

NOVÉ CESTY HUDBY

SBORNÍK STUDIÍ

O NOVODOBÝCH SKLADEBNÝCH SMĚRECH

A VĚDECKÝCH NÁZORECH NA HUDBU

STÁTNÍ HUDEBNÍ VYDAVATELSTVÍ

PRAHA 1964

Teorie informací a hudba

JOEL E. COHEN

Jonathan Swift kdysi řekl, že dobře psát znamená umístit správná slova do správného pořadí. Podobně můžeme popsat práci skladatelovu jako výběr některých zvuků z těch, které jsou k dispozici a uspořádání jich do nějakého druhu schématu. V této stati hovoříme o užití teorie informací v analýze a popisu, o jejich mezích i možnostech.

Syntaktické zkoumání hudby

Klasické výklady teorie informací byly technického rázu. Teorie se vyvíjela pro sdělovací prostředky, kde bylo možno učinit jisté předpoklady o znacích, jež tyto prostředky přenášely, a kde proces sdělování byl definován jako efektivní přenos hmotných znaků. Původně byla doména té teorie patřičně zúžena, pokud jsme na ni nahlíželi jako na teorii vědeckou.

Avšak základní koncepce té teorie mají velikou intuitivní přitažlivost. Za posledních deset let byla teorie informací aplikována aspoň na tucet odlišných oborů. Někdy bylo užití kalkulu teorie informací pečlivě zkoumáno, než jej shledali oprávněným pro ten či onen obor, jindy bylo vzhledem k požadavkům příslušného oboru modifikováno. V některých případech se ale začalo s „experimenty“ bez ohledu na jejich platnost nebo význam. Obvykle se tu někdo dovolával čtenářovy intuice za pomoci mlhavých zevšeobecnění a pak náhle přeskočil na *H*-vzorec (Shannon, 1957)¹ pro míru množství informace a dosadil nějaká čísla. O takovou neseriosnost se dovedly zasloužit zvláště některé práce z oboru hudební teorie.

Hudebníci s matematickými sklony aplikovali *H*-vzorec bez ohledu na předpoklady, jež takový postup vyžadoval. Technikové opět prováděli měření informace bez ohledu na zřetele estetické. Pokud tato mezioborová míšení podnítila nezaujatost ve věcech, které se dotud považovaly v hudbě za „nedotknutelné“, byl to přínos; ale chtějí-li tito lidé, aby výsledkům, jichž dosáhli, byla přirčena platnost, je záhodno znovu přezkoumat prostředky, jimiž jich dosáhli.

Tato stať se pokouší (1) vyložit a doplnit některé předpoklady, které se už dřív objevily v aplikacích teorie informací na hudbu; (2) uvést přehled výsledků, jichž bylo na základě těchto předpokladů dosaženo, a (3) tyto výsledky a předpoklady kriticky zhodnotit, načež naznačíme nutnost některých modifikací a možnosti nových polí výzkumu.

¹ *H*-vzorec je formule pro tzv. informační entropii, označovanou právě písmenem *H*. Říká se mu též vzorec pro míru množství informace. (Pozn. překl.)

Syntaktická teorie

Tischler (1936) ukázal, že vztahy, jež dávají uměleckému dílu estetickou hodnotu, se dají rozdělit do dvou tříd. První sestává ze syntaktických neboli vnitřních vztahů, které jsou vzhledem k vytváření estetického objektu jedinečné. V hudbě k nim počítáme rytmus, melodii, harmonii, kontrapunkt, barevnost tónů či instrumentaci, výraz či vyjádření, a formu či „obrysy, dávající smysl“. Třída druhá sestává z nesyntaktických čili vnějších vztahů, které mají vliv na veškerá umění. Sem patří gesto, program, „etika nebo též vyjádření skladatelových emocí a idejí, jakož i jeho technické mistrovství“, popudy a motivace jak je odráží jeho dílo, zamýšlená funkce díla, historická a společenská podmíněnost, posice díla vzhledem k dějinám a tradicím umění, osobnost a dovednost interpretů, jsou-li; pak též podmínky, za nichž se dílo provedlo či provádí, pokud k tomu došlo.

Konečným cílem syntaktického zkoumání hudby je porozumět, jak hudba sděluje. Význam tohoto omezení na to, *jak* sděluje, je v tom, že výsledky syntaktického zkoumání nezávisí na nesčetných úvahách o tom, *co* sděluje, a mohou platit, ať už hudba sděluje či nesděluje emoce, „význam“ (Langer, 1952), emocionální obrazy, „božskou harmonii“, mravní stavy, anebo vůbec nic krom sebe samé.

Umístit toto syntaktické zkoumání hudby do vhodných vztahů k jiným výzkumům sdělování (komunikování), k sémiotice, k teorii znaků, znamená opatřit si užitečné lešení a metajazyk (Morris, 1955).²

Systémy hudebních znaků

Základní problém syntaktického studia hudby je určení „znakových prostředků“. V posluchačově mysli je posloupnost vjemů, kterou psychologie měří pomocí logických závěrů. V prostoru nebo v přenosovém kabelu je posloupnost jevů, kterou měří fyzika. Pak je též operační schéma, tj. „partitura“ nějaké „skladby“, jež představuje určité aspekty psychologických i fyzikálních jevů. Každá z těchto posloupností vytváří navzájem propojený systém znaků. Každý systém znaků je tu úzce spjat s ostatními.

Až dosud se vědecké studium hudby většinou věnovalo abecedám psychologických a fyzikálních systémů znaků a jejich vzájemným vztahům. Psychologové určili horní a dolní práh vnímání tónu a nejmenší vnímatelné rozdíly kmitočtů, intenzit a časových vzdáleností. Fysikové prostudovali strukturu komplexních zvuků, zanalysovali timbry nástrojů v měnlivých kombinacích obsazení a zvětšili účinnost zvukového přenosu. Helmholtz zjistil, že fyzikální korelát psychologického jevu, zvaného timbre (např. zřetelně odlišitelná „barva“ hobojevého či houslového tónu) je spektrum čili forma vlnění zvuku. Weber-Fechnerův zákon velmi přibližně uvádí ve vztah výšku tónu (psychologicky) a kmitočet (fyzikálně), hlasitost (psychologicky) a intenzitu (fyzikálně), což vyjadřuje obecným zákonem

$$S = K \log E,$$

kde S je psychologický vněm, E je fyzické vzrušení a K je konstanta (Moles, 1958).³

² Metajazyk se dá označit jako jazyk, v němž mluvíme o teorii jazyka, v našem případě pak je to jazyk, v němž mluvíme (píšeme) o teorii hudby. Není to ale sám jazyk teorie, nýbrž jazyk o tomto jazyce. V běžné řeči užíváme mimoděk slov jazyka i metajazyka, což při logické analýze vede pak často k absurdnostem. Blíže o tom viz např. v knize Otakar Zich a kol., *Moderní logika*, MME, Orbis 1958, str. 25. (Pozn. překl.)

³ Viz např. Špelda, *Úvod do akustiky pro hudebníky*, KLHU 1958, str. 210. (Pozn. překl.)

Psychologický systém hudebních znaků dává o průběhu provedené hudby o něco méně informací (jak ve všeobecném, tak v technickém smyslu) než fyzikální popis. Kdežto přístroje pro fyzikální měření mohou určit kmitočet tónu na malý zlomek Hertzu,⁴ člověk-vnímatel rozliší jen asi 1200 zřetelných kmitočtových výšek (frekvencí) v rozsahu možností lidského vnímání, tj. asi od 16 do 16 000 Hz. Je necitlivý k změnám pod prahem kmitočtového rozdílu řádu jednoho komatu. Podobně necitlivý je, sestoupí-li pod práh intenzity zvuku řádu jednoho decibelu, takže rozlišuje asi sto stupňů hlasitosti, jsou-li ostatní složky (výška, trvání) stejné. Fyzikálně rozlišitelné zvuky, které jsou přitom psychologicky tytéž, nazývají se „metamerické“ (Meyer-Eppler, 1958, str. 59). Ježto je zřejmě mnoho metamerických zvuků (tónů), je základní abeceda znaků, z níž čerpá fyzikální znakový systém, mnohem rozsáhlejší než abeceda, z níž čerpá znakový systém psychologický.

Kultivovaný posluchač hudební produkce má sklon ignorovat rozdíly, které je jinak fyziologicky schopen rozlišovat. To proto, aby se orientoval ve struktuře skladby, i když by ke zhodnocení produkce mohl užít všech rozlišovacích schopností, jimiž je nadán. Tak například může posluchač rozpoznat Beethovenovu pátou symfonii, i když je provedena v úpravě pro dva klavíry a uboze přednesena. Může rozpoznat, že pěvkyně chtěla zazpívat tón určité výšky, i když slyší odchylku až o čtvrt tónu. Posluchači mohou sledovat metrický puls a srovnávat jej s časem, i když se vyskytnou větší rubata nebo acceleranda. Operační schéma, o němž obvykle uvažujeme jako o hudebním kusu, není tedy jednoznačná posloupnost zvuků nebo počítků, nýbrž spíše „pole volných odchylek“, soubor mnoha možných fyzikálních i psychologických realizací.

Partitura hudebního kusu představuje takové „pole volných odchylek“. Složky partitury (tónové výšky, označení rytmů atd.) jsou „kulturní abecedou“, všeobecnými pokyny, s nimiž se v minulosti musili skladatelé spokojit. Kulturní abeceda je soubor kulturně významných zvuků, jež má skladatel k dispozici. Je analogický fonémické redukci mluveného jazyka, souboru to symbolů, jež představují kulturně významné zvuky řeči, jíž mluví určitá skupina lidí (Moles, 1958).

Proměnlivá zobrazení^{5a} uvádějí do vztahu fyzikální, psychologické a kulturní soustavy hudebních znaků. Tato dynamická zobrazení se mění během poslechu. Při zobrazení mezi fyzikální a psychologickou soustavou shrnuje ucho fyzikálně sice rozlišitelné, avšak metamerické zvuky do skupiny jedné úrovně výškových (hlasitostních, časově délkových) rozlišení. Při zobrazení mezi soustavami psychologickou a kulturní shrnuje si kultivovaný posluchač jinak rozlišitelné stupně výšky, hlasitosti a časových délek do jediné kulturně významné zvukové jednotky, kterou v partituře představuje psaná nota.

Matematicky vyjádřeno: ježto více-jednoznačné zobrazení aplikované na psychologickou soustavu znaků dává strukturu isomorfní ke kulturní soustavě znaků, je kulturní soustava znaků (partitura) homomorfní k psychologické soustavě znaků.⁵

^{3a} O pojmu zobrazení ve smyslu teorie množin se lze poučit např. u P. S. Aleksandrova: Úvod do obecné teorie množin a funkcí, ČSAV, 1954. (Pozn. překl.)

⁴ V originále je „cyklu za sekundu“, my se však přidržujeme zdejší zvyklosti. N kmitů za sekundu je totéž, jako n Hertzů (Hz), nebo n cyklů za sekundu. (Pozn. překl.)

⁵ O pojmech isomorfie a homomorfie se lze poučit v kterékoli dostupné publikaci o kybernetice. Viz např. I. A. Poletajev, *Kybernetika*, SNTL, 1961, str. 38. Nebo W. R. Ashby, *Kybernetika*, MME, Orbis 1961, str. 124. (Pozn. překl.)

Tato formulace vztahů mezi psychologickou a kulturní soustavou znaků řeší, zdá se, dichotomii Springerovu (1956), jenž poznamenává, že hudba patrně má jak konkrétní fyzikální rovinu, která existuje ve vzduchovém prostoru mezi interpretem a vnímajícím, tak i „idealizovanou abstraktní rovinu“, která existuje v mysli obou. Podle hořejší formulace je ona idealizovaná, abstraktní rovina prostě soustavou kulturních znaků, která se vytvoří, když interpret i vnímátel vhodným způsobem ignorují dostatečný počet detailů v psychologickém průběhu jevů nebo ve zprávě. („Zpráva“ je termín teorie informací. Pozn. J. R.)

Nyní se budeme zabývat přehledem a hodnocením aplikace teorie informací na studium syntaktické struktury soustav kulturních znaků.

Nezbytné důsledky, plynoucí z teorie informací

Mnohé z těchto aplikací na hudbu, jež představují intuitivní užití Shannonovy míry obsahu informace, se zásadně neobtěžují formálním přístupem k věci. Působí to nepříznivým dojmem, neboť vzhledem k tomu, že teorie sama se jeví jako vratká a mlhavá, domnívají se mnozí, že i výsledky aplikace musí mít nedostatečnou platnost.

Těch několik matematických předpokladů o povaze zdrojů, na něž lze teorii informací aplikovat, uvedeme v přehledu později při kritice aplikací. A ještě jeden předpoklad: ježto až dosud všechny aplikace považovaly kompozice za sledy diskrétních (nespojitéch) kulturních znakových prostředků, užívaly výlučně teorie diskrétních zdrojů s konečnými abecedami. Všeobecná teorie pojednává též o obsahu informace spojitéch forem vlnění; je možné, že budoucí aplikace budou brát v úvahu vlnové formy hudby jakožto písmena nebo znakové prostředky.

Adekvátní formální vývoj diskrétní teorie (Chinčín, 1957) definuje Shannonův H -vzorec v termínech konečného schématu, množiny navzájem neslučitelných možností se sdruženými pravděpodobnostmi.

Popišme stručně ty vlastnosti H -míry, které mají význam pro aplikaci na hudbu.

Jestliže jsou v konečném schématu všechny pravděpodobnosti až na jednu, kterou označíme p_k , rovny nule, a jestliže $p_k = 1$, pak není nejistoty, neboť sdružený jev E_k musí nastat; tedy $H_1 = 0$.

Jestliže ve schématu n jevů jsou si všechny pravděpodobnosti rovny, je nejistota maximální; H bude tedy mít svou největší hodnotu ($H_1 = \log n$).

Jestliže konečné schéma B je závislé na A tak, že výskyt jevu A_k změní pravděpodobnosti ve schématu B , pak výskyt jevu A_k může nejistotu sdruženou s B jen zmenšit. Důsledek je, že ve sledu jevů, jejichž schémata jsou závislá na jevech, které jim předcházely, má dodatečná nejistota každého nového jevu tendenci zmenšovat se. (Srv. str. 210.)

Shannonova míra informace není v žádném případě míra nějakého „významu“. Zatímco vzorec

$$H_1 = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (1)$$

se vztahuje na skupinu jevů nebo zpráv, vztahuje se „význam“ na jednotlivou zprávu (MacKay, 1955).

„V této nové teorii se vlastně slovo informace vztahuje ani ne tak na to, co skutečně říkáme, jako spíš na to, co bychom mohli říci. To znamená, že informace (– obsah informace) je míra naší volnosti výběru, když zprávu vybíráme.“ (Weaver, 1955, str. 100).

Vzhledem k této vlastnosti není zajisté vhodná k vyjadřování sémantického v soustavě znaků, avšak hodí se k vyjadřování toho, co je v systému znaků syntaktické.

Zdroje stochastické

V teorii informací je výstup jakéhokoli zdroje informací, např. sdělovatele A , považován za stochastický proces, tj. zdroj, vysílající náhodně znaky s nějakými pravděpodobnostmi. Zdroj je matematicky definován svou statistickou strukturou.

Markovovské řetězce jsou stochastické zdroje, u nichž existují mezi písmeny emitovaných následností sledové závislosti. Markovovský řetězec m -tého řádu je definován pravděpodobnostmi všech $(m - 1)$ -gramů (sledů $m - 1$ písmen) a maticí pravděpodobností přechodů od každého $(m - 1)$ -gramu ke každému písmeni v abecedě tohoto zdroje. V markovovském řetězci m -tého řádu existují následné závislosti m -tého řádu: na pravděpodobnost výskytu určitého m -tého písmene má vliv předchozí sled $m - 1$ písmen. Teoreticky mohou existovat ve sledu písmen následné závislosti jakéhokoli řádu, pokud je sled dostatečně dlouhý.

