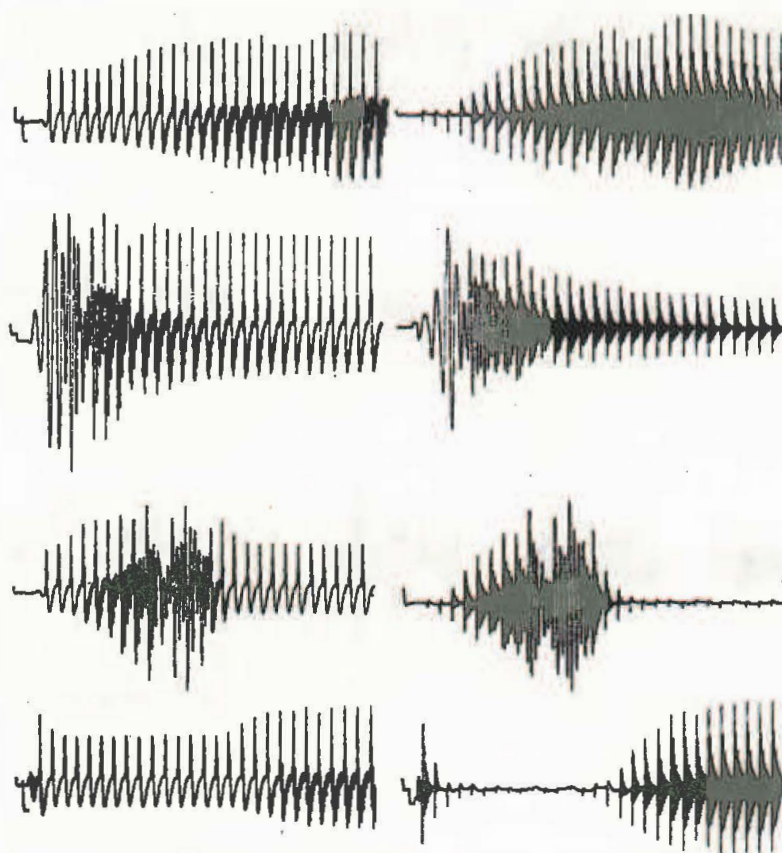
Ukázka čís. 7





Dolnoproústní filtrace se snižující se mezní frekvencí.
Pásmová filtrace se snižující se střední frekvencí.