Informaci, získanou v okamžiku, kdy markovovský řetězec postoupí o písmeno vpřed, tj. průměrný obsah informace na písmeno, nemůžeme měřit jen vzorcem pro H_1 . Vezmeme-li v úvahu následné závislosti řádu druhého, je informace, získaná z druhého písmene nějakého digramu (sledu o dvou písmenech) rovna celkovému obsahu informace tohoto digramu (i, j) , minus obsah informace prvního písmene (i) . Je tedy průměr získané informace

$$H_2 = H_i(j) = H(i, j) - H_i \quad (2)$$

Podobně, jestliže uvažujeme následné závislosti m -tého řádu, označujeme průměr obsahu informace jednoho písmene symbolem H_m . $H_0 = \log n$ bere zřetel pouze na n , tj. na počet písmen abecedy.

Redundance

Každému H_m odpovídá redundance R_m ,

$$R_m = 1 - H_m \log n \quad (3)$$

Význam „redundance“ v sobě nezahrnuje nic pejorativního.

„Pokud je nějaký sled redundantní, je R určitým způsobem pravidelné nebo, chceme-li, zákonité. Každý vyšší než prvý řád redundance implikuje skutečnost, že jevy sledu jsou více či méně uspořádány; že tedy mezi nimi existují následné závislosti. Avšak ani stupeň ani řád redundance nám výslovně neřekne, o jaký druh zákonitosti nebo uspořádanosti jde.“ (Attneave, 1959).

Redundance nám opatřuje kvantitativní míru pořádku.

Redundance v signálu, přenášeném z vysílače do přijímače nám pomáhá v boji proti omylům, které působí šum v přenosovém kanálu, zajišťujíc tak, že komunikant B bude extrahovat ze signálu zprávu, kterou má obdržet.

Pojem šumu je velice všeobecný; zahrnuje v sobě klid, zkomolení, poruchy, zmatení a omyly, které se v signálu vyskytují. Šum přeměňuje signál z pravděpodobného na méně pravděpodobný, z jistějšího na méně jistý; obsah informace zprávy se zvět-

šuje. Paradox, že šum zvětšuje obsah informace zprávy, se vysvětluje rozlišováním mezi žádoucí a nežádoucí informací; příjemce zprávy je postaven před problém rozoznat nepravý obsah informace, způsobený šumem, vzniknuvším při vysílání intencionálního obsahu informace z informačního zdroje. Pokud jde o hudbu, „je předvádění vnitřních vztahů považováno se strany skladatele za zcela intencionální, vyjímajíc případy, kdy skladatel podlehe slabůstkám“ (Tischler, 1956, str. 204). Proto mohou posluchači pečlivě studovat hudbu téže vnitřní struktury jakožto šum.

Redundance podává též „informaci“ o povaze zdroje. I když můžeme například snadno předvídat závěrečný akord beethovenské symfonie, přece poskytuje informaci o struktuře beethovenské skladby jakožto stochastickém zdroji. Nemáme však žádný důvod vynechat ten závěrečný akord proto, že je redundantní (Youngblood, 1958, str. 29).

Jak už jsme poznamenali, může určitý sled teoreticky projevit uspořádanost jakéhokoli řádu. Poslední slovo románu závisí do určitého stupně na každém předcházejícím slově toho románu. Při praktické aplikaci omezují však dvě věci řád m zkoumané uspořádanosti. 1. Stoupá-li m , může se H_m takřka znivolisovat (dostat asymptotický průběh), popřípadě se vůbec přestat měnit. 2. Práce s výpočtem, kterou musíme vzít v úvahu, pokoušíme-li se určit pravděpodobnosti m -gramů, jež nás může dovést až k n^m , kde n je počet písmen abecedy (Attneave, 1959, str. 22). Například počet možných oktogramů (8-gramů) pro smyčcový kvartet je řádu 10^{64} a je nasnadě, že uspořádání, které bychom hledali, bude asi mnohem vyššího řádu než 8. I když i sebedivočejší smyčcový kvartet je pravděpodobně ještě příliš redundantní a navíc určitě přespříliš krátký, než aby obsahoval počet oktogramů, jenž by se blížil číslu 10^{64} , výpočtová práce by byla i tak úděsná. V některých dříve provedených analýzách hrály prominentní roli počítače. Budeme s jejich užitím musít počítat čím dál víc, jak se význam a požadavky analýsy zvyšují.

Hudba jakožto markovovský řetězec

Kompozice jakožto výběr

Skladatel má rozsáhlou abecedu možností. Tato abeceda není jednoduchá množina sedmi not, nýbrž sestává z 350 000 rozlišitelných zvuků v plném rozsahu lidského sluchu. Píše-li skladatel v evropské tradici, omezuje se asi jen na sto výškových oblastí (vyjádřených asi stem not), asi na devět relativních stupňů hlasitosti a na velký jinak počet timbrů a kombinací timbrů použitelných hudebních nástrojů. I toto nesmírné omezení skladatelovy abecedy poskytuje však ještě uplatnění velikému počtu rozličných zvukových možností pro libovolný časový okamžik (bod), a tento veliký počet možností roste exponenciálně každým následujícím časovým okamžikem. Skladatelé, kteří si přejí ještě rozsáhlejší abecedu, například elektronikové, stojí tvářív v tvář mnohem větším problémům výběru. Skladatel se tu prostě setkává s překriveností hudebního materiálu.

Skladatelův úkol je pořídit výběr z možností, které má k dispozici a, jak velí tradice, dát jim nějaký „řád“. Stravinskij (1956) hovoří o „... potřebě, kterou pocítujeme, abychom z chaosu vyextrahovali řád, abychom z klubka možností a nerozhodnosti nevyhraněných myšlenek odvíjeli nebo vyprošťovali nit své vědomé činnosti... Nuže, umění je opakem chaosu... Každé umění předpokládá výběrovou činnost...

postup pomocí eliminace — totiž vědět, řečeno po karbanicku, jak *odkládat* karty do talonu, to je ta velká technika výběru.“

Stupeň selekce se liší od skladatele ke skladateli a od skladby ke skladbě. Cítíme intuitivně, že Bachova hudba například, je „uspořádanější“ než hudba Johna Cage, současného skladatele z těch, kdo záměrně uvádějí do *kulturní* soustavy znaků svých komposic prvky náhody a náhodné zvukové sledy. Podle Cageovy zásady „strukturální neurčitosti“ je dovolen ve skladbě jakýkoli sled, kdežto v Bachovi se objevují prokazatelně jen uspořádanosti určitého druhu. Bach je selektivnější než Cage. Parametrem slohu skladatelů je tedy stupeň selektivity jejich děl.

Slohy jakožto pravděpodobnostní systémy

Považujeme-li skladatele za markovovské zdroje, to jest — jestliže jejich výstupní výkon můžeme považovat za vyhovující předpokladům teorie, pak vzorce pro redundanci (rovnice 3) jsou mírou stupně uspořádanosti neboli vazebnosti (struktura-ce) jejich děl. Abychom tedy mohli ospravedlnit aplikaci redundanční míry, je nutno prokázat, že zkoumaná soustava je skutečně markovovský řetězec. Tento předpoklad je podporován popisem hudebních slohů jakožto pravděpodobnostních soustav.

„Hudební slohy jsou v podstatě komplexní systémy pravděpodobnostních souvztážeností, v nichž význam kteréhokoli členu (nebo řady členů) závisí na jeho vztazích ke všem ostatním členům, pokud tyto patří, resp. mohou existovat v příslušném slohovém systému“ (Meyer, 1956, str. 54).

Tak např. Frances Densmoreová (1918) ve svých četných a rozsáhlých studiích o indiánské hudbě popsala slohy v termínech statistických. Pořídila mj. tabulky, v nichž shrnula četnosti výskytu tonalit, vztahy každé první a poslední noty zkoumaných písní k základní notě, počet stoupajících a klesajících intervalů, počet akcidentských písní, počet písní zaznamenaných v různých modech, počet písní, začínajících nebo končících sestupným či vzestupným intervalem apod.; ježto mnohé z těchto výsledků vyjádřila v procentech, je zřejmé, že soustava tu byla popsána jako pravděpodobnostní.

Partitura hudebního díla nejen že může být charakterisována jako pravděpodobnostní soustava, nýbrž i posluchač sám *vnímá* hudbu jako pravděpodobnostní soustavu, neboť ji považujeme za sled buď kulturních, nebo psychologických znaků, případně za obojí.

„...tíše, nenápadně, bez přestání musí mozek vypočítávat pravděpodobnosti, které jsou příznivé určitému jevu nebo souboru jevů, vyplývajících jeden z druhého. V nejjednodušším, izolovaném případě, jako je tomu v laboratoři, jsou tyto pravděpodobnosti založeny na nějaké formě — na předchozím ději tohoto zvláštního souboru, který uplynul a který považujeme za soubor následných dvojic; jsou založeny na zkoumání toho, jak se předchozí jevy dostaly do posloupnosti...“ (Grey Walter, 1953, str. 69).

Toto počítání pravděpodobností se vztahuje bezprostředně na hudbu, u níž pravděpodobnosti výskytů *jsou* založeny na formě; mozek tu automaticky provádí něco podobného tomu, co zde uvádíme v přehledu jako syntaktický výzkum.

Hindemith (1952, str. 16) popisuje průběh posluchačova vnímání podobně, jenže v intuitivnější formě.

„Zatím co naslouchá hudební struktuře, jak se rozvíjí, vstupující do jeho sluchu, konstruuje si v duchu paralelu k ní a zároveň též jakoby zrcadlem odražený její obraz. Zachycuje složky skladby v tom pořadí, jak dojdou do jeho sluchu a zároveň se snaží uvést je v soulad s těmi jim odpovídají-

cími součástmi, které si v duchu konstruuje. Nebo si též prostě domýšlí předpokladatelný průběh skladby a porovnává jej s představou hudební struktury, kterou si v paměti po předchozích zkušenostech nashromáždil.“

Vztahy a jejich vnímání v hudbě

Při rozpoznávání pořádku, jak jej představuje partitura, porovnává mozek spíše vztahy mezi následnými jevy než mezi absolutními hodnotami. Namísto absolutní výšky harmonií vnímá mozek vztahy mezi výškami nebo mezi intervaly (McCulloch, 1949). Podobně vnímá mozek uspořádanost vztahů jednotlivé melodické linky.

„...je zajímavé všimnout si, že naše rozpoznávání slov nebo melodie závisí především na způsobu, jímž maxima aktivity na basilární mozkové membráně provádějí pohyb sem a tam, že závisí vlastně spíše na dočasném vjemu jejich uspořádání než na jejich přesném umístění v pořadí. Posloucháme-li melodii, nezáleží přitom na absolutní výšce tónů; není nutné, aby docházelo k excitaci určitých buněk v mozkové kůře, neboť to, co rozpoznáváme, je určitá časová posloupnost aktivity ve sluchové sféře...“ (Adrian, 1947, str. 52).

Aplikace teorie informací na hudbu jsou tedy z největší části vyjadřovány spíše v termínech kmitočtových vztahů a vztahů mezi časovými délkami než v pojmech absolutních hodnot.

Metody aplikace

Zatím se vyvíjely tři hlavní způsoby přístupu k aplikaci teorie informací na hudbu: analyticko-synthetický, synthetický a analytický.

Analyticko-synthetické výzkumy použily stejnorodých celků již existující hudby jako jsou dětské popěvky, kostelní písně a kovbojské písně. Z nich experimentátoři odvodili matice přechodů pravděpodobností a pak použili podmíněných pravděpodobností k vyvozování vzorkových hudebních kousků (vzorků). Při těchto výzkumech se označí řád analýsy, tj. velikost m -gramu, potřebného k obdržení hudebního vzorku, odpovídajícího vztahům v originálu. Synthetický výstupní výkon ukazuje, kterou z charakteristik původní hudby (originálu) vzala analýsa v úvahu.

Je-li do samočinného počítače „vložená“ bachovská fuga, nemá valného smyslu naprogramovat mu její vytištění. Jestliže však pravděpodobnosti, které dáme do počítače jsou považovány za analogické zkušenostem skladatele, a jestliže tyto pravděpodobnosti jsou založeny na podkladu širokého rozsahu hudby, klasické nebo moderní, pak výstupní výkon může být srovnán s běžným výkonem skladatelů, aby se zjistilo, do jaké míry jsou jejich skladby pravděpodobnostním znovuvytvářením kombinací, založeným na jejich předchozích zkušenostech. (To se dosud neprovádělo.)

Synthetická díla, pokusy o generování hudby, sledovaly ve všeobecných obrysech Ashbyho návrh (1956) užít náhodnostního zdroje (který vystřídá všechny možnosti) a nechat procházet výsledky výstupu tohoto zdroje selektorem. Formalisovaná kompoziční „pravidla“ mohou být v počítači převedena do číselných výrazů a selektor pak výběrově působí na sled náhodných čísel, která počítač generuje. Pak je možno přesně v hudebních termínech vyčíst, kolik rozmanitosti nebo omezení hudebních pravidel vyplyne z výstupu. Srovnání výstupního výkonu stroje s výstupním výkonem člověka, pracujícího podle stejných pravidel by ukázalo, které prvky lidského výkonu jsou jedinečné. Počítače možno užít tak, že experimentujeme s výsledky systematického obměňování omezujících pravidel, které dává výstup stroje nebo též

k zavádění zcela nových pravidel selekce. Pomocí aritmetického zakodování pravidel je vlastně možno užít počítače k masové produkci jakéhokoli druhu hudby.

Analytické práce se především pokoušely užít redundance jako parametru slohu. Číselná hodnota redundance byla navrhována jako vyjádření charakteristiky určitého souhrnného celku hudby, např. německých „Lieder“ devatenáctého věku. Jindy zas užili zkoumatelé analytické výsledky ke srovnávání slohů rozličných období.

Vyskytla se též domněnka, že by analýza několika „mistrovských děl“ mohla poskytnout optimální hodnoty pro obsah informace, kterých by se dalo použít jako měřítek (kritérií) pro posuzování skladeb jiných. Na to jsou dvě námitky. Za první: syntaktická analýza naprosto abstrahuje od vnějších vztahů, jako je nedostatek přirozené prostoty vkusu obecně a místo skladby v dějinách hudby, kteréžto vztahy jsou důležité, ba při určování „hodnoty“ skladeb dominující; za druhé: zatímco zaujetí pro uspořádanost nebo neuspořádanost může být dost platné v praxi, v teoretické analýze nemá valného významu.

Analyticko-synthetické aplikace teorie informací na hudbu

Kovbojské písně

První analyticko-synthetickou aplikaci teorie informací na hudbu provedli Fred a Carolyn Attneaveovi. Quastler (1955a) sděluje, že Attneavovi analysovali kovbojské písně Západu, aby obdrželi přechodové pravděpodobnosti pro každou notu, jež určité notě *předchází*. Pak začali vypočítávat od závěrečné noty *C* zpětným způsobem markovovský řetězec s příslušnými pravděpodobnostmi. (Je zřejmé, že všechny písně byly napřed ztransponovány do *C*, pozn. J. R.) Předtím zvolili pevnou standardní formu a rytmus. Výsledkem několika tuctů náhodných chodů po řetězci byly dvě „naprosto přesvědčivé“ kovbojské písně, tj. bylo možno je najít v několika tuctech sledů, vytvářených vzhledem k pravděpodobnostem, které poskytl zdroj. „Je možno se právem domnívat, že trochu propracovanější statistický přístup (možná pouhé rozšíření z digramů na trigramy) by měl za výsledek opravdu slušné procento vzorků lidové písně“ (Quastler, 1955a, str. 168–169).

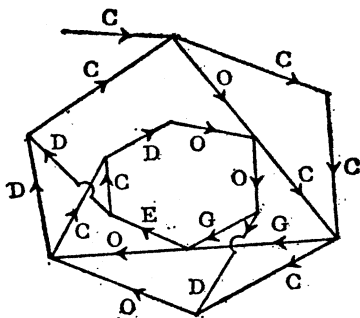
Dětské popěvky (Nursery tunes)

Druhá aplikace připoutala, zdá se, širokou pozornost na možnost užití teorie informací v hudební analýze, protože se o ní mluví při aplikacích, které vzápětí následovaly. Pinkerton (1956) ztransponoval 39 dětských popěvek do *C*. Propočítal pravděpodobnosti sedmi tónů diatonické stupnice plus pravděpodobnost pauzy nebo fermaty.

Na základě jednoduchých pravděpodobností, přičemž vzal v úvahu, že jeho abeceda má sedm písmen, spočítal Pinkerton redundanci R_1 na 9%. Rozepsal si pravděpodobnosti dvojic not do tabulek a vytvářel popěvky; za náhodný zdroj mu posloužila hromádka dvanácti vhodně označovaných karet.

Pak zavedl redundanci rytmickou. Takt nesměl začínat pauzou nebo fermatou. Jelikož přechod z dané noty na sousední se různil podle jejího umístění v taktu, sestrojil Pinkerton šest matic přechodů, z nichž každá příslušela jednomu z možných umístění noty (pauzy) v šestiosminovém taktu. Z každé z těchto šesti matic vyvolil buď

jeden, nebo dva nejpravděpodobnější přechody a tak sestrojil v okruzích vedenou síť (kinematický graf), která poskytuje nejméně dvojitou možnost volby, a dal jí název „výrobce prostoduchých popěvků“, poněvadž „má stěžlů víc invence než dětská hudební skříňka“. (Viz obr. 1.)



Obr. 1. Pinkertonův „výrobce prostoduchých popěvků“ (Pinkerton, 1956, str. 78.)

Na „výrobci“ vytváříme sled tak, že sledujeme čáru ve směru šipek a zaznamenáme (vždy) notu, kterou je příslušná úseková spojnice označena. Dojdeme-li k uzlu, kde je možnost výběru dvojí, můžeme užít losování pomocí mince (nebo jakýkoli jiný způsob), aby se rozhodlo, kudy pokračovat. Vzorok práce tohoto „výrobce popěvků“ předvádí notový příklad 1 (str. 192).

Na základě třiceti možných sledů o délce jednoho taktu jakož i různých pravděpodobností shledal Pinkerton, že jeho „výrobce prostoduchých popěvků“ má redundanci přesahující 63 %.

Instruktivní kousky

Sowa (1956) sestrojil na základě použití Pinkertonova způsobu „stroj na skládání hudby“. Stroj měl v mechanickém provedení okruhově vedenou síť podobnou Pinkertonově, jenže složitější; Sowa ji odvodil na základě svých vlastních rozborů instruktivních klavírních kousků. Třeba byl jeho stroj vlastně pomalejší než sledování čáry na papíře, uvedení počítače otevřelo brány tomu, aby se do něj vtělovaly postupy užítající jinak tolik času a aby se tím proces vytváření zrychlil. Příklad 2 uvádí vzorek výstupu stroje.

Kostelní písně (Hymn tunes)

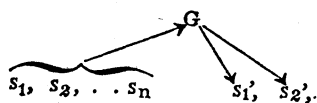
Nejvyumělkovanější práce v oboru analyticko-synthetickém je F. P. Brooksova (Brooks a jiní, 1957). Hlavní body jeho sdělení jsou tyto:

Ačkoli nynější počítače nemohou indukovat obecná pravidla, nýbrž mohou jen dedukovat, přece jsou schopny indukovat pravděpodobnosti tak, že spočítají relativní četnosti⁶ a jsou schopny užít výsledků k pravděpodobnostní dedukci.

Obr. 2 představuje zobecněné schéma pro analyticko-synthetické výzkumy. Počít-

⁶ Míněny jsou relativní četnosti přechodů. Má-li např. nějaká melodie v C dur 42 not a vyskytne-li se v ní přechod z noty *e* na *g* jednadvacetkrát, nota *e* sama pak osmadvacetkrát, musíme dělit předem zjištěnou absolutní četnost přechodu *e*→*g* absolutní četností výskytu noty *e*. Obdržíme pak relativní četnost přechodu *e*→*g*, jež činí $\frac{21}{26}$. (Pozn. překl.)

tač analyzuje daný vzorek (sample) S_1, S_2, \dots, S_n a obdrží množinu pravděpodobnostních zevšeobecnění G . Výstupní výkon S'_1, S'_2, \dots se vytváří na základě pravděpodobnostních zevšeobecnění v množině G .



Obr. 2. Obecný model analyticko-synthetického procesu (Brooks a jiní, 1957, str. 175).

Analýza vzorku sestává 1. z určení množiny základních písmen, tj. abecedy, a 2. z určení kombinatorických souvztažností mezi nimi. Výčtem kombinatorických vztahů může být a) jasný a přehledný seznam pravidel, b) vyčerpávající výčet všech přípustných kombinací, nebo c) výčet pravděpodobností výskytu písmen a přechodů mezi nimi. Zvolena poslední metoda: markovovská analýza řádu m určuje pravděpodobnost každého písmene, jež následuje za každým $(m-1)$ -gramem.

V markovovské synthese je zvoleno m -té písmeno, aby následovalo za daným $(m-1)$ -gramem podle pravděpodobností, vyhledaných analyzou. Aby výběr byl prováděn podle pravděpodobností, užívá se tu metody Monte Carlo (McCracken, 1955). (Tato metoda je užita v této studii a ve všech ostatních synthetických aplikacích, o nichž je v této stati řeč.) Metodu znázorníme příkladem: abychom vyprodukovali sled z konečného schématu,

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ .22 & .75 & .03 \end{pmatrix}$$

vytvoříme si nebo použijeme hotovou tabulku náhodných čísel (rovnoměrné rozdělení, angl. uniform distribution) od 00 do 99. Všechna od 00 do 21 budeme považovat za hodnotu A , od 22 do 96 za hodnotu B a od 97 do 99 za hodnotu C (rozdělení nikoli rovnoměrné). Dostatečně dlouhá sekvence reprodukuje pak pravděpodobnosti tohoto konečného schématu.

Za vzorek bylo vybráno 37 kostelních písní, které měly běžné čtyřčtvrteční metrum.⁷ Než se počalo s analyzou, byla jejich složitost redukována tím, že se odhlédlo od timbru a všechny se ztransponovaly do C . Pomlky v jednotlivých čtyřčtvrtečních taktech se ignorovaly a nahlíželo se na ně jako na ligaturou přetažené noty z not předchozích, vyjma pomlku, charakteristickou pro začátek každého kusu. Jednotky kratší než ♪ se nebraly v úvahu.

Aby bylo možno zapojit komputátor, byla notám v rozsahu přes 4 oktávy přiřazena čísla. Odlišující se 8-gramy byly odděleny a zařazeny posloupně podle svých 7-gramů. Pak byly 7-gramy uspořádány podle svých počátečních 6-gramů a tak dále. Na příklad AAAAAAAB a AAAAAAAC jsou rozdílné 8-gramy, ale byly zařazeny pod týž 7-gram. Ježto každá z osmitaktových písní měla čtyřiašedesát 8-gramů, vzniklo třicet sedmkrát šedesát čtyři = 2368 potenciálních 8-gramů. Zřetelných 8-gramů bylo nalezeno pouze 1701; zřetelných 7-gramů 1531.

⁷ O metodě Monte Carlo, náhodných číslech a číslicích jakož i o druzích rozdělení je možno se počít v dílech: V. Dupač—J. Hájek, *Pravděpodobnost ve vědě a technice*, knižnice Cesta k vědě, ČSAV 1962, str. 128, nebo: Jaroslav Hájek, *Teorie pravděpodobnostního výběru*, ČSAV 1960, str. 61 (o rovnoměrném rozdělení), str. 83 a 284 (tabulky náhodných čísel). (Pozn. překl.)

Při synthese byla generována osmiciferná náhodná čísla. První nota byla vyhledána z pravděpodobnostních tabulek m -gramů, jejichž prvních $m-1$ not byly pausy. Druhá nota byla vyhledána z tabulek m -gramů, u nichž počet prvních $m-2$ not byly pausy a jejichž předposlední nota byla vybrána při předchozím kroku atd. Výstupu byla dána tato omezení: 1. pomlky se ignorují (jako při analýze), 2. první nota taktu musí zaznít, 3. každé předvětí i závětí musí končit tečkovanou půlkou, 4. každý kus musí končit tónem C . Jestliže první náhodné číslo těmito omezením nevyhovovalo, nastoupila další náhodná čísla, jichž mohlo být až čtrnáct; nenašlo-li se mezi nimi ani jedno vyhovující, byla píseň anulována.

Aby písně dostaly rytmickou redundanci, použilo se tři typů metrického omezení.

Ze zhruba 6000 písní, které počítač začal vytvářet, bylo dokončeno 600. Tabulkami vykázané procento úplných písní vzhledem k řádu m analýzy-synthesy ukazuje, že čím vyšší je stupeň restrikce, tím menší je procento úspěchu.

Příklady 3 až 7 zobrazují syntetické výsledky užití markovovských řetězců. Jestliže $m = 1$, tj. použije-li se jednoduché pravděpodobnosti výskytu (příklad 3), je výstupní materiál nezpěvný a rozhodně nikoli podobný kostelní písní. Příklad obsahuje ve výstupu jediný akcidentál; akcidentály (křížky a bé) měly výskyt menší než jednoprocentní, měřeno časovým průběhem vstupních vzorků. Jestliže $m = 2$ (příklad 4), obsahuje výstupní materiál trigramy a postupy, které ve vstupu nebyly. Výstupní materiál pro $m = 4$ (příklad 5) je méně hrubý; jeho veliký rozsah do výšky i do hloubky je důsledkem původní transposice písní. Synthesa dosahuje střední base (middle ground), jestliže $m = 6$, neboť se vyhne všem třem potížím analýzy-synthesy (příklad 6). Jestliže $m = 8$, jsou některé z oktogramů identické s oktogramy vstupových vzorků. Implicitní struktura oktogramů je dost silná, aby udržela vstupní materiál stejný s výstupním i při omezení rytmické složky na pouhý skelet (příklad 7). Je tedy řád 8 pro synthesu už příliš vysoký.

Brooks činí závěr (1957, str. 182):

„Kdyby okolnosti byly ideální, nebylo by vlastně těchto experimentů zapotřebí. Mohli jsme zjistit a udat obsah informace vzorků a rozsah omezení hudební struktury, a z toho již bychom byli mohli předpovědět, že řád 1 a 2 markovovské analýzy-synthesy by nám vyprodukoval sledy, jež by jako kostelní melodie nebyly přijatelné a také to, že řád 8 analýzy-synthesy by vyprodukoval opět součásti vstupních vzorků.“

Velká neshoda mezi ideálním stavem a tím, který obvykle převládá, jen zdůrazňuje potřebu velkého množství teoretických i praktických výzkumů, které bude nutno udělat, než se induktivně-deduktivním procesům natolik porozumí, aby je bylo všeobecně možno užít při aplikacích, prováděných počítačemi stroji.“

Skladatelův pomocník

Olson a Belar (1961) naprogramovali počítač, jehož účel je „pomáhat skladateli tvořit novou hudbu tak, že navrhuje obměny, jakož i nové tónové kombinace, vycházející z původních skladatelových nápadů“. Do počítače vložili vhodně zakódované sledy not ze skladeb Stephena Fostera,⁸ které byly typické pro skladatelův styl; na jejich základě vybíral pak počítač nové obměny. To je příklad jednoduché analýzy-synthesy.

Elektronické kódování nově vytvořené hudby je převedeno do slyšitelných hudeb-

⁸ Stephen Collins Foster (1826–1864), americký skladatel lehčího zrna, autor mnoha populárních písní, z nichž některé zlidověly a dodnes intenzivně žijí v americkém lidu. (Pozn. překl.)

ních zvuků, aby si skladatel mohl vybírat, co mu vyhovuje. Tak je selektivnost počítače nahrazena selektivností člověka, aby se redundance výstupu zvýšila.

Zobecnění, která z toho plynou

Až dosud se analyticko-synthetické výzkumy obíraly výhradně melodií, která je abstrakcí ze soustavy kulturních znaků hudby, kterážto soustava sama je abstrakcí. Jelikož stupeň abstrakce je vysoký, neorientovaly se užitě metody směrem specificky hudebním: pomocí čísel zakódované noty by byly mohly být právě tak dobře barvami automobilů, projíždějících celnic.

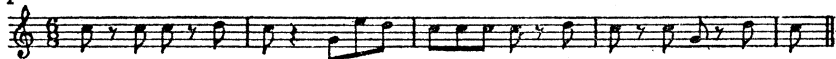
Melodická redundance, kterou představují jenom pravděpodobnosti přechodů not (bez udání hodnot trvání, pozn. překl.) sama o sobě nestačila učinit výstupní hodnoty srozumitelnými. Protože výstup byl vlastně nediferencovanou šňůrou not (neboť i vstup byl sotva něco víc), projevila se nezbytnost zavést pomocí metrických omezení rytmičkou redundanci.

Z výstupu nebylo vše klasifikováno jako „uspokojivé“. Ve skutečnosti bylo potřeba při všech zkoumáních výstupu víc výběrovosti než kolik tyto synthetické, mechanické postupy zdánlivě poskytovaly.

Z toho plyne, že byla požadována větší omezení, tj. vyšší redundance, než kolik pravděpodobnostní soustavy samy poskytly.

Na závěr uvedme, že nebylo nutné zavádět míry obsahu informace, i když jich Pinkerton (1956) a Olson s Belarem (1961) zevrubně použili. Na sdělovací proces je přece možno se dívat jako na pravděpodobnostní systém, jenž si některé z operačních technik teorie informací přizpůsobuje, aniž by aplikoval přísně vymezenou míru obsahu informace.

př. 1



př. 2



př. 3



př. 4



př. 5



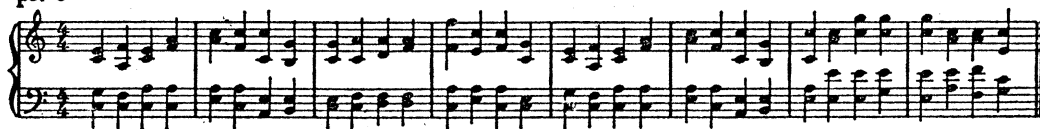
př. 6



př. 7



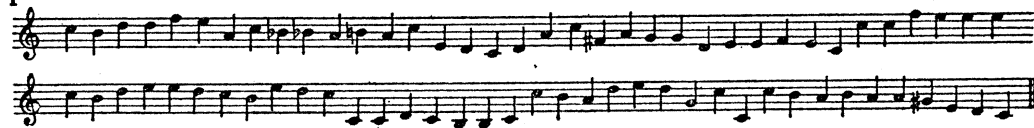
př. 8



př. 9



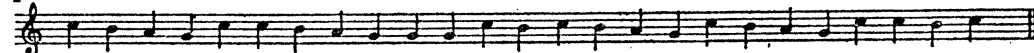
př. 10



př. 11



př. 12



Obr. 3. Příklady počítačem vyrobené hudby

Synthetické aplikace teorie informací na hudbu

Skladbu můžeme považovat za výběr přijatelných sledů z náhodného zdroje. Ježto v důsledku takového výběru je pravděpodobnost některých sledů (nebo tříd sledů) větší než jiných, plyne z toho, že na sledy ve skladbě se uvaluje redundance, vyjádřeno názvoslovím teorie informací.