Ukázka čís. 8



Řízená filtrace — přeladění směrem dolů.
Dolnoproústní filtrace

Pásmová filtrace

— přeladění směrem nahoru

Dolnoproputní filtrace

Pásmová filtrace

— přeladění dolů nahoru

Dolnoproputní filtrace

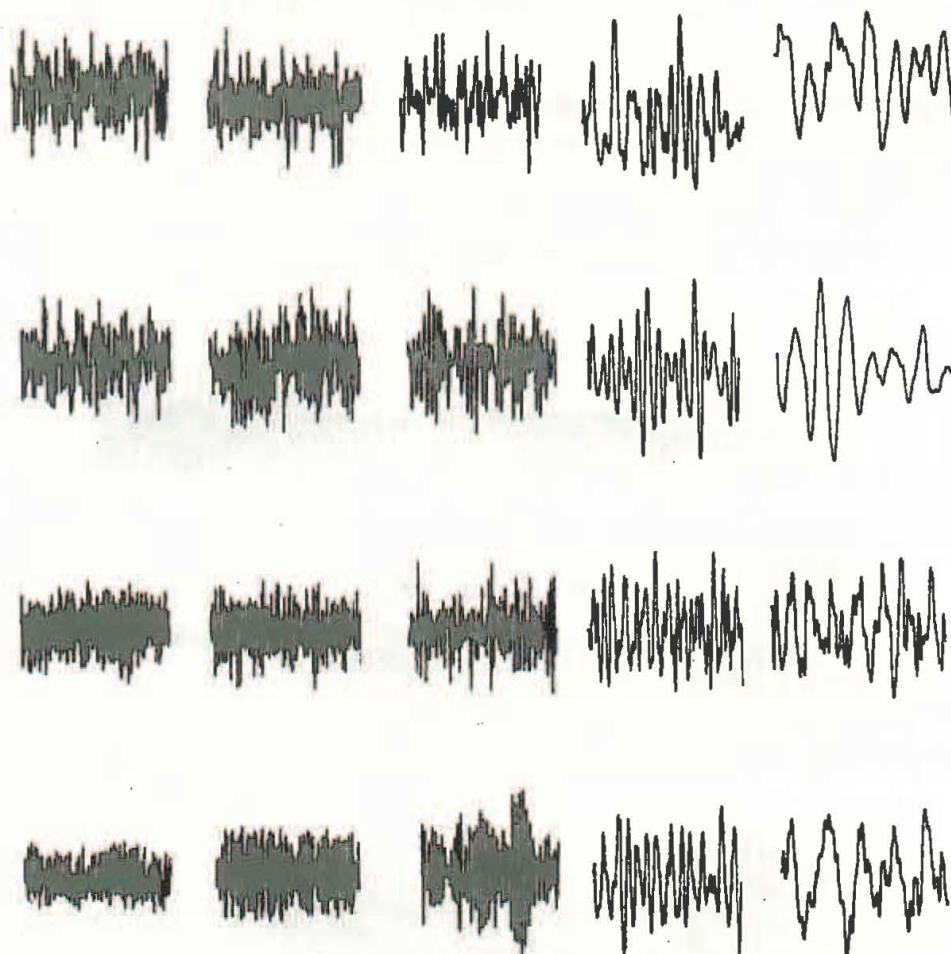
Pásmová filtrace

— přeladění nahoru dolů

Dolnoproputní filtrace

Pásmová filtrace

Ukázka čís. 9

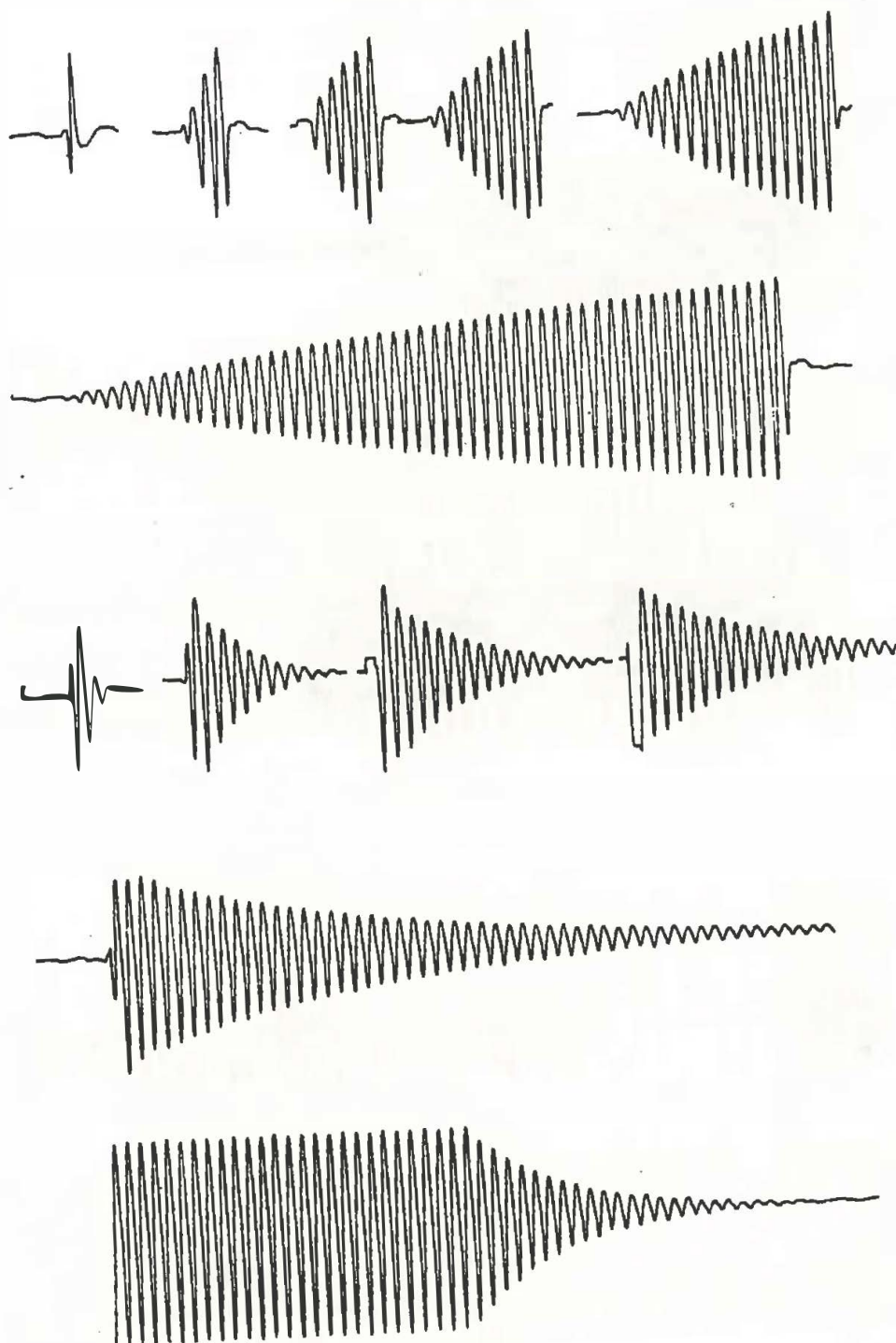


Filtrace bílého šumu

Dolnoproputní filtrace při malé strmosti filtru se snižující se mezní frekvencí.
Totéž při velké strmosti filtru.

Pásmová filtrace při velké šířce pásma se snižující se střední frekvencí.
Totéž při malé šířce pásma.

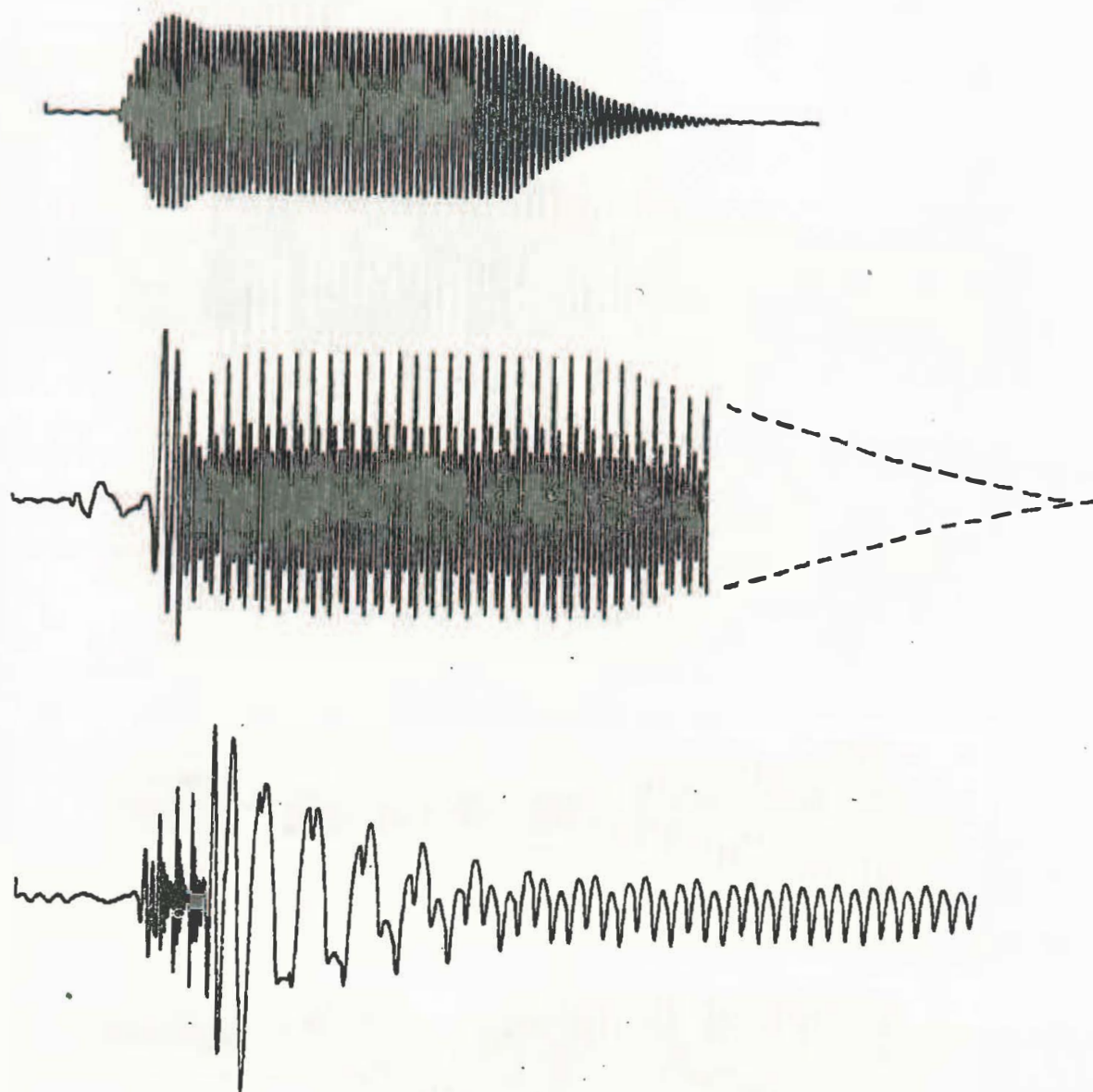
Ukázka čís. 10



Tvarování obálky tónu

Různé délky nasazení tónu
Různé délky dozívání tónu
Zakmitaný stav s dozíváním tónu