Informace versus redundance

Mějme dvojpól. Na jednom konci jsou sledy s relativní informací (relativní nejistotou) jedna a s redundancí nula. Na druhém jsou sledy s nulovou relativní informací a stoprocentní redundancí. Sledy na prvním pólu jsou „šum“: jednak v technickém smyslu, neboť jakákoli frekvence libovolně dlouho trvajících zvuku se může vyskytnout tak často jako kterákoli jiná: jednak v hudebním smyslu, protože sledy nejsou

„uspořádaný“ a tudíž „nedávají smysl“. Sledy na druhém pólu jsou totálně organizovány: pro příjemce jsou to *m*-gramy takové délky, že z dalšího výstupního výkonu už nezíská žádnou informaci. Mezi těmito dvěma krajnostmi je kontinuum rostoucí redundance a klesající relativní entropie.

Většina hudební literatury je mezi těmito póly, některé skladby se však blíží krajnostem. Na několika příkladech ukážeme a zhodnotíme variabilitu souvztažnosti mezi uspořádaností a neuspořádaností.

Cage (1959) popsal postup kompozice některých svých nedávných klavírních děl, která mají krajní nulovou redundanci. Stránka se základními osnovami se narýsuje na průsvitném plastickém papíře. Náhodné operace, vzaté ze starodávné čínské knihy *I-Ťing* (Kniha proměn) určí, kolik zvuků připadne na stránku. Ty se označí tečkami na archu průsvitného papíru. Umístění not na archu závisí na vadách povrchu papíru samého. Průsvitný arch se položí na stránku se základními osnovami a notové hlavičky se napíše tam, kde jsou tužkové tečky. Bude-li notová hlavička černá nebo bílá řídí se podle toho, je-li pod tečkou notová osnova či ne. O notových klíčích a jejich umístění v osnovách rozhodne osm hodů mincí. Náhodné operace také rozhodnou, které noty se hrají normálně, které se mají hrát (také na klávesnici), zatímco příslušné struny jsou tlumeny uvnitř klavíru rukou, a které mají být vyluzovány drnkáním na vnitřních strunách klavíru. Podobné náhodné operace určí, zda bude ta která nota mít předznamenán křížek, bé či odrážku.

„Tyto skladby sestávají ze dvou skupin po šestnácti kusech (21–36; 37–52), které je možno hrát jednotlivě nebo současně, a to buď s kusy, nazvanými *Music for Piano 4–19*, nebo bez nich. Jejich provozovací čas je libovolný; mohou mezi nimi být přestávky, ale mohou se též hrát *attaca*; mohou se hrát také tak, že než předchozí kus skončí, začne další. Mohou být také naprogramovány časově, takže pianisté si mohou udělat propočty, aby jimi vyplnili celý koncert. Trvání jednotlivých tónů a dynamika jsou libovolné.“ (Cage, 1959, str. 43.)

I když skladebné metody Cageovy jsou minimálně selektivní, jeho výstupní materiál nemá nulovou redundanci, protože se omezuje na rovnoměrně temperovanou škálu, již lze vypsát na osnově notového papíru a reprodukovat na klavíru.

Pokud jde o druhou krajnost, zkomponoval Cage též kus se stoprocentně redundantní vnitřní strukturou, zvaný „4'44''“. Sestává ze čtyř minut a čtyřiačtyřiceti vteřin ticha (Hiller, 1959, str. 112–113). Jelikož množina možných jevů ve skladbě 4'44'' má jen jedno písmeno (totiž „jednotku ticha“), neustálé opakování tohoto písmene neposkytuje další informaci, takže redundance činí 100 %. (Uvážíme-li ale hudební zkušenost, kterou většina posluchačů do 4'44'' vnese, je nicméně značně nepravděpodobné, že by pojímali tak dlouhé ticho jako sled hudebních jevů; nazíráme-li na kus v širší souvislosti, je vysoce informativní. Viz dále kritické zhodnocení.)

Hudba „totálně organizovaná“, kterou dělá jedna soudobá komposiční škola, by měla teoreticky mít také 100% redundanci (Rochberg, 1960). Celek takové kompozice je v teorii odvozen z neustálého opakování jedné permutace prvních dvanácti přirozených čísel, jež jsou přiřazena jednak dvanácti tónům chromatické stupnice, jednak stupňům dynamiky, jednak délkám trvání noty atd. Kdyby bylo možno dosáhnout cíle zakódováním not dynamických stupňů, temp, délek atd. ve formě dedekagramů (12-gramů), byly by totálně organizované skladby též totálně redundantní, alespoň v oboru kulturní znakové soustavy. Avšak nedostatek redundance na jiných řádově stavebních stupních než 12-gramech z nich obyčejně činí skladby nadměrně informativní.

Synthetické experimenty

Tyto experimenty vědomě užívají teorie informací.

Hiller a Isaacson (1959, str. 56—57) sdělují, že Caplin zakódoval počítači program Mozartovy *Hudební hry v kostky* (*Musikalisches Würfelspiel*, Köchel, 1947, str. 909).

Bolitho s Kleinem dali počítači Datatron program, podle kterého psal jak rytmus, tak melodie populárních písniček (Burroughs Corp. 1956). Třebaže jedna píseň Datatronu, *Push-Button Bertha* (*Zmáčkni knoflík Bertičko*), byla otextována a vysílána rozhlasem, bylo od záměru upuštěno (Hiller a Isaacson, 1959, str. 56).

Menší projekty v komputátorové synthese hudby, jež provedli Guttman a Plyter (Hiller a Isaacson, 1959, str. 57; Anon. 1960), jsou významné tím, že počítače také skladby provedly.

Jiný experiment, totiž složit hudbu pomocí vytvoření stochastického zdroje, provedli Pierce (1956a) a Shannon. Pořídili seznam „dovolených“ akordů na základních tónech od tóniky (I) do šestého stupně (VI) v tónině C a sestrojili tři speciální kostky. Vrháním kostek při použití tabulky náhodných čísel selektovali sledy akordů. Uvalili omezení, že každé dva sousední akordy musí mít společný (zadržžený) tón v jednom hlasu.

Úmyslně zvolili redundantní rytmickou strukturu podobnou té, jež se užívá v začátečnických příkladech nauky o harmonii.

Vyprodukovali tři akordické sledy, každý o osmi taktech. Příklad 8 (Pierce, 1956a, str. 271) je prvním z nich. Rozpoznávací charakteristikou sledů je to, že hlasy mají snahu buď zůstat na jedné notě, nebo nevázaně skákat, nehledě na neustálé znásilňování „pravidel“ hudební teorie. Pierce říká (str. 273): „Jako hudební kritik bych je shledal spíš příjemnými než hlubokými. Nejsou tak nudné jako chudinky kostelní písně (hymns), ale jsou značně pod bachovskou úrovní.“

Pierce (1956b) nás také zpravil o pokusu, který učinil Slepian. „Ze skupiny lidí (tak) každý dostal úkol něco přičinit ke „skladbě“, z níž si předtím prohlédl ne více než předcházející takt.“

Suita Illiac pro smyčcové kvarteto

Až dosud nejmělejší a široce pojaté užití teorie informací je série experimentů, kterou provedli Hiller a Isaacson s počítačem Illiac (1959, Hiller, 1959; Anon., 1956; Mc Kay, 1959; Livant, 1961). Vytřídění pokusů bylo uveřejněno jako čtyřvětá skladba ve formě partitury *Suity Illiac pro smyčcové kvarteto*.

První experiment ukázal, že takový počítač může produkovat hudbu v komplexním, avšak zákonitostem odpovídajícím slohu palestrinovského kontrapunktu. (Palestrina žil 1526—1594.) Při pokusu byla počítači dána pravidla „vokálního“ kontrapunktu základního druhu (nota proti notě, dvě proti jedné atd.). K vytváření jednoduchých melodií (cantus firmus) užito metody Monte Carlo. Canti firmi měly délky od tří not do dvanácti.

Pak byla zavedena pravidla, omezující vztahy mezi notami současně zaznívajících, tj. pravidla, omezující „vertikální“ vztahy a stroj vytvářel dvojhlasý kontrapunkt. Poté byl vložen soubor pravidel závěrových. Byly vytvořeny příklady všech délek, od třínotových po dvanáctinotové.

Program komputátoru byl pak rozšířen na základní kontrapunkt čtyřhlasý. Ačkoli se tím staly přípustnými kvartsextakordy a sextakordy sedmého stupně, zvýšená vzájemná „činnost“ mezi čtyřmi hlasy vedla k většímu počtu nesprávností

v začatých příkladech. Byl tedy zaveden složitější soubor závěrových pravidel a vytvořeny vzorky všech uvedených délek.

Pro druhý pokus byl napsán nový program, obsahující všech čtrnáct pravidel přísného kontrapunktu XVI. století.

Tato pravidla si však (u počítače) vyžádala uvalení dalších četných omezení. „Celkový počet jednotlivých aritmetických instrukcí, jež si tento program přísného kontrapunktu vyžádal, přesahoval 1900 individuálních operací“ (Hiller a Isaacson, 1959, str. 110).

Na základě tohoto programu vytvářel počítač „kontrapunkt slušné kvality, připomínající silně pasáže z Palestriny, odhlédneme-li ovšem od jisté jednotvárnosti rytmické“ (Hiller, 1959, str. 114). Pak byla pravidla postupně z programu odstraňována, až počítač začal vytvářet náhodné postupy v „celých“ notách. Výsledky pokusu byly pak uvedeny do opačného pořádku. Postupuje tudíž druhá věta *Suity Illiac* od náhodně generované diatonické hudby k hudbě, která je výsledkem úplného (nerestringovaného) programu.

Ve třetím pokusu byl program počítače změněn v tom smyslu, že se dbalo na složky rytmickou, dynamickou a orchestrální právě tak jako na stylovou složku, jež měla zvýšenou měrou vyhovovat současnosti. Byla zavedena horizontální rytmická redundance a vertikální redundance tím, že se generovala čtyřciferná čísla v dvojkové soustavě. „0000 zde znamenalo, že všechny čtyři hlasy budou rytmicky nezávislé, 1111 si žádalo ve všech hlasech stejný rytmus...“ (Hiller, 1959, str. 117). Zakódovaly se stupně dynamiky či hlasitosti. Pomocí náhodných čísel bylo vybíráno crescendo, diminuendo, nebo neměnní se dynamika. Vertikální a horizontální redundance byla zavedena pro dynamiku i pro rytmus, ale bez korelace mezi kódem rytmiky a dynamiky. Způsob provádění skladby byl zakódován tak, že experimentátoři očíslovali šestnáct nejobvyklejších způsobů hry na strunné nástroje a pak se generoval sled náhodných čísel mezi nulou a patnácti včetně.

Noty byly v třetím pokusu vybírány prostě náhodným procesem. Abecedou byla spíše chromatická než diatonická škála. Naprosté upuštění od omezení dalo každé z not maximální obsah informace. Pak byla zakódována čtyři omezující pravidla.

Pokud se slohu týče, „podobaly se úseky, vytvořené náhodně bez omezení, extrémnějším snahám moderních avantgardních skladatelů, zatímco ostatní, redundantnější části připomínaly úryvky z takového Bartókova snyčcového kvartetu“ (Hiller, 1959, str. 117).

Posléze byly generovány a jako kóda k třetí větě připojeny tónové řady podle formulací Schönbergových, intervalové řady, jakož i restringovaná forma tónové řady (Hiller-Isaacson, 1959, str. 124–131).

Ve čtvrtém pokusu byl uveden „nový“ formový princip, produkující „hudbu z markovovských řetězců“, tj. hudbu, v níž pravděpodobnosti následných not závisely na předcházejících. V prvních třech pokusech byl výstupní materiál také hudbou z markovovských řetězců, ale pravděpodobnosti byly buď nulové (pro zakázaný sled), nebo stejné pro všechny přípustné volby (náhodný výběr). V tomto pokusu byly hudebním intervalům přiřčeny dvě pravděpodobnostní funkce. 1. Harmonická funkce zvyšovala pravděpodobnosti těch intervalů, které ustavují tonalitu. Jako nejpravděpodobnější byl určen jednozvuk (souzvuk v primě, unisono), hned za ním oktáva, pak interval kvinty, tercie a tak dále. 2. Proximitní funkce byla volena tak, aby bylo nejpravděpodobnější unisono, pak malá sekunda, jako třetí pak velká sekunda atd.

Třetí funkce pro pravděpodobnosti intervalů byla sestavena přidáním funkcí harmonické a proximitní pro každý interval. Pak byla produkována hudba z markovovských řetězců nultého až třetího řádu. (Hiller a Isaacson se bohužel mylili ve věci definice řádu markovovského řetězce;⁹ řetězec, jemuž připisují druhý řád je ve skutečnosti řetězec řádu třetího.) Nakonec byla vytvořena jednoduchá uzavřená vazba tím, že pravděpodobnosti markovovských řetězců účinkovaly na těžkých dobách taktu. Tím se zvětšila časová délka, na kterou působila omezení vyplývající z markovovských řetězců. Vytvořené sledy byly jednohlasé, byly však přepsány do čtyřhlasé partitury, aby partitura obsahovala co nejvíce možných výsledků pokusu.

Zobecnění, která z toho plynou

Synthetické aplikace teorie informací na hudbu jsou ve skutečnosti speciálním případem všeobecného analyticko-synthetického procesu (obr. 2). Ve všech synthetických pokusech vyjma poslední dvě věty *Suity Illiac* vyprodukovala člověkem provedená analýza existujících hudebních vzorků soustavu pravidel a omezení (G). V posledních dvou větách *Suity Illiac* dali sami experimentátoři stroji pravidla, která vymysleli.

Těmto dvěma metodám, jimiž lze dojít k množině generalisací G , odpovídají dvě funkce, jež může dát synthetický výstup. Vytvářený sled, jehož zdrojem je soubor pravidel se známou strukturou, může být přirovnán k vzorům hudební literatury, které byly analysovány. Takové srovnávání by umožnilo např. rozhodnout, které místo Palestrinova motetu sleduje pouze formalisovaná pravidla a které místo bychom mohli označit jako výkon „lidského prvku“.

Je-li G určeno libovolně, může nám výstup ukázat, co pravidla G znamenají v hudebním výrazivu. Hiller a Isaacson (1959) upozornili na jednu výhodu užití počítače k vytváření výstupního materiálu podle nových pravidel, totiž že počítač nemá návyky a předsudky, jež by vyplývaly z jeho předchozího studia. Komputátor opravdu není o nic selektivnější než pravidla, která mu dáme.

Hlavní výsledek, týkající se stupně restrikce pravidel (G) a slohu výstupního materiálu, popisují Hiller a Isaacson (1959, str. 160–161) takto:

„... Jednoduchost slohu a z ní plynoucí přístupnost má *převrácený* vztah k volnosti výběru. Nejjednodušší sloh vyžaduje ta nejpřísnější omezení a má nejvyšší stupeň redundance. Na druhé straně ovšem nebývají jednodušší slohy nutně nejsnadnější pro komponování, neboť snadnost svobodnějšího výběru nejlepších možností z mnoha po ruce jsoucích, pokud jde o rozsáhlé struktury, je vyvážena faktem, že mnohé z těchto možností jsou přípustny jen v omezeném rozsahu, aby byl zachován účín, který žádáme.“

Převrácený vztah mezi prostotou slohu a volností výběru je ověřen analytickými výzkumy.

⁹ Srovnejme práci Hillerovu a Isaacsonovu (1959, str. 142 a dále) se Shannonovou (1957, str. 10). (Pozn. aut.)