Ukázka čís. 11



Ukázky reálných tónů

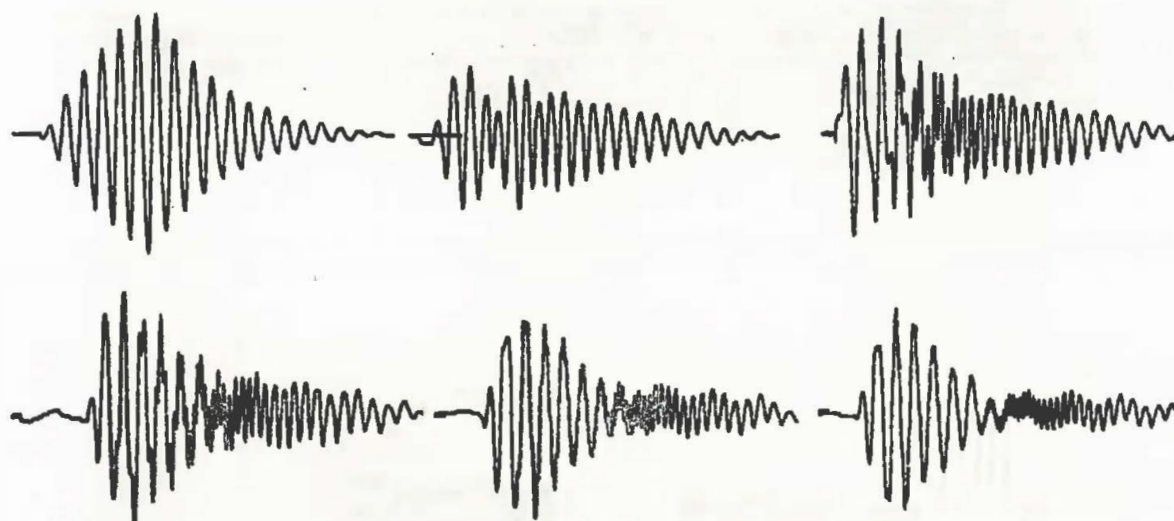
Tvarování obálkou ADSR

Tvarování obálkou ADSR za současného přeladění dolnoproustního filtru

— dolů nahoru

— nahoru dolů

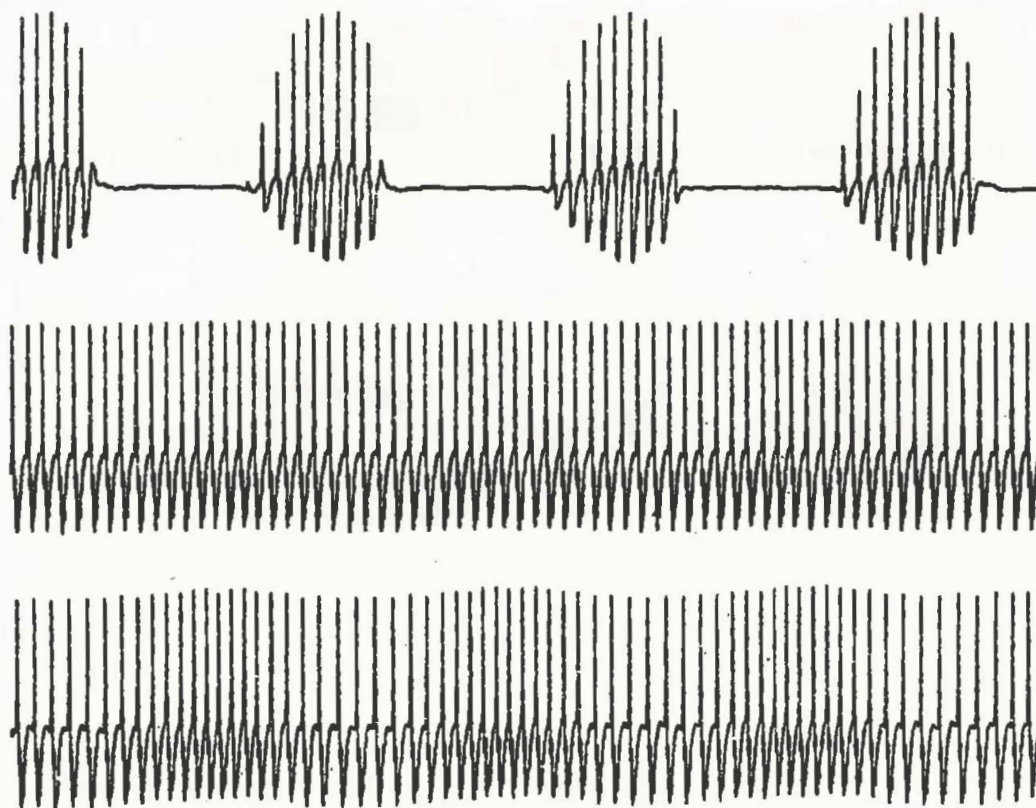
Ukázka čís. 12

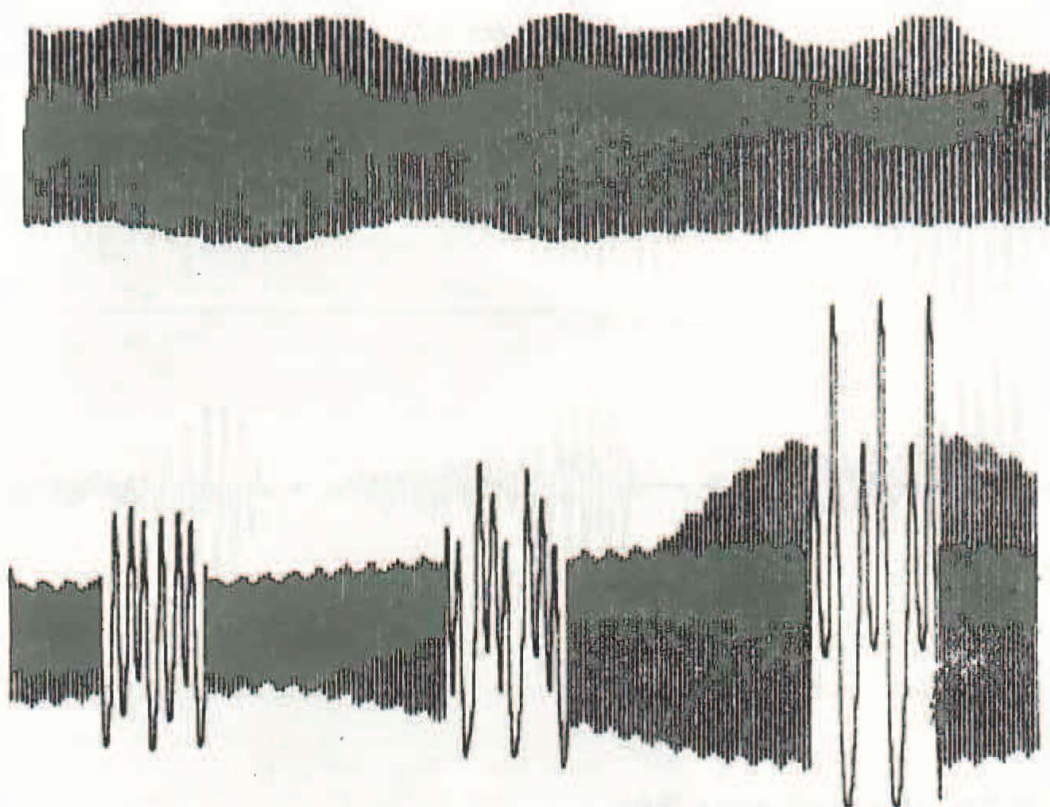


Přeladování tónu obálkou AD pro různě velké frekvenční zdvihy.

MODULAČNÍ SYNTÉZA

Ukázka čís. 13





Základní typy modulací

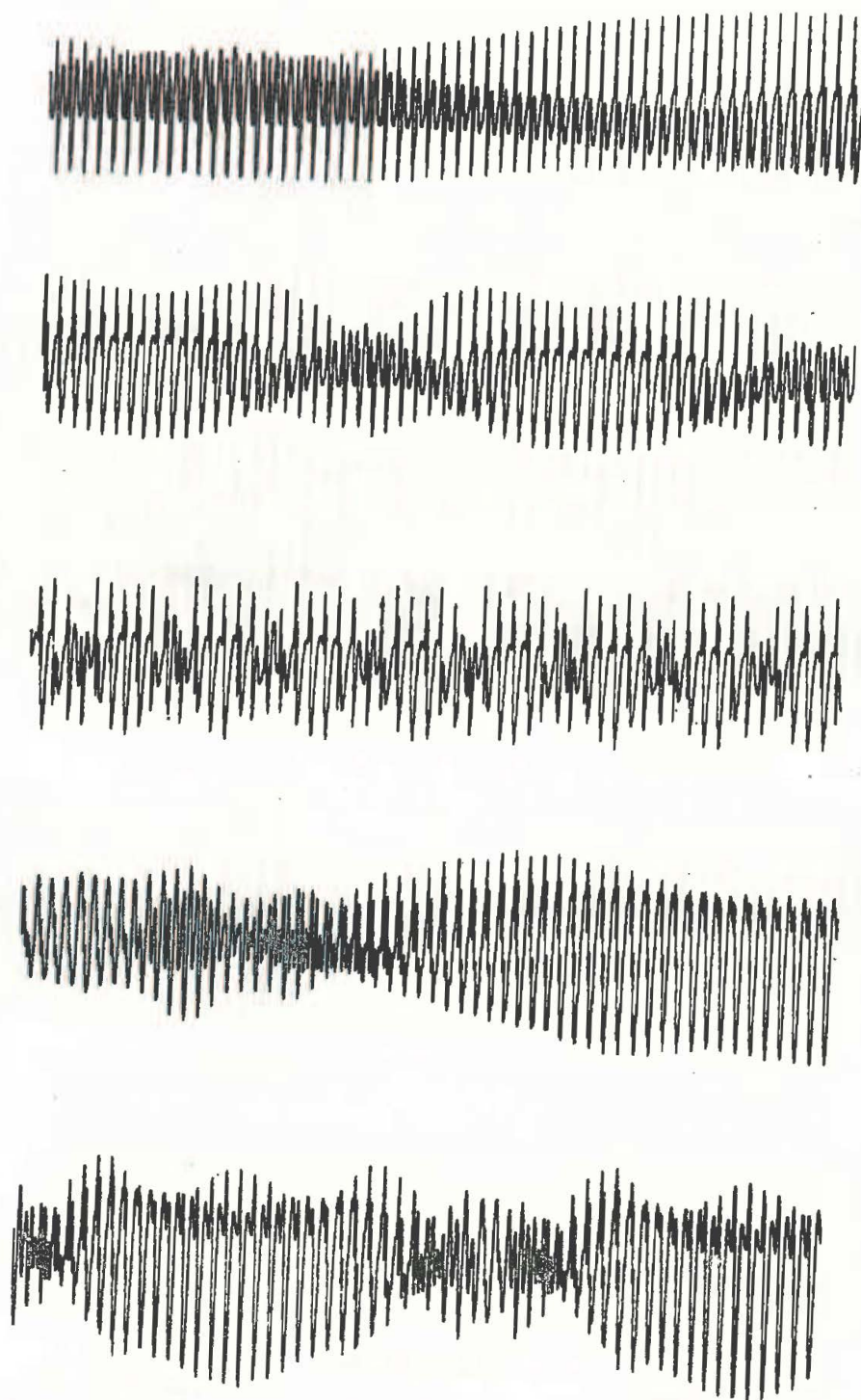
Amplitudová modulace — tremolo — 100 % promodulování

Frekvenční modulace — vibráto — malý modulační zdvih
 — větší modulační zdvih

Fázová modulace — quasiperiodická modulační funkce

Fázová modulace — chorus efekt (časovou lupou zvýrazněny v oscilogramu změny průběhu)