Analytické aplikace teorie informací na hudbu

Matematické analýsy hudby

Matematické analýsy soustavy kulturních znaků hudby můžeme sledovat při nejmenším až k francouzskému skladateli Rameauovi (1722). Při formulaci svých nových harmonických teorií řekl:

„Hudba je věda, jež by měla mít jistá pravidla; tato pravidla by měla být odvozena z principu, jenž sám o sobě je zřejmý; takový princip nám sotva bude možno poznat bez pomoci matematiky.“ (Rameau, 1722, str. 565–6.)

Weyl (1956) ve své matematické rozpravě o symetrii poznamenává, že Speiser se pokusil aplikovat zásady kombinatoriky matematického rázu na formální problémy hudby. Speiser analysoval Beethovenovu *Pastorální sonátu* pro klavír op. 28; zmiňuje se také o Lorenzových zkoumáních formální struktury stěžejních děl Richarda Wagnera. Hlavním matematickým nástrojem, jehož užíli, byla zřejmě teorie grup.

Pozdější analýsy byly statistické. Zipf (1949, str. 136) psal o analýze sólového partu Mozartova fagotového koncertu *B dur*. Našel lineární inverzní vztah mezi četností výskytu intervalu a jeho velikostí, a to pro stoupající interval, klesající interval a pro oba typy kombinovaně. Menší intervaly byly pravděpodobnější než větší. Tatáž rozdělení byla, zhruba vzato, nalezena v mnohem kratší (797 not) *Etudě f moll* op. 25 č. 2 od Chopina, ve šlágru Irvinga Berlina *Doing what comes naturally* a v písničce *Who* Jeroma Kerna. (U nás otextovali V+W pod názvem *Kdo?* J. R.) Takové výsledky pokusů se blíží rozdělení intervalů, jaké dává proximitní funkce v markovovské hudbě Hillerově-Isaacsonově (pokus 4). Quastler (1955a, str. 168) komentuje Zipfovy výsledky:

„Je to rozdělení délek volných stezek mezi náhodnými kolísemi; takto bychom dosáhli stejného rozdělení, kdybychom střídavě prováděli pohyb nahoru a dolů nad klaviaturou a kdybychom se při mýjení každé klávesy dotázali nějakého náhodného zdroje s konstantní pravděpodobností, máme-li ji stisknout. Tato metoda nám dá správné rozdělení četností výskytu, ale správnou hudbu sotva.“

Fucks studoval formální strukturu (tj. kulturní soustavu znaků) Palestrinovy *Missy Papae Marcelli* a Brucknerovy *Mše e moll*. Jeho první výsledky dávají mezi jinými funkcí, udávající odlišné hodnoty pro díla Palestrinova vzhledem k Brucknerovým, takže se mohou uplatnit jako slohové kritérium.

Albrecht (1956) praví: „Doufám, že posléze odvodím až dosud čistě empirické zákony harmonie a kontrapunktu jako zákony, jež vyvinuli Palestrina a Bach.“ Schillinger (1948) podává výsledky statistických analýz v knize *Mathematical Basis of the Arts*.

Analytické aplikace, jež následují, shromažďují údaje a aplikují dané vzorce teorie informací.

Sloh jako informace

Youngblood¹⁰ (1960) se pokusil prozkoumat „užitečnost teorie informací jakožto

¹⁰ Youngblood revidoval a rozšířil svou původní práci (1958) ve své disertaci. Ježto čísla, jež ve své disertaci udává, jsou jediné správná (dle dopisu Dr. Youngblooda Cohenovi z 15. března 1961), budou též jediné ona a z nich vyplývající výsledky brány zde v potaz.

Nevydané disertace Youngbloodovy a Brawleyovy tu probírám ze široka, neboť snaha o jejich získání by mohla narazit u zájemce na obtíže (pozn. aut.).

metody určování a definování hudebních slohů“. Hudební sloh můžeme považovat za pravděpodobnostní systém, který, jak Youngblood praví, musí být stacionární: „...aby se hudební sloh stal něčím víc než stochastickým (stacionárním), bylo by třeba obrovského množství obměn, neboť je to právě ona veliká stejnorodost, která způsobuje, že jej rozeznáváme jakožto sloh“ (str. 14). Teorie informací můžeme použít k „měření omezení, za kterých rozliční skladatelé a skupiny skladatelů pracovali, a může nám opatřit čísla, jimiž můžeme přesněji a výstižněji tyto slohy popsat“ (str. 18).

Youngblood vybral sadu romantických písní v durových tóninách, sestávající z osmi písní ze Schubertova cyklu *Krásná mlynářka*, ze šesti árií z Mendelssohnova oratoria *Paulus* a ze šesti písní ze Schumannova cyklu *Láska a život ženy*.

Napřed našel Youngblood přibližnou pravděpodobnost výskytu každé z dvanácti not chromatické škály pro každého ze skladatelů. Spočítal pro každého skladatele obsah informace řádu jedna podle rovnice (1) a první řád redundance ($\%R_1$) podle rovnice (3). Z aproximace kumulativních pravděpodobností pro celý vzorek vypočetl kumulativní redundanci řádu jedna.

Za druhé Youngblood spočítal četnost každé následné dvojice tónů pro každého skladatele a redundanci dvojic tónů [$\%R(i, j)$]. Pomocí rovnice (2) vypočetl informaci, získanou z j , daného i (H_2) a R_2 následovalo ihned z rovnice (3). Hledané redundance jsou (str. 34):

Tabulka 1
Redundance romantické hudby

Skladatel	$\% R_1$	$\% R(i, j)$	$\% R_2$
Schubert	12,5	20,4	35,6
Mendelssohn	14,9	24,0	43,5
Schumann	14,7	22,4	37,3
kumulovaný výsledek	13,4	20,5	29,2

U Mendelssohna se chromatické tóny vyskytly mnohem méně často než u Schumanna. Je tedy Mendelssohn redundantnější. U Schuberta je poměrně malou redundancí nutno přičíst spíše modulacím než chromatické volnosti.

„Ačkoli byli skoro současníci, jsou Schubert, Mendelssohn a Schumann slohově odlišní. Že čísla v této kapitole neukazují tuto rozdílnost jasně, je spíše znakem toho, že nebyli tak naprosto odlišní v melodice, než znakem nedostatků naší techniky postupu“ (str. 42).

Harmonická analýza by pravděpodobně některé z těchto odlišností objevila (srv. doleji kritiku).

Aby porovnal údaje o romantické hudbě s údaji o jiném slohu, analysoval Youngblood *Gloria*, *Sanctus* a *Agnus Dei* z první mše sváteční (*Liber Usualis*, str. 19–22) a *Kyrie* ze mše *Orbis Factor* (*Liber Usualis*, str. 46).

Pokud byl považován za sedminotovou soustavu, to jest za zdroj o pouze sedmi-písmenné abecedě, měl analysovaný gregoriánský zpěv velmi nízkou prvořádovou redundancí; avšak omezení na vztahy mezi notami mu dodalo vyšší druhořádovou redundancí, která však byla stále ještě nižší než redundance kteréhokoli ze zkoumaných romantiků. Ježto pro soudobého posluchače existuje teoreticky dvanáct mož-

ných kulturně významných tónů při libovolně zvoleném východisku, spočítal Youngblood redundanci gregoriánu jako by šlo o soustavu dvanáctitónovou. Výsledky byly tyto (str. 39, 42):

Tabulka 2

Redundance gregoriánského zpěvu

Gregoriánský zpěv	% R_1	% $R(i, j)$	% R_2
jako sedmitónový systém	3,2	23,9	28,8
jako dvanáctitónový systém	23,9	41,7	44,0

Z čísel je zřejmé, že gregoriánský zpěv jakožto dvanáctitónový systém je o něco redundantnější než kterýkoli ze tří zkoumaných romantiků, a značně redundantnější než celá trojice romantiků, vzata dohromady.

Hodnota této aplikace je v tom, že zjemňuje citlivost k slohovým rozdílům.

„Dnes může většina hudebníků buď intuitivně nebo na základě určitých ne zcela přesných všeobecně identifikovat aspoň pět či šest historických slohů. Avšak zdá se, že by bylo zajisté užitečné nalézt prostředky k identifikaci a kvantifikaci charakteristických rysů slohů, právě tak jako měřit rozdíly mezi nimi, kdyby pro nic jiného, tak proto, abychom si opatřili základnu pro porozumění a hodnocení soudobé hudby“ (Youngblood, 1958, str. 31).

Pravděpodobnosti mohou určovat stochastický zdroj, jenž se může přibližně srovnávat se strukturou zdroje, který vytvořil vzorek. Abych mohl srovnat strukturu zdroje, definovaného pravděpodobnostmi, se strukturou skutečného zdroje, tj. skladatele, aplikoval jsem na pravděpodobnosti metodu Monte Carlo. Nejdřív jsem sestrojil „mapu“, rozdělující čísla od 000 do 999 podle jednoduchých pravděpodobností not z Mendelssohna. Pomocí tabulky náhodných čísel jsem vytvořil sled 56 not (příklad 9), který je zajisté až příliš chaotický a neuspořádaný, než aby to byl Mendelssohn.

Pak jsem sestrojil 12 „map“ podle Mendelssohnových pravděpodobností přechodů z každé noty a vytvořil opět sled (příklad 10). V příkladech 9 a 10 jsem dodal několik obměn v oktávě. Příklad 10 nemá žádnou podobnost s Mendelssohnem; dodáme-li ale rytmickou rozmanitost a metrum (příklad 11), dostanou některé části docela melodický ráz.

Uvědomiv si, že uvalením další redundance na mendelssohnovské pravděpodobnosti se zvýšil účinek, vybral jsem úmyslně dva nebo tři nejpravděpodobnější přechody z každé noty a sestrojil sítě, podobnou Pinkertonově (1956). Příklad 12 je vzorkem jejího výstupu.

Na základě analyticko-synthetických výsledků Brooksových (1957) je možno důvodně se domnívat, že k definování zdroje, jenž bude generovat přijatelné mendelssohnovské melodie, by bylo nutno použít analýsy řádu nejméně dvojnásobného, než použil Youngblood (1960). Na druhé straně poukázal Youngblood na to, že je možná spíše nutno změnit typ analýsy než její řád. [Jako jednu z možností navrhuje postup, který použil Yngve (1956). Srv. níže komentáře k Chomskému.]

Obsah informace rock and rollu

K analýze melodických linek písniček *Hound Dog* a *Don't Be Cruel* jsem použil Youngbloodova postupu zčásti proto, abych mohl výsledky srovnat s Youngbloodo-

vými čísly, zčásti pak proto, že o tento druh hudby je spontánní zájem. Písně byly ztransponovány do jedné tóniny. Tabulka 3 ukazuje četnosti výskytu tónů u jednotlivých písní a četnosti sloučené.

Tabulka 3
Četnosti výskytu not rock and rollu

Nota	Hound Dog	Don't Be Cruel	sloučeno
I	40	39	79
II	0	0	0
III	40	18	58
IV	84	0	84
V	0	19	19
VI	0	0	0
VII	0	0	0
VIII	4	48	52
IX	0	0	0
X	4	83	87
XI	0	0	0
XII	0	17	17
Celkem	172	224	396

Tabulka 4 ukazuje průměrný obsah informace na notu a redundanci pro sled jakožto soustavu sedmitónovou a dvanáctitónovou, a to pro každou z písní i pro celý vzorek. Třebaže melodie písně *Hound Dog* má v celku pět odlišných not a *Don't Be Cruel* šest, ve vzorku jako celku je uvedeno not sedm. Z toho plyne, že redundance celého vzorku je nižší než redundance každého jednotlivého kousku.

Tabulka 4
Obsah informace a redundance rock and rollu

	Hound Dog	Don't Be Cruel	sloučeně
Obsah informace v bitech (na notu)	1,73	2,32	2,61
Redundance (% R_1)			
7-tónová soustava	38,2	17,2	6,9
12-tónová soustava	51,6	35,2	27,1

Množství práce, které mimochodem řečeno, dala tato analýsa a syntéza na základě čísel Youngbloodových, přímo volá po použití počítače. Rozsah analysovaného vzorku je zřejmě příliš malý, než aby dovolil nějaké generalisace o rock and rollové hudbě jako celku, avak čísla, jichž jsme dosáhli, nejsou aspoň v rozporu s tím, co bychom intuitivně čekali. Analýsa vyšších řádů by dala ještě větší redundanci, neboť množství přípustných sledů je velmi omezeno.

Rytmické slohy

Brawleyova analýsa rytmu (1959, str. 3), právě tak jako Youngbloodova analýsa melodie (1960) jeví zájem „ani ne tak o popis individuálních slohů, jako spíše o průzkum možností metody, jež by užila teorie informací jako nástroje popisu slohů“. Dva základní předpoklady: hudební rytmus je diskrétní systém sdělování; hudební sloh je ergodický stochastický proces, jenž má strukturu stacionárního markovovského řetězce.

Hlavní problém rytmické analýsy je určit, z čeho sestávají písmena tohoto diskrétního (nespojitého) systému. „.....při vnímání jevů v čase jsou tyto jevy seskupeny v uspořádaná schémata“ (Brawley, 1959, str. 19). Z toho činí Brawley závěr (1959, str. 20):

„Ať už jsou tato seskupení pravidelná čili nic, určíme seskupení jakéhokoli počtu nepřívzvučných rázů (dob) s jediným rázem přízvukným jako jeden ze základních principů této stati. Abychom to přesněji vymezili: bude to základ pro určování délky primárních, elementárních symbolů našeho diskrétního systému, to znamená délky jednotlivé rytmické jednotky, čili rytmu.“

Při určování rytmických seskupení hraje důležitou roli tempo. Je zřejmé, že rytmus provádějí svaly (jinými slovy, provádění rytmu je činnost kinestetická). Z toho plyne, že tempo rytmické produkce je omezeno možnostmi svalů; kinestésie je zřejmě nutná též k tomu, aby mohl existovat rytmický vněm. „Uvědoměná přítomnost“ řádu trvání jedné a půl vteřiny je také limitem trvání rytmického seskupení (str. 24).

Při řešení problémů určování krajních tempových hodnot, mezi nimiž pocítujeme jeden tep jako jednu dobu, rozhoduje se Brawley pro rozsah 60–120 M. M., tj. pro tempo s jedním nebo dvěma rázy za sekundu. Mezní hodnoty tohoto rozsahu jsou pohyblivé, např. 128 M. M. se nemusí nutně měnit v 64 M. M. (str. 26).

Brawley analysoval Bachovu dvojhlasou invenci č. 14, obvykle hrávanou v tempu cca 68–72 M. M. Zaznamenal si z ní každé rytmické seskupení, jeho četnost výskytu a jeho relativní četnost (pravděpodobnost). V úvahu přišly oba hlasy invence, avšak větší přednost dána svrchnímu; spodní hlas byl analysován tehdy, když svrchní měl pausy. Osm nalezených rytmických seskupení mělo průměrný obsah informace 2,6 bitů a redundanci $R_1 = 13,1$ %. Matice pravděpodobnostních přechodů řádu 1 měla redundanci 15 %.

Avšak Brawley poznamenává: „Mělo by být zřejmé, že tato analýsa, používající teorie informací, nemá valnou cenu“ (str. 33). Na základě této analýsy není možno zevšeobecňovat, protože rozsah vzorku je příliš omezený; je zapotřebí obsáhlejšího vzorku.

Pro tříhlasé organum *Hec dies* ve stylu Perotinově (rané 12. století) byla spočítána redundance (asi R_1) na 25,8 %. „Mohli bychom vlastně očekávat dokonce ještě vyšší redundanci, ale používání prominatnějších (sic) seskupení v množstvích, jež jsou si celkem rovna, a zahrnování celé řady seskupení, vyskytnuvších se jednou či dvakrát, zabraňuje, aby se objevila vyšší redundance“ (str. 34). Rozvoj rytmické volnosti v době Petra z Kříže (Petrus de Cruce) se odrazila v jeho jediném motetu *Acun-Loncans-Annuntiantes*, který má redundanci pouze 15 %.