Ukázka čís. 14

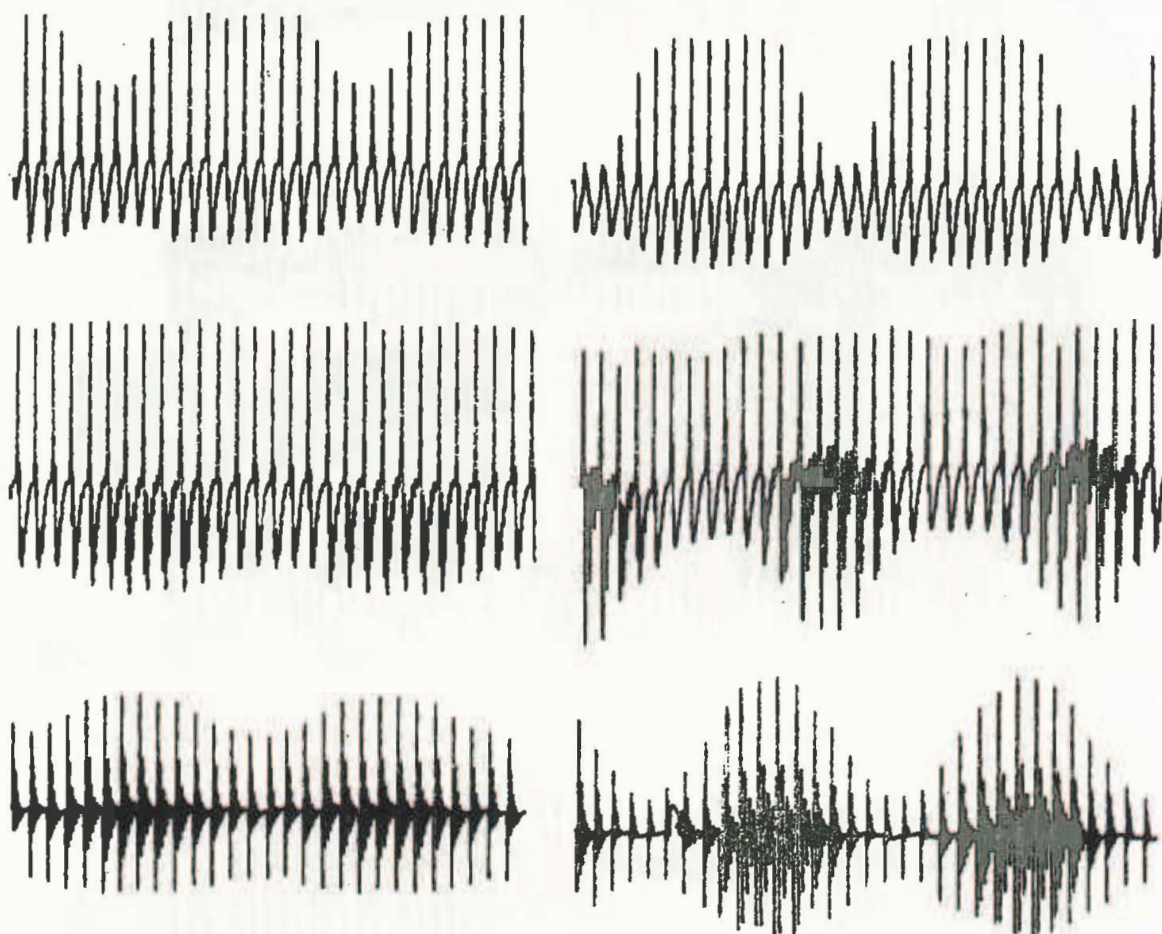


Fázová modulace

3 různé modulační frekvence

2 různé modulační frekvence se zapojenou vazbou

Ukázka čís. 15



Spektrální modulace

Změnou tvaru

Malá hloubka modulace

Velká hloubka modulace

Přeladěním filtru (formantová)

Malá hloubka modulace

Velká hloubka modulace

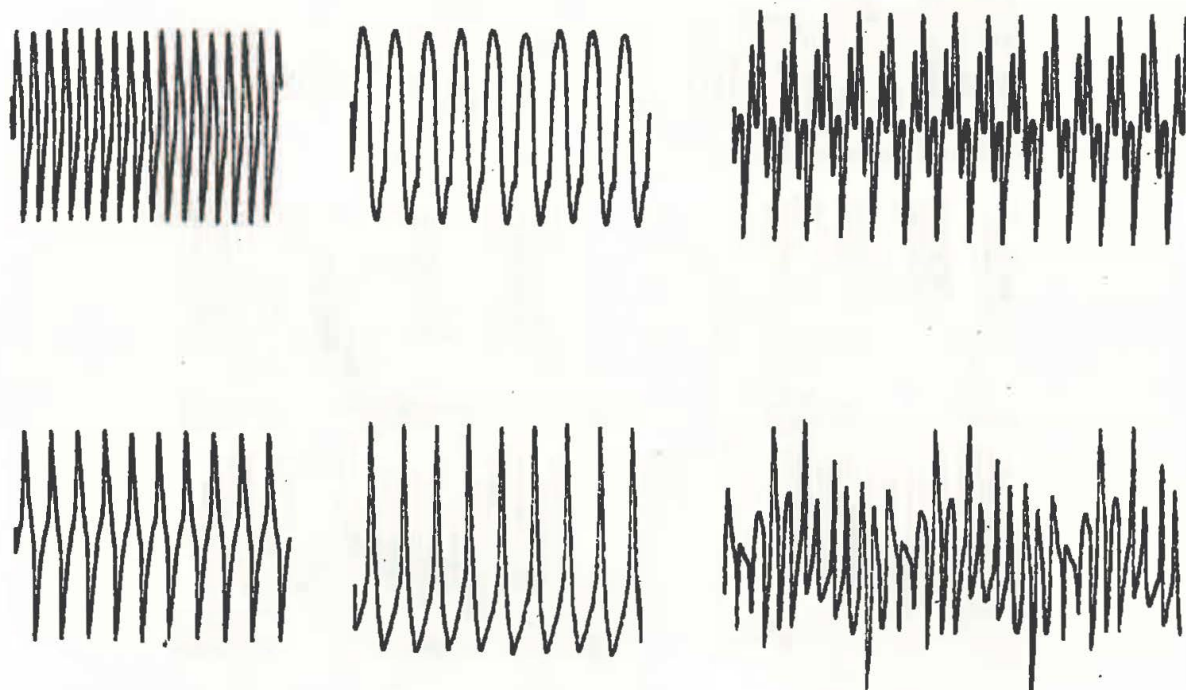
Přeladění dolní propusti

Přeladění dolní propusti

Přeladění pásmové propusti

Přeladění pásmové propusti

Ukázka čís. 16



Vyšší typy modulací

Kruhová modulace

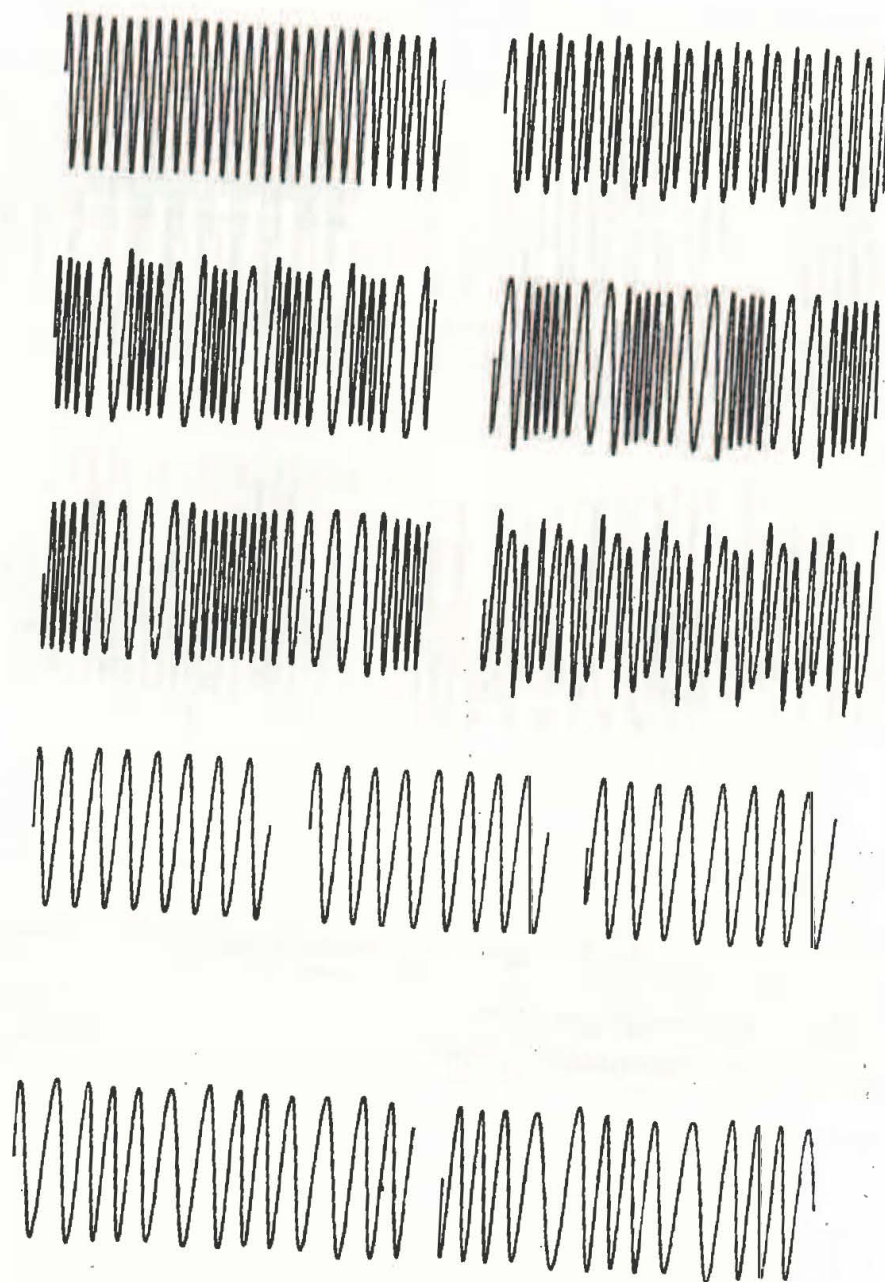
Vstupní signály v harmonickém poměru.

Vstupní signály v neharmonickém poměru.

Výstupní signál

Výstupní signál

Ukázka č. 17



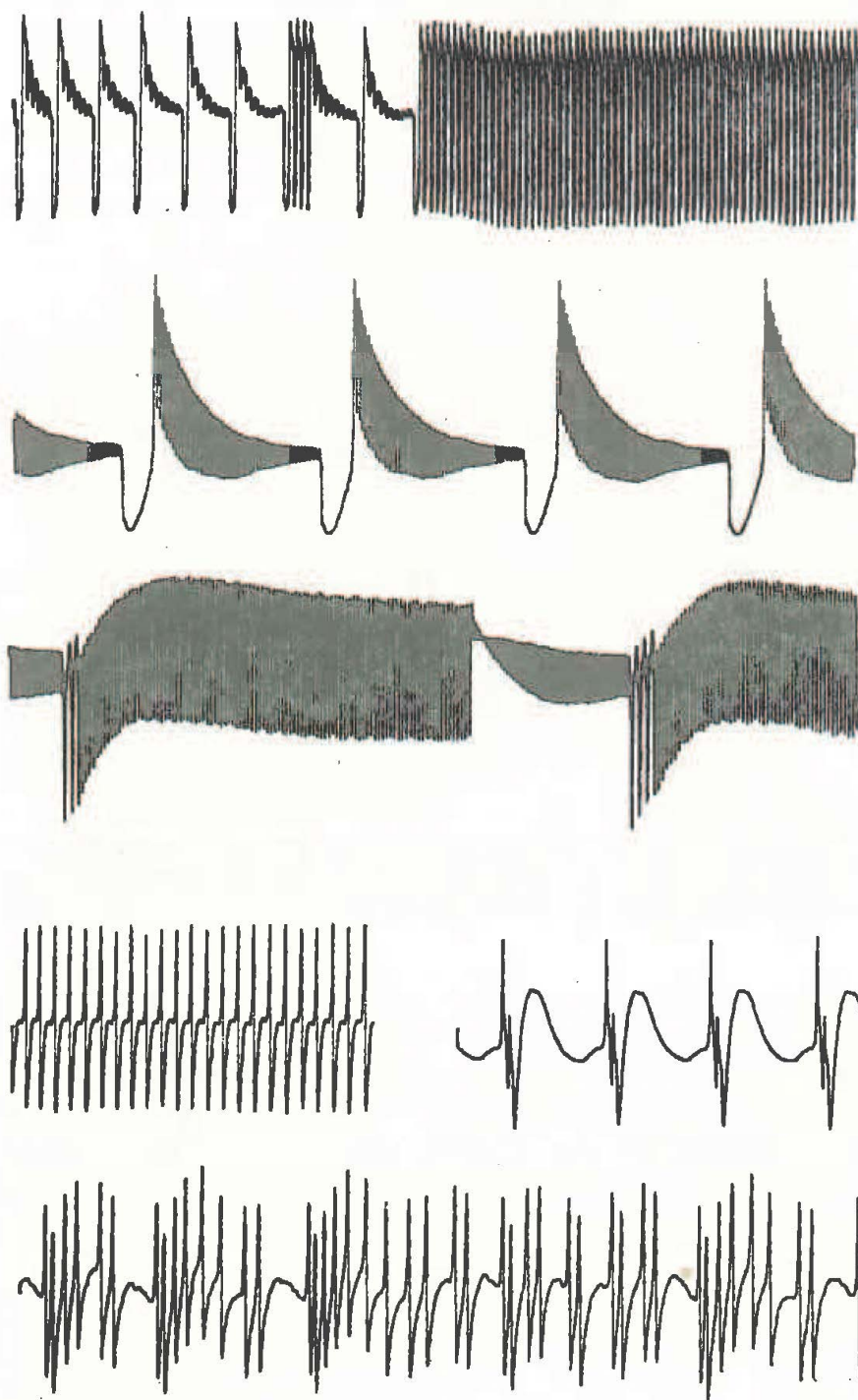
Frekvenční (Chowningova) modulace

Poměr nosné (modulované) frekvence k modulační

1:1	2:1
5:1	8:1
25:2	1:1,3888

Pro poměr frekvencí 4:1 stoupající index modulace $\beta = 0$ až 1

Ukázka čís. 18



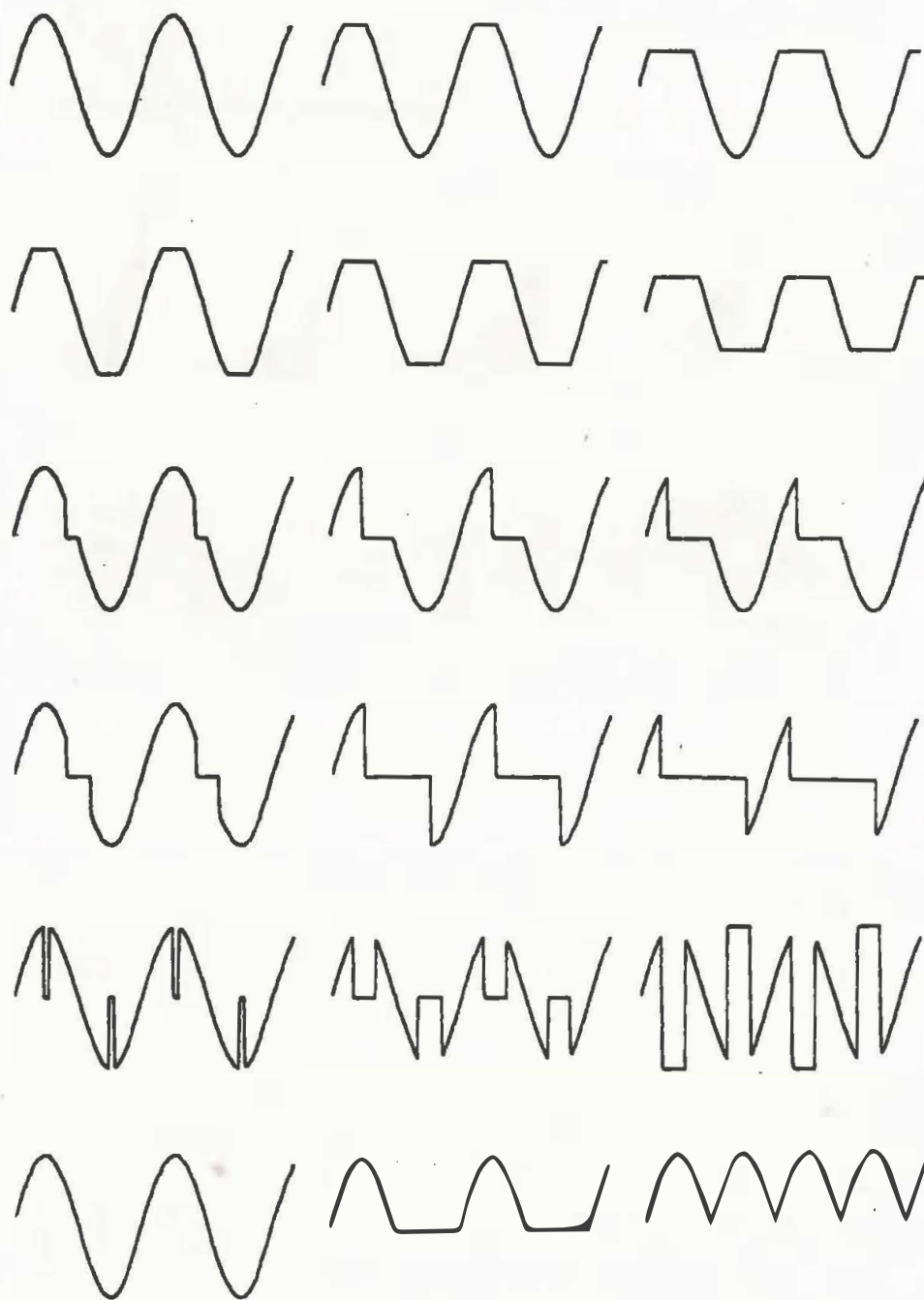
Parametrická modulace (sebou samým)

Vazba na amplitudu signálu — 3 různá nastavení režimu

Vazba na frekvenci signálu — 3 různá nastavení režimu

TVAROVÁ SYNTÉZA

Ukázka čís. 19

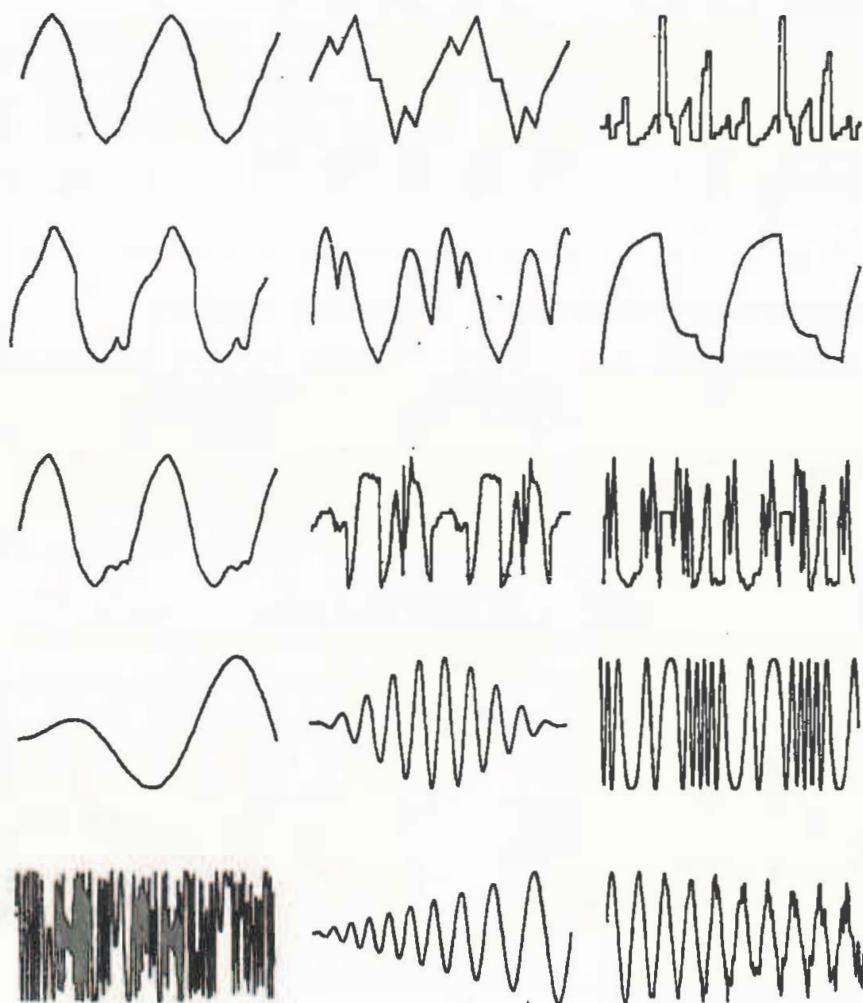


Nelineární tvarování

Různé typy limitací sinusového průběhu

Jednocestné a dvojcestné usměrnění sinusového průběhu.

Ukázka čís. 20



Zadání časového průběhu

Segmentace	lineární hyperbolická	lineární parabolická	obdélníková exponenciální
------------	--------------------------	-------------------------	------------------------------

Experimentálně zadané 3 průběhy signálu.