Polyfonie 14. století se vyznačovala velkou rytmickou svobodou. Analýsa dvou badlad Matouše Perusijského (Matheus de Perusio) dává redundanci 8,9 %.

Rytmická analýsa prvé věty Schönbergova čtvrtého smyčcového kvartetu, kde bylo užito pokynů, vepsaných v partituře, jako prostředku napomáhajícího určení skupin, dala redundanci 6,4 %. Naproti tomu analysované úseky z díla *Verklärte*

Nacht, komponované ještě v době, kdy Schönberg byl pod vlivem romantiků, měla redundanci 18,8 %.

Aby mohl učinit srovnání s Youngbloodovými čísly (1958) pro melodickou redundanci, analysoval Brawley (1959) tři Schubertovy a tři Mendelssohnovy písně. Schubertovy měly redundanci 5,7 %, Mendelssohnovy 19,6 %. „Jedna z hlavních příčin toho, že dosažené hodnoty jsou tak nízké, pochází z textových požadavků (sic), kladených na analysované písně“ (str. 17). Analýza tří písní Brahmových dává redundanci 16,3 %; společně četnosti pro všechny tři skladatele dávají 15,7 % redundance, což je možná významné číslo pro popis slohu německé písně devatenáctého věku. „A docela jasný důvod, že se rytmus sděluje navzdory nedostatku rytmické rozmanitosti, je v tom, že jej nevyhnutelně slyšíme ne prostě ve vztahu k sobě samému, nýbrž ve vztahu k slohu, jemuž náleží“ (str. 39).

Nakonec vybral Brawley rozsáhlou, ale uzavřenou sadu literatury pro svou analýsu, a to menuety Mozartových smyčcových kvartetů. Jako rytmická grupa (seskupení) zvolena délka jednoho taktu (tři doby). Analysována asi třetina celkového počtu taktů. Sedmdesát sedm nalezených rytmů (str. 55–60) mělo redundanci 19,4 %. Převážné užití pouze několika rytmů neguje však dojem rozmanitosti, kterou ukazuje číslo.

Matice pravděpodobností přechodů pro dvacet nejčastěji se vyskytнувších rytmů ukazuje, že několik z těchto rytmů jeví tendenci bezprostředně se znovu opakovat.

Nejnovější výzkumy

Na Illinoiské universitě jsou v běhu některé analytické aplikace teorie informací na hudbu.¹¹ Beau dokončuje analýsu čtyř vět ze sonát Mozartovy, Beethovenovy, Hindemithovy a Bergovy.¹² Na podzim r. 1961 mají být dokončeny Fullerova analýsa Weberovy Symfonie op. 21 a Bakerovy výzkumy počítačové komposice. Poslední práce přenáší informační teorii hudby o celý okruh výzkumů zpět k analytickému zkoumání otázky, co vlastně v podstatě analytické zkoumání je.

Zobecnění, která z toho plynou

Analytická, tak jako syntetická zkoumání jsou speciální případy analyticko-syntetického procesu. Jejich cílem je obdržet soubor zevšeobecnění (množinu generalisací) charakterisujících vzorek.

Nejdříve bylo nutno zavést abecedu. Abecedy až dosud volené sestávaly z minimálních kulturně významných prvků hudby. Budoucí výzkumy si musí zvolit abecedy s písmeny o větším rozsahu, až architektonická úroveň analysované látky bude vyšší.

Analýsy sestávaly z nalezení redundance prvního a druhého řádu pro rozličné vzorky slohově homogenní hudby. Aspekty hudby, která byla předmětem zkoumání, byly pečlivě odmyšleny od skladby jako celku; partitura nebyla nikdy uvažována jako celek. Rozličná čísla udávající redundanci byla srovnávána a shledalo se, že potvrzují předtím už existující domněnky o relativních stupních řádu analysovaných vzorků. Nález syntetických výzkumů, že přístupnost slohu se mění v převráceném

¹¹ Dopis Dr. L. A. Hillera z 30. prosince 1960. (Pozn. aut.)

¹² Výsledky těchto analys předváděl prof. Hiller na své přednášce v pražském Mozarteu v srpnu 1963. (Pozn. překl.)

poměru k volnosti výběru neboli výši obsahu informace, byl tím jakožto názor podpořen.

Autoři analys se domnívají, že jejich čísla pro redundanci určitým způsobem popisují posluchačův dojem ze vzorku, který byl podkladem pro údaje. Domnívají se, že posluchač shledává monotonní skladbu, jejíž redundance přesahuje určitou úroveň, a skladbu s nízkou redundancí že shledává chaotickou.

Kritika

Pokud jde o kritiku, můžeme výhodně rozdělit teorii informací hudby, o níž jsme referovali, na dvě části (obr. 2). Analýsa užívá teorii informací, aby obdržela soubor generalisací, týkající se daného vzorku hudby. Synthesa užívá teorie informací k vytváření hudby na základě daného souboru generalisací nebo na základě pravidel.

Kritika syntetických výzkumů sestává hlavně z přehledky vyprodukovaného výstupního materiálu. Kritika analytických výzkumů sestává hlavně z kontroly předpokladů, na nichž jsou založeny.

Syntetické výzkumy

Ze syntetických pokusů nezešlo nic, co by mělo valnou hudební hodnotu. Tento fakt není ani tak útokem na experimenty, jako spíše uznáním skutečnosti, že jejich cílem je porozumět mechanismu komponování pomocí vytváření modelů skladebného procesu. Výstup by se měl zlepšovat v důsledku zlepšených modelů.

Může to konečně být i tak, že teorie informací je v podstatě neschopna opatřit model skladebného procesu. Livant (1961) zdůraznil, že Chomského (1956) důkaz nedostatečnosti markovovských zdrojů pro vytváření jistých tříd sledů se může vztahovat přímo na hudbu. Chomsky ukazuje, že markovovský zdroj nemůže generovat třídu všech sledů, v nichž druhá půle je zrcadlovým obrazem první nebo jejím přesným opakováním; všeobecně vzato ukazuje, že markovovský zdroj je neschopen vytvářet samoobsažné (self-imbedded) struktury. Hudba nerapsodická či bez improvisačního rázu je na takové samoobsažné struktury bohatá; vezměme fugu nebo nějakou skladbu seriální.

Základní zlepšení, které je žádoucí, spočívá ve zvýšené interakci mezi výstupem počítače a programem počítače, tj. jde o více zpětné vazby („feedback“) od výstupu ke zdroji. Skladatel nepoužívá v průběhu komponování stále tytéž sledy testů nebo výběrových operací. Jeho vnitřní „program“ se mění vlivem jeho předchozího výstupního materiálu. Počítač je schopen přizpůsobit svůj program svému výstupu pomocí příkazu, nalézajícího se v programu, jenž velí obejít určité přikázané postupy, jsou-li splněny jisté podmínky. Tento příkaz „obejít“ neboli kontingentované programování byl už použit v programech Hillerových-Isaacsonových (1959). K vytváření hudebních forem se samoobsažnými strukturami, jako je fuga nebo sonáta, bude třeba užít kontingentovaného programování mnohem častěji.

Též vzájemný vliv (interakci) programových složek je zapotřebí zvýšit. V programech počítačů byly dosud rytmické, interpretační a melodické programy navzájem nezávislé, kdežto při komponování na sebe rytmus, grafika (noty) a způsob interpretace navzájem působí. Různé tektonické úrovně musí dostat jedna na druhou vzá-

jemný vliv. Umístění v hudební větě nebo i v taktu, jak postřehl Pinkerton (1956), má vliv na pravděpodobnosti jednotlivých not.

Jeden z cenných výsledků syntetických zkoumání je pěkný výklad posluchačova cítění rozličných slohů. V partituru byla vyhledána nota, aby bylo definováno „pole volnosti“. Obdobně definují pole volnosti pravidla pro zdroj: jde o množinu sledů not s daným vztahem mezi redundancí a informací. Právě tak, jak posluchač vkládá soubor psychologických jevů do téhož pole volnosti, vkládá množinu sledů definovanou týmiž pravidly do daného pole volnosti. Existence takového způsobu vnímání je ve skutečnosti zřejmá, neboť řekneme-li, že dvě skladby jsou ve stejném slohu, znamená to, že jsou produkty stejného pravděpodobnostního systému.

Výhoda syntetických výzkumů oproti analytickým je, že jejich pracovní předpoklady jsou nutně co nejpřesnější ve formulaci, protože musí být vtěleny do programu počítače, aby měly účinek na výstup.

Analytické aplikace

Za výsledky analytických aplikací teorie informací na hudbu je mnoho explicitních i implicitních předpokladů. Předpoklady jsou, všeobecně vzato, dvojího druhu. Matematické hypotézy předpokládají, že soustava uvažovaných hudebních znaků vyhovuje požadavkům pro analytickou aplikaci kalkulu teorie informací. Estetické hypotézy předpokládají, že kalkul teorie informací se dá vhodným způsobem užít k tomu, aby něco říkal o hudbě. Matematické hypotézy závisí na estetických, neboť je-li kalkul nepřiměřený, není důvodné vyslovovat předem matematické hypotézy. Estetické hypotézy též závisí na matematických, neboť v případě, že by matematickým kritériím nevyhovovaly, byly by výsledky aplikování kalkulu bezcenné, bez ohledu na stupeň „vhodnosti“, který se teorie informací zdá mít. Jelikož se matematické a estetické předpoklady takto prostupují, je jejich rozdělení do dvou tříd více méně libovolné a můžeme při něm vycházet z předpokladů, které nám vyhovují.

Matematické předpoklady analýzy

Stochasticita. První předpoklad pro aplikaci teorie informací je, že zdroj je stochastický, tj., že se nemůže objevit písmeno, o němž by nebylo známo, že už je v abecedě. Pro soustavu kulturních znaků lze tento předpoklad snadno splnit tím, že do abecedy zahrneme veškerou možnou notaci, jež má kulturní význam. Pak mají neužitá písmena v každém vzorku, jenž nevyčerpává celou abecedu, nulovou pravděpodobnost. Tím se snadno vyhová předpokladu stochastičnosti.

Ergodicita. Druhý předpoklad je, že zdroj je ergodický, tj., že dostatečně dlouhý vzorek vzatý z nekonečného zdroje má stejnou statistickou strukturu jako nekonečný sled. Z tohoto předpokladu vyplývá, že všechny dostatečně dlouhé vzorky z daného sledu mají stejnou statistickou strukturu.

Abychom tuto hypotézu ověřili, předpokládejme, že existuje jakýsi nekonečný sled, generovaný abecedou soustavy kulturních znaků, a že veškerá existující hudba vyjádřená v soustavách kulturních znaků tvoří rozsáhlý vzorek. To není v rozporu s hypotézou, že ten rozsáhlý vzorek má stejnou statistickou strukturu jako onen nekonečný sled, neboť ten rozsáhlý vzorek je jediným dosažitelným dokladem onoho nekonečného sledu. Tato metoda ověřování předpokladu ergodicity je však bez užít-

A přece jeden z důvodů použité informační teorie byla především snaha obdržet parametr slohu.

Z toho vyplývá, že chceme-li mít užitečný ověřovací test ergodické hypotézy, musí rozsáhlý vzorek sestávat s homogenního souhrnu materiálu, o němž se můžeme domnívat, že reprezentuje zkoumaný sloh.

Nic nenavědčuje tomu, že by zdroj zmíněného souhrnu měl strukturu, jež by se od tohoto souhrnu lišila. Vzniká obtíž, že totiž libovolně vybraná část našeho souhrnu nemusí mít touž statistickou strukturu jako celek. V Youngbloodově analýze představoval každý ze zkoumaných skladatelů pravděpodobnostní systém odlišný od kumulovaného pravděpodobnostního systému. Tato obtíž se obchází jenom tak, že prostě řekneme, že díla kteréhokoli ze skladatelů nedávají „dostatečně rozsáhlý“ vzorek.

V tomto tvrzení je však bludný kruh, neboť pro rozhodnutí, zda daný souhrn je slohově homogenní či nikoli, jsme dosud nezískali jiné prostředky, než nám dává intuice. Pro takové rozhodnutí existují přinejmenším dvě metody. První je v tom, že sami vybereme souhrn hudebních kusů nebo písní a definujeme je v tom smyslu, že představují rozsáhlý zdrojový vzorek. Zřejmá nevýhoda této metody je, že i kusy, jejichž statistické struktury jsou značně nesourodé, mohou být definovány jako výstup téhož zdroje. Druhá metoda je v tom, že užijeme teorii informací za tím účelem, abychom získali parametr slohu (například v procentech redundance) a řekneme si, že daný rozsah hodnot parametru reprezentuje homogenitu (např. odchylka ± 5 procent od dané hodnoty redundance). Tato druhá metoda má zřejmě čáku na větší úspěch, pokud jde o nalezení parametru toho, co je uznáváno jako sloh; avšak metoda představuje opět bludný kruh, protože předpokládá, že teorii informací lze aplikovat na nerozsáhlé vzorky, ba snad i na jednotlivé hudební kousky.

Tento poslední předpoklad vyžaduje, aby nerozsáhlý vzorek byl stochastický, ergodický a stacionární (poslední z požadavků musí být teprve uvážen, pokud jde o rozsáhlý vzorek). Nerozsáhlý vzorek zřejmě stochastický je, pro což jsou stejné důvody, jaké můžeme vyvodit pro vzorek rozsáhlý, avšak jeho ergodicita je pochybná. Nerozsáhlý vzorek nemůže obsahovat dva rozsáhlé, jejichž statistické struktury bychom mohli srovnávat. Krom toho závisí pravděpodobnosti právě na vzorcích libovolně velikých. I když může být pohodlné přiřknout ergodicitu vzorku nerozsáhlému, výsledky založené na takovém předpokladu nemají pak přesně vyhovující hodnotu a musíme je považovat za hrubě přibližné.

Můžeme shrnout tvrzení, že soustava kulturních znaků hudby je ergodická. Veškerý souhrn existující hudby může sice být ergodický, ale tato skutečnost pro nás nemá význam, protože souhrn neposkytuje slohovou diferenciaci. O méně obsažných, avšak slohově homogenních celcích můžeme předpokládat, že ergodické jsou, avšak operativní definice jejich homogenity by spočívala na nerozsáhlých vzorcích, vybraných buď libovolně, nebo na základě hodnot parametrů slohů, vypočtených podle teorie informací. Poslední operativní definice homogenity předpokládá u nerozsáhlých vzorků ergodicitu, což nelze bez výhrad přijmout. Jediný další způsob, jak operativně definovat ve vzorku homogenitu je nalézt nějaký neintuitivní slohový parametr, nevycházející z teorie informací; avšak učiníme-li tak, porazíme si sami cíl, jímž přece byla především aplikace teorie informací.

Holá výslednice tohoto kritického zkoumání ergodické domněnky má za úkol ukázat na bludný kruh argumentů, například Youngbloodova, že totiž hudební sloh

musí být ergodický, protože jej jakožto sloh činí rozeznatelným právě homogenita.

Uzavřeli jsme cestu kritériím homogenity. Dovolíme-li kritéria intuitivní, pak můžeme ergodickou hypotézu uznat; avšak argumenty založené na intuitivních úvahách nepropůjčují výsledkům teorie mnoho věrohodnosti.