Exaktně zadané průběhy jedné periody signálu (255 vzorků)

1	2	3
4	5	6

1 — $Q \cdot \sin(Q/27,056)$

2 — $255 \cdot \sin(Q/81,1714)^2 \cdot \sin(Q/4,058)$

3 — $255 \cdot \sin(Q/4,058 + 10 \cdot \sin(Q/16,232))$

4 — $255 \cdot \sin(Q/4,058 + Q \cdot \sin(Q/16,232))$

5 — $Q \cdot \sin(Q/4,058 + 10 \cdot \sin(Q/81,1714))$

6 — $(255 - \text{RND}(Q)) \cdot \sin(Q/4,058)$

pro $Q = 1$ až 255

RND — náhodná funkce

Ukázka čís. 21



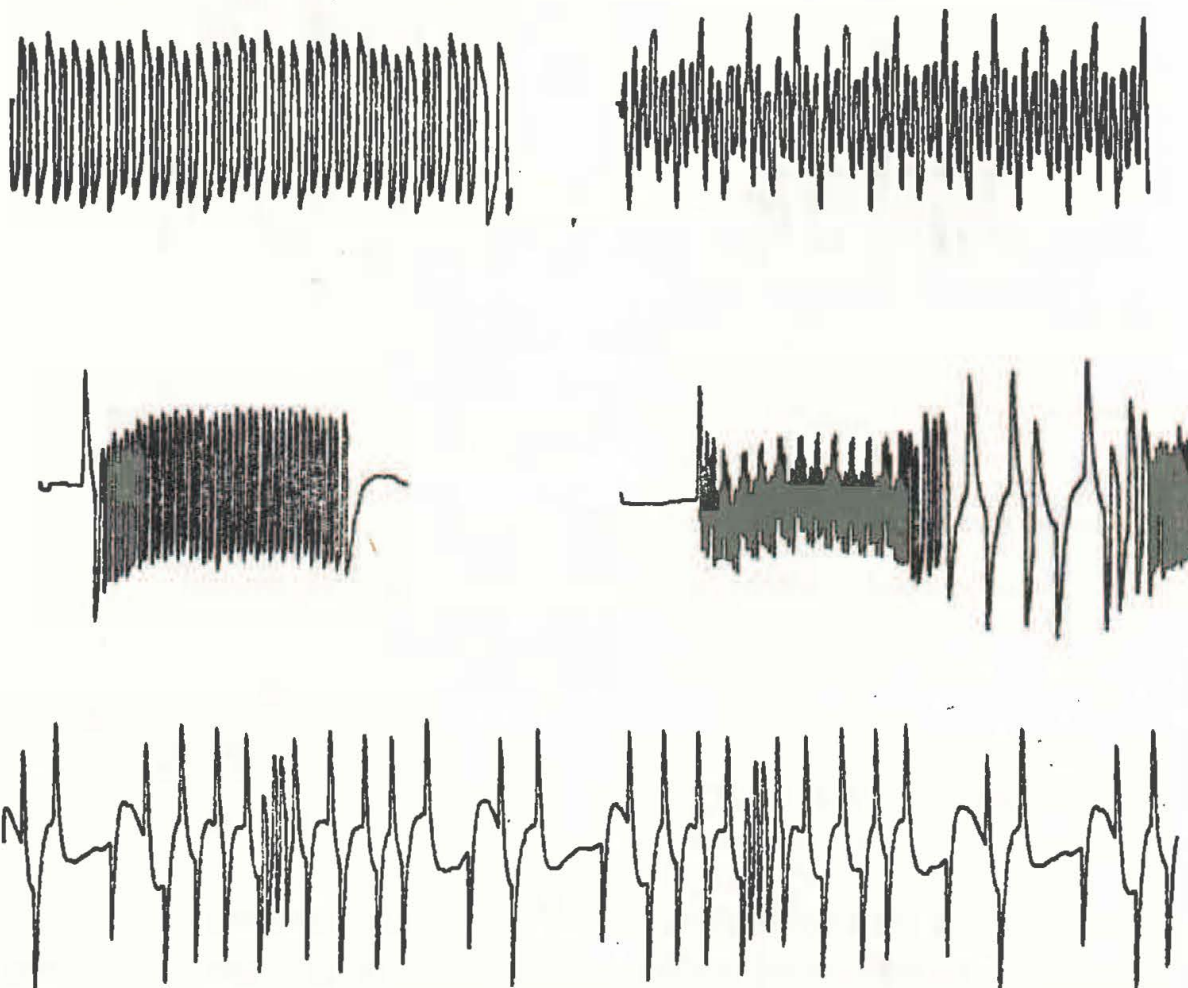
Tvarová rekonstrukce průběhu tónů varhanních rejstříků.

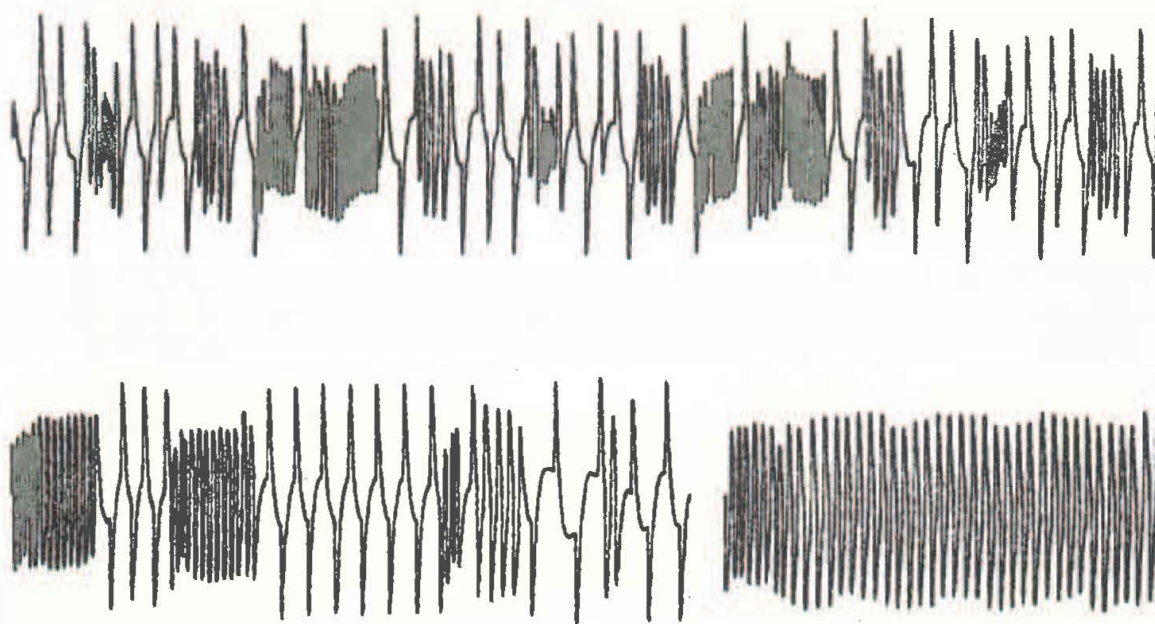
Trompeta polní 8'
varhany
Dvořákova síň
Domu umělců

Vox humana 8'

Hoboj francouzská 8'
varhany
Sjezdový sál
Paláce kultury

Ukázka čís. 22





Ryze digitální syntéza — příklady zvuků generovaných sériovým výstupem počítače

Poznámka: Oscilogramy průběhů uvedených signálů byly v naprosté většině případů pořizovány přímo ze zdroje signálu, bez použití magnetického záznamu, který v důsledku fázového zkreslení může i podstatně změnit tvar průběhu oscilogramu. U případné kopie zvukových ukázek zůstávají i přes toto možné zkreslení zachovány všechny zvukové vztahy mezi jednotlivými ukázkami. Celková doba trvání zvukových ukázek je 25 minut.