Stacionárnost. Třetí nutný předpoklad pro aplikaci teorie informací na rozsáhlý hudební vzorek je, že zdroj je stacionární, tj., že statistická struktura posloupnosti je nezávislá na čase, kdy pozorování posloupnosti (sledu) začíná. Právě tak jako dřívě, nemáme důkaz, jenž by tuto hypotézu vyvrátil, jestliže rozsáhlý vzorek sestává ze souhrnu veškeré hudby. Jsou-li rozsáhlé celky slohově homogenních hudebních kusů nějak určeny, pak hypotéza stacionárnosti předpokládá, že struktura jakéhokoli dlouhého sledu, vybraného z každého z celků, je stejná. Tuto hypotézu nemůžeme samozřejmě s patřičnou přísností ověřovat, protože takový celek je příliš málo rozsáhlý, aby nám opatřil několik „dostatečně dlouhých“ sledů, jež bychom mohli srovnávat. Například v takovém celku, jako je šest partit Bachova *Clavier-Übung*, jehož slohová homogenita je z intuice zřejmá, vyskytuje se mnoho sledů znakových symbolů pouze jedinkrát. Na základě jediného výskytu ale nejde pravdivě odhalovat relativní četnost. Pro ověřování hypotézy stacionárnosti není prostě k dispozici dost hudby.

Hypotéza stacionárnosti v průběhu jednoho daného hudebního kusu nemůže být vyhovujícím způsobem prokázána ze dvou příčin. Za první, jednotlivý kus je až příliš krátký, aby poskytl pravděpodobnosti pro předpokládaný zdroj. Za druhé, shledáme-li m -gramy o mnoho kratší než celý kus, dá se prostě ukázat, že relativní četnosti se mění v průběhu kusu. Například v sonátové větě mají první a poslední ze tří oddílů (exposice a reprisa) obvykle stejnou statistickou strukturu nebo jsou si aspoň strukturálně podobny, kdežto střední oddíl, provedení, je už intuitivně myšlen jako volnější (méně redundantní) než ostatní dva.

Všeobecně vzato: hypotéza stacionárnosti zůstává nejistou, protože k jejímu ověřování není dostatek homogenní hudby.

Markovovská konsistence. Čtvrtý předpoklad je, že zdroj je konsistentní vzhledem k svým markovovským vlastnostem, to jest, že podržuje v průběhu celého vzorku stejný řád m svých uspořádání. Chomsky (1956) ukázal obtíže, související s určením předpokládaného markovovského zdroje. Krom toho může na začátku kusu působit jen uspořádání nízkého řádu, kdežto na konci má už vliv na pravděpodobnosti do jisté míry všechno, co předcházelo.

Nekonečná paměťová kapacita. Pátý předpoklad je, že zakódovávající sledu hudebních jevů má nekonečnou paměťovou kapacitu. Hodnota H , číslo vyjádřené v binárních jednotkách, požadované pro zakódování písmene, vychází z optimálního, nejúčinnějšího kódu. Optimální kódování vyžaduje možnost neomezeného opoždění při zakódování a dekodování. Takové neomezené opožďování nemáme zřejmě k dispozici.

Quastler (1955c, str. 27) zkoumá otázku: „Nemáme-li k dispozici zásobník, dovolující neomezené opožďování, co pak?“ Používá techniky Fanovy (1949, 1950) shledává Quastler, že mají-li písmena vzájemně stejné pravděpodobnosti, pak „je zapotřebí při nejnevýhodnějších okolnostech zvýšit počet kódových symbolů na jev o 5,2 % oproti minimálnímu počtu, nemá-li být žádné opoždění. Je-li dovoleno kódovat shluky (clusters) dvou jevů, můžeme vždycky dosáhnout umístění v mezích tří procent optima“ (str. 28). Při binární volbě s nestejnými pravděpodobnostmi „po-

stačí malé zpoždění, dovolující tu a tam kódovat dva až tři jevy, aby umožnilo takřka dokonalou účinnost...“ (str. 29). V hudbě, pokud je kódovatelem lidský mozek, zabraňuje neomezenému zpoždování rozpětí lidské paměti.

Shrňme: matematické hypotézy analyzy říkají, že zdroj je: stochastický, ergodický, stacionární a vzhledem k svým markovovským vlastnostem konsistentní; a také že zakódovávající má nekonečnou paměťovou kapacitu. S výjimkou stochastické hypotézy je obtížné, a kdo ví zda možné, uznat je za platné na základě provedené analyzy hudebního vzorku.

Estetické předpoklady analyzy

Pravděpodobnost a to, co očekáváme. Z celé řady estetických předpokladů, učiněných při aplikaci teorie informací na analyzu hudebního slohu, je základní ten, že statistická pravděpodobnost či relativní četnost odpovídá tomu, co posluchač očekává. Na tomto předpokladu je založen další předpoklad, že průměr hodnoty překvapení H představuje posluchačův stav nejistoty v době, kdy právě zažívá zkušenost z analyzy vzorku. Youngblood (1960, str. 11) například se domnívá, že obsah informace se „vztahuje ke stupni, při němž je konsument (pozorovatel, posluchač, čtenář) na pochybách o tom, co bude bezprostředně následovat“. Podobně se v rytmičké analýze domnívá Brawley (1959, str. 17), že může užít kalkulu teorie informací, aby „dospěl k nějakému více či méně určitému odhadu toho, co může posluchač po stránce rytmičké od daného slohu očekávat“.

Pravděpodobnostní systém, použitý při komputaci H pro určité dané dílo nebo vzorek, neodpovídá zkušenosti posluchačově dotud, pokud si posluchač „neuskalnil“ to dílo nebo vzorek v paměti. Posluchačova zkušenost je spíše zkušenost neustále se měnícího pravděpodobnostního systému. Tento pravděpodobnostní systém vychází spíše z posluchačovy zkušenosti, získané až do přítomného okamžiku ze vzorku, než z celkových relativních četností a průměrného počtu překvapení. Posluchačův pocit nejistoty může být měřen pomocí H jen tehdy, jestliže posluchač měl už před tím vněmovou zkušenost s hudebními sledy přesně téže statistické struktury, jakou má analyzovaný vzorek. Nemá-li dlouhý předchozí sled hudební zkušenosti posluchačovy průměrný obsah informace H , posluchačův pocit nejistoty, když bude prožívat vjemy prostřednictvím kulturní soustavy znaků nového vzorku, nebude H , byť i vzorek sám při analýze průměrný obsah informace H měl. Z toho plyne, že domněnka o tom, že hodnota H nějakého souhrnu představuje posluchačovu nejistotu během doby prožívání vněmové zkušenosti ze souhrnu, není, všeobecně vzato, udržitelná.

Počet, založený na teorii informací, který kvantifikuje posluchačovo prožívání vněmové zkušenosti, rozvinuli Kraehenbuehl a Coons (1959). V jakémkoli sledu rozlišitelných jevů může určitý nadcházející jev buď potvrdit predikce učiněné na základě uplynulého sledu, nebo je může „nepotvrdit“ („nonconfirm“), tj. může při jejich potvrzování selhat. „Informace bude míra stupně, v jakém jednotlivá predikce nebo celá řada predikcí je ‚nepotvrzena‘ jevem, probíhajícím v přítomnosti“ (Coons & Kraehenbuehl, 1958, str. 129).

Predikce mohou být přímé, např. jestliže uplynulá posloupnost je prostě A , je jediná možná predikce pro příští jev na základě zkušenosti také A . Nebo můžeme mít predikci analogickou, např. z posloupnosti $ABCDEF$ nejzřejměji můžeme očekávat predikci G .

Na základě řad predikcí vyvinuli Kraehenbuehl a Coons (1959) jakýsi index „určitosti“, jenž představuje průměr měnlivého stavu toku informace, pokud je v posloupnosti, a index „hierarchický“, jenž představuje průměr redukci informace, pokud jsou v posloupnosti. Ujišťují, že tyto dva indexy dávají estetickým termínům „mnohost“ a „jednota“ operativní význam a kvantifikují je. Nalezením hodnot indexů pro všechny možné 6-gramy ukazují, že „převažuje-li znatelně jeden z nich, má to za následek pokles efektivnosti obou“ (str. 129), tj. chtějí říci, že jednota a mnohost (rozmanitost) jsou spíše hodnoty doplňkové než protichůdné.

Kraehenbuehlův-Coonsův informační kalkul (1959) se právem domnívá, že posluchač nemůže počítat s tím, s čím do té doby neměl zkušenostní prožitek. Své kvantifikace zakládá počet jedině na posloupnosti, která právě probíhá.

Posluchač však přece obvykle vnáší do právě probíhající posloupnosti nějakou předchozí zkušenost, jež je do průměru uvedeným pravděpodobnostním systémem. Jelikož ale počet Kraehenbuehlův-Coonsův (1959) nebere předchozí zkušenosti na vědomí, nemůžeme uznat jeho vhodnost.

Co požadujeme, je teorie, jež by měla místo mezi „tradiční“ teorií informací a modifikovanou formou, kterou vytvořili Kraehenbuehl a Coons — takovou, která počítá s minulou zkušeností posluchače v zevšeobecněných, do průměru uvedených termínech, zatím co zároveň měří běžný tok informace právě probíhajícího zkušenostního prožitku.

Interakce mezi aspekty vzorku. Jiný estetický předpoklad je, že část množství kulturní znakové soustavy může být bez úhony odmyšlena od celku a že hodnoty založené na této abstrakci budou mít stejnou cenu, jako kdyby tato část množství byla zahrnuta v celku.

Tuto hypotézu napadá Albrecht (1956), jenž píše:

„Když jsem začal pracovat na podobné basi jako Dr. Pinkerton, brzy jsem shledal, že harmonický obsah noty má prvořadou důležitost, odhadujeme-li jeho statistickou hodnotu... pouhý zájem o četnost výskytu jistých not v melodii bez zřetele na harmonický kontext může poskytnout smysl dávající výsledky jenom v takovém triviálním případě, kdy celá melodie je doprovázena tímž tónickým kvintakordem.“

Obdobně bylo nutno vysvětlovat nízkou hodnotu rytmické redundance v Schubertových melodiích (Brawley, 1959) požadavky textu. Všeobecně řečeno:

„Odhad pravděpodobnosti, učiněný jednoduše na základě neanalyzovaných vzorků, nebo zkusmo, nebude asi bezpečnou basí pro predikci. Není-li známo nic, co se týče mechanismu situace, kterou zkoumáme, budou asi relativní četnosti, které z vzorků obdržíme, ubohým vodítkem k objasnění povahy toho neurčitě velkého počtu obyvatel, z něhož jsme je vybrali“ (Nagel, 1955, str. 401).

Je nutné porozumět mechanismu interakce mezi aspekty hudebního vzorku, chceme-li obdržet vhodnou analýzu každého aspektu.

Interakce mezi úrovněmi. Další hypotéza teorie (alespoň takto byla podána) je, že sled hudebních jevů je zkušenostně vnímán na pouze jediné architektonické úrovni: v melodických analýsách na úrovni not nebo intervalů; v rytmických analýsách na úrovni pulsačního schématu uspořádání. Tato hypotéza je jasně nepřiměřená k tomu, abychom si utvořili obraz o hudební zkušenosti, protože hudbu vnímáme na mnoha úrovních zároveň. V kulturní soustavě znaků melodie např. sestávají noty, intervaly, motivy, fráze, periody, oddíly a věty v souhrnném celku z písmen rozličných abeced. Teorie bude muset počítat s interakcí (vzájemným ovlivňováním) mezi úrovněmi.

Zevšeobecnění, která z toho plynou

Přešetření několika z mnoha pracovních hypotéz informační analýzy ukazuje, že bude potřeba mnohých zjemnění, než bude možno brát výsledky za bernou minci. Mnohé numerické výsledky, udané na tři platné číslice [Brawley (1959) dokonce udává jeden výsledek na sedm platných číslic] jsou jen velmi hrubými aproximacemi, mají-li ovšem vůbec nějaký význam.

Budoucí analytické aplikace musí být mnohem pečlivěji postaveny. Musí se zlepšit a přizpůsobit tomu své matematické nástroje. Budou musit dojít také k větší citlivosti a porozumění té jedinečné hudební povaze hudební zkušenosti. Postřeh (Tischlerův, 1956), že vnitřní vztahy v uměleckém díle jsou jedinečné vzhledem k prostředí a prostředkům, vyžaduje analytický nástroj, jenž by byl citlivý k problémům jedinečně hudebním. Analytické začátky učiněné pomocí teorie informací jsou velkým pokrokem oproti některým operativně bezvýznamným záležitostem estetickým, avšak zjemnělá analytická technika je ještě daleko před námi.

Výhledy

Nyní se klade mnoho otázek o informační teorii hudby. Co může informační teorie hudby vypovídat o emocionální či afektové odezvě na hudbu? Co může vypovídat o psychologické znakové soustavě hudby? Jaké jsou její vztahy k všeobecnému řešení problému lidské činnosti? A zvláště: jaké jsou její účinky na patinou se pokrývající panství estetiky?

Přehled částečných odpovědí na tyto otázky může naznačit některé z výhledů informační teorie hudby.

Emoce a hudba

Dvě hlavní teorie vykládají hudební emoci v termínech teorie informací.

Meyer (1956) začíná od základní psychologické teorie, že zklamání nebo zábrany splnění očekávání zpravidla vedou k afektivní odezvě. Hudební styl je soustava očekávání. Není-li očekávání splněno, např. nastane-li nepravděpodobný jev, nebo je-li očekávání nesplněno v důsledku zábrany (překážky), způsobené nejasností situace (Dibner, 1958), posluchač na to může reagovat afektivně buď „hudební emoci“, nebo si zdůvodnit své zklamání (frustraci) a rozumově je převést na „hudební význam“. Odezva závisí na tom, jak je orientován. Tedy: „Zdálo by se, že ‚psycho-slohové‘ podmínky, v jejichž důsledku vystupuje do popředí hudební význam, ať už afektový nebo intelektuální, jsou totožné s těmi, jež sdělují informaci“ (Meyer, 1957, str. 412).

Meyer (1957, str. 422) podává přehled některých požadavků na statistickou analýzu slohu. Stojí za povšimnutí, že všechny byly v praxi ignorovány.

„1. Nashromážděné vzorky musí počítat s tendencí systémové nejistoty ke zmenšování se a s tím, že jak se bude hudba rozvíjet, bude do ní uváděna záměrně rozvržená nejistota.

2. Tonální pravděpodobnosti existují nejen ve frázích a menších částech hudební struktury, nýbrž i mezi strukturami samými. Tyto pravděpodobnosti nejsou nutně stejné... Pro rozličné architektonické úrovně musí být objeveny rozličné soubory pravděpodobností.

3. Je omyl předpokládat, že pravděpodobnost zůstává relativně konstantní během trvání hudebních děl... Podsystemy musí být analysovány v mezích rozsáhlejšího systému pravděpodobností...

4. Při definování mezi vzorku a diskusi o příslušných pravděpodobnostech je důležité, abychom byli obeznámeni s historickým vývojem hudebních slohů...

5. Ne všechny pravděpodobnosti, vtělené v hudební skladbě, jsou určeny četností výskytu... Jeden z předběžných kroků k statistické analýze hudebních slohů musí být popis a analýza konstant, souvisejících s psychologíí myšlení.“

Uzavírá tím, že podle něho je obecný vztah mezi obsahem informace, hudebním významem nebo emocí a hudební hodnotou.

Druhou informační teorii hudební emoce vyvinul Moles (1956, 1958). Napřed stanoví, že posluchačova psychologická struktura určuje logickou strukturu zprávy (srv. str. 181—2). Ukazuje, že hudební sdělení (zpráva) může být interpretováno současně jako rozličná písmena rozličných abeced, závislých na škále časového vnímání. Moles odlišuje soustavu kulturních znaků (sdělení „sémantické“) od soustavy psychologických znaků (sdělení „estetické“). „Estetické“ sdělení je jedinečné vzhledem k danému uskutečnění (provedení) sdělení „sémantického“; dnes, kdy existují nahrávky, mohou být studována i „estetická“ sdělení. Když byl podrobně prozkoumal soustavu psychologických znaků, ukázal Moles (1958, kap. 5), že sémantické sdělení je rozsáhle redundantní, obsah informace „estetického“ sdělení přímo zaplaví posluchače a vytvoří jeho emocionální odezvu.

Teorie Meyerova (1956, 1957) a Molesova (1956, 1958) nejsou nijak v rozporu. Meyerova se vztahuje na kulturní soustavu znaků, podle níž je obvykle hudebník vycvičen v odezvě, kdežto Molesova se vztahuje na psychologickou znakovou soustavu, na kterou projevují odezvu především nehudebníci. Obě jsou podstatné, neboť zkoumat jenom kulturní soustavu znaků je vážným nedopatřením:

„I když můžeme na základě zkoumání partitury zjistit v hudební skladbě specifickou statistickou strukturu, není nikterak jisto, že tato struktura, pojatá na intelektuální úrovni, je automaticky přenesena do zvuku“ (Meyer-Eppler, 1958, str. 58).

Proto mají výzkumy psychologické soustavy znaků podstatný význam.

Psychologická znaková soustava

Mnoho z výzkumů, aplikujících teorii informací na psychologii, náleží přímo informační teorii psychologické soustavy znaků hudby.

Quastler (1955b) ukázal, že maximální míra přenosu informace se u člověka pohybuje kolem pětadvaceti bitů za vteřinu. Mezná míra přenosu pohybovala se u profesionálních pianistů kolem dvaadvaceti bitů za vteřinu.

Jacobson (1951) zjistil, že zatím co ucho může přenášet maximum deseti tisíc bitů za sekundu, při hudebním poslechu je maximum deset nezávisle od sebe vnímatelných not za sekundu. Každá nota představuje volbu z přibližně stovky půltónů, užívaných v instrumentální hudbě, ovšem platí to pro „hudebně vycvičený sluch“.

„To dává asi 70 bitů/sec pro vněm noty, což zdůvodňuje větší část obsahu informace skladby; z toho je zřejmé, že mozek může, všeobecně řečeno, ztrávit méně než jedno procento informace, kterou mu předávají naše uši“ (str. 471).

Proto psychologický systém znaků sděluje přinejmenším stokrát víc informace než kulturní, a Molesova teorie, že posluchač je prostě zaplaven, je tím podpořena.

Miller (1960) studoval křivky výkonné činnosti jednotlivců, přičemž přeplnil vstup vizuální informace a vzal v úvahu relativní důležitost rozličných vyrovnávacích mechanismů, jichž vyšetřovaní užívali. Podobné pokusy s přeplněnou aurální informací by mohly napomoci při snaze porozumět například nevrle (hostile) reakci na hudbu s přílišným množstvím informace.

Attneave (1959) podává přehled jiných výzkumů psychologie slyšení na základě teorie informací. Pollack (1952) shledal, že kapacita subjektů pro přenos informace za podmínek absolutní identifikace tónů je $\log_2 5 \doteq 2,3$ bitů, tj. že v tónové škále mohou subjekty identifikovat jenom pět tónů správně. Attneave se domnívá, že diatonická stupnice obecně známého druhu, kterou si dovedl hudebně cvičený subjekt v paměti vybavit, by mohla přenést víc informace. To podporuje výsledek Rogersův, jenž zjistil, že koncertní mistr symfonického orchestru může případně transmitovat 5,5 bitů, tj. mohl by správně určit (identifikovat) asi čtyřicet šest tónů v rozsahu absolutní škály. Dotyčný koncertní mistr měl absolutní sluch (Attneave, 1959, str. 71). Psychologické výzkumy budou posléze musít vysvětlit účinky hudebního založení a výcviku na hudební vnímání.

Skládání hudby a heuristické programování

Skládání hudby je výběr. Řešení problémů je též výběr jedné pravděpodobnosti z množiny pravděpodobností. Reitman (1960) uvedl do vztahu skládání hudby a obecnou činnost, sestávající z řešení problémů pomocí heuristického¹³ programování pro počítače.

Heuristické programy jsou „pokusy vtělit do počítačových programů procesy podobné těm, které užívají lidské bytosti, když mají co dělat s neúplně postavenými (illstructured) problémy“ (Reitman, 1960, str. 410). Do těchto problémů patří objevy matematických vět, matematické a logické důkazy, rozvržení pracovních sil při pracovních úkolech na závodech, tvoření vědeckých hypotéz při laboratorních pokusech, volby tahů při šachu a skládání hudby.

„Dala by se vymyslet hierarchie složitosti, postupující od elementární symbolické logiky přes šachy k hudbě. Řešení logického problému je definováno poučkou (větou), kterou máme dokázat... Avšak umělecká díla by mohla být zcela dobře prověřována tak, že by musila vyhovovat složité soustavě testů, které se samy v průběhu práce mění“ (Reitman, 1960, str. 413).

Aby přišli na to, jak dalece mohou být heuristická programování rozšiřována, pokusili se Reitman se Sanchezem (Reitman, 1960) vytvořit program, simulující chování skladatele při psaní fugy. Našli skladatele, ochotného pokusit se popsat své pracovní metody a nahráli všechno, co vypovídal nebo hrál, což činili několik měsíců. Jejich analýza obdržených údajů učinila zřejmým fakt, že komputátor by se musil napřed naučit základům hudební nauky. Naprogramovali počítač se zvláštním jazykem pro informační postupy, jenž umožnil počítači vytvořit jednoduchou melodii, harmonii a kontrapunkt. Aby vyřešili původní základní problém kompozice, vložili pak do počítače již předtím existující „program obecného řešení problémů“ (General Problem Solver program) (Newell, Shaw & Simon, 1958). To učinili a tak nyní ověřují, do jaké míry je tento „Obecný řešitel problémů“ opravdu obecný.

Teorie informací a estetika

Možná, že hlavní cena aplikace teorie informací na hudbu není ve shromažďování dosažených specifických výsledků, nýbrž v duševních návycích, které se vyvinou během doby, kdy máme co činit s estetickým objektem nebo procesem, jakým je třeba hudba.

¹³ Heuristika je v podstatě návod k metodickému hledání vědecké pravdy, tedy vlastně výzkum metod pro hledání metod. (Pozn. překl.)

Je jedna nesnáz s mnohými diskusemi a pojednáními estetického rázu, že totiž pokud čtenář není už předem obeznámen s tím, co autor chce říci, může se stát, že se autorovi naprosto nepodaří jakékoli sdělení zprávy. Diskuse o hudbě jakožto o „významovém útvaru“ (Langer, 1952) a výroky, jako: „Melodie by měla mít smysl a vyjadřovat úplný, soběstačný význam“ (Edwards, 1956, str. XXIII) nám zvláště mnoho neobjasní.

V teorii informací mají pojmy i výroky striktně operativní formu; označují skutečné konkrétní operace. Namísto snahy definovat „uspořádání“ ve výrazech jakéhosi efemérního smyslu „estetické libosti“, který nemusí být společný všem lidem, může estetika založená na teorii informací mluvit o redundanci daného zdroje v termínech universálně reprodukovatelných operací. Namísto slovíčkaření o „jednotě“ a „mnohosti“ v řadě možností jemných rozlišování můžeme prostě propočítávat hodnotu „indexu hierarchie“ a „indexu zřetelnosti“ či jiných přiměřeně vhodných měr. Dokonce i ta specificky hudební emoce se stává operativně měřitelnou. Meyer (1956, str. 32) poznamenává, že hudební afekt je možno objektivně zkoumat pomocí posloupnosti podnětů, jež byly příčinou jeho vzniku: „... i když bereme na vědomí, že jsou posluchači s vyvinutým už smyslem pro vnímání schémat uspořádání, přiměřených tomu kterému hudebnímu dílu, může být struktura afektové odezvy na hudební kus zkoumána prostřednictvím studia hudby samé“. Není to zajisté jediný prostředek, ba dokonce dnes ještě ani zvláště citlivý prostředek výzkumu, to uznáváme.

Teorie informací sama nemůže říci, jaká je povaha hudební zkušenosti. Ona může být pouze aplikována na takové pojetí hudební zkušenosti, k němuž jsme dospěli jinými prostředky. Zjemnit pojetí hudební zkušenosti je cílem estetiky.

UŽITÁ LITERATURA

- Adrian E. D.: *Physical background of perception*. London, Oxford Univ. Press 1947.
- Anon.: By the numbers. *Musical America* 1956, 76, 11, 13.
- Anon.: Why computers take up games. *Business Week*, 26. 11. 1960, 138.
- Albrecht G.: (Dopis). *Sci. Amer.* 1956, 194, 4, 18–19.
- Ashby W. R.: Design for an intelligence-amplifier. *Automata studies*, Princeton, Princeton Univ. Press, 1956, str. 215–234, vydavatelé C. E. Shannon a J. McCarthy.
- Attneave F.: *Applications of information theory to psychology*. New York, Holt 1959.
- Brawley J. G. ml.: Application of information theory to musical rhythm. Neuveřejněná disertace. Indiana Univ. 1959.
- Brooks F. P. ml. a jiní: An experiment in musical composition. *IRE Trans. Electronic Computers* 1957 EC-6, 175; opravy v EC-7, 60.
- Burroughs Corporation: Syncopation by automation, údaje z publ. *Electro Data* srpen 1956.
- Cage J.: To describe the process of composition used in „Music for Piano 21-52“. *Die Reihe* č. 3; *Musical Craftsmanship* 1959, 41–43.
- Chomsky N.: Three models for the description of language. *IRE Trans. Information Theory* 1956, IT-2, 3, 113–124.
- Coons E. a Kraehenbuehl D.: Information as a measure of structure in music. *J. Music Theory* 1958, 2, 127–151.
- Densmore F.: *Teton Sioux music*. Bureau Amer. Ethnol. Bull. 61. Washington, Smithsonian Institution 1918.
- Dibner A. S.: Ambiguity and anxiety. *J. abn. soc. Psychol.* 1958, 56, 165.
- Edwards A. C.: *The art of melody*. New York, Philosophical Library 1956.

- Fano R. M.: The transmission of information. M.I.T. Res. Lab. Elect. Tech. Rept. 65 (1949) a 149 (1950).
- Fucks W.: Reply, following Mathematical theory of word formation, vyňato ze zprávy: *Information Theory—Third London Symposium* (vydavatel E. C. Cherry). New York, Academic Press 1955, str. 169.
- Grey Walter W.: *The living brain*. New York, Norton 1953.
- Helmholtz H.: *On the sensations of tone*. Přel. A. J. Ellis. New York, přetisk Dover 1954.
- Hiller L. A. ml.: Computer music. *Sci. Amer.* 1959, 201, 112.
- Hiller L. A. ml. a Isaacson L. M.: *Experimental music*. New York, McGraw-Hill 1959.
- Hindemith P.: *A composer's world*. Cambridge, Mass., Harvard Univ. Press 1952.
- Jacobson H.: Information and the human ear. *J. acoust. Soc. Amer.* 1951, 23, 463—471.
- Chinčín A. I.: *Mathematical foundations of information theory*. Překl. R. A. Silvermana a D. M. Friedmana. New York, Dover 1957.
- Krachenbuehl D. a Coons E.: Information as a measure of the experience of music. *J. Aesthetics & Art Criticism* 1959, 17, 510.
- Langer S. K.: *Philosophy in a new key*. (2. vyd.) Cambridge, Mass., Harvard Univ. Press 1952.
- Livant W. P.: Review of *Experimental music*, by Hiller and Isaacson. *Behav. Sci.* 1961, 6, 159—60.
- McCracken D.: Monte Carlo method. *Sci. Amer.* 1955, 192, 5, 90.
- McCulloch W. S.: Brain as a computing machine. *Electrical Engineering* 1949, 68, 492—497.
- MacKay D. M.: Place of „meaning“ in the theory of information. Vyňato ze zprávy: *Information Theory—Third London Symposium* (vyd. E. C. Cherry). New York, Academic Press 1955, str. 215 až 225.
- McKay G.: Review of *Experimental music*, by Hiller and Isaacson. *J. Research in Music Ed.* 1959, 7, 232.
- Meyer L. B.: *Emotion and meaning in music*. Chicago, Univ. of Chicago Press 1956.
- Meyer L. B.: Meaning in music and information theory. *J. Aesthetics & Art Criticism* 1957, 15, 412.
- Meyer-Eppler W.: Statistic and psychologic problems of sound. *Die Reihe*, čís. 1; *Electronic Music* 1958, 53—61.
- Miller J. G.: Information input overload and psychopathology. *Am. J. Psychiat.* 1960, 116, 8, 695 až 703.
- Moles A.: Informationstheorie der Musik. *Nachrichtentechnische Fachberichte*, Band 3: *Informationstheorie* 1956, 47—55.
- Moles A.: *Theorie de l'information et perception esthétique*. Paris, Flammarion 1958.
- Morris C. W.: Foundations of the theory of signs. *International Encyclopedia of Unified Science*, sv. 1, číslo 2. Chicago, Univ. of Chicago Press 1955.
- Nagel E.: Principles of the theory of probability. *International Encyclopedia of Unified Science*, sv. 1, čís. 6. Chicago, Univ. of Chicago Press 1955.
- Newell A., Shaw J. C. a Simon H. A.: Report on a general problem-solving program. The RAND Corp. P-1584 prosinec 1958.
- Olson H. F. a Bellar H.: Aid to music composition with a random-probability system. *Science* 1961, 133, 3461, 1368. (Výtah).
- Pierce J. R.: *Electrons, waves and messages*. Garden City, N. Y., Hanover House 1956(a).
- Pierce J. R.: (Dopis.) *Sci. Amer.* 1956, 194, 4, 18 (b).
- Pinkerton R. C.: Information theory and melody. *Sci. Amer.* 1956, 194, 2, 77.
- Pollack I.: Information of elementary auditory displays. *J. Acoust. Soc. Amer.* 1952, 24, 745.
- Quastler H.: Discussion following Mathematical theory of word formation. Recenze na knihu W. Fucks. Ze zprávy: *Information Theory—Third London Symposium* (vyd. E. C. Cherry). New York, Academic Press 1955, str. 168 (a).
- Quastler H.: Studies of human channel capacity. *Jako předtím*, 1955, str. 361—71 (b).
- Quastler H.: Úvodník. *Information theory in psychology* (vyd. H. Quastler). Glencoe, Ill., Free Press 1955 (c).
- Rameau J. Ph.: *Traité de l'harmonie* (1722). Vybrané stati ze sborníku: *Source readings in music history* (vyd. O. Strunk). New York, Norton 1950.
- Reitman W. R.: Information processing languages and heuristic programming. *Bionics Symposium* (WADD Tech. Rep. 60—600). Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Directorate of Advanced Systems Technology 1960, str. 410.
- Rochberg G.: Indeterminacy in the new music. *Score* leden 1960.

- Schillinger J.: *Mathematical basis of the arts*. New York, Philosophical Library 1948.
- Shannon C. E.: A mathematical theory of communication. Bell Tel. Labs. Monograph B-1598, 1957 (*přetištěno z Bell Syst. Tech. J.* 1948, 27, 379–423, 623–656).
- Sowa J.: A machine to compose music. New York, Oliver Garfield Co., Inc. 1956.
- Springer G. P.: Language and music: some parallels and divergencies. Ve sborníku: *For Roman Jakobson*. Haag, Mouton 1956, str. 504.
- Stravinskij I.: *Poetics of music in the form of six lessons*. New York, Vintage Books 1956.
- Tischler H.: The aesthetic experience. *Music Review* 1956, 17, 189.
- Von Köchel L. R.: *Chronologisch-thematisches Verzeichnis sämtlicher Tonwerke W. A. Mozarts*. Ann Arbor, J. W. Edwards 1947.
- Weaver W.: The mathematics of information. Z publikace *Automatic Control*. („*A Scientific American Book*“) New York, Simon Schuster 1955.
- Weyl H.: Symmetry. Z publikace *The world of mathematics* (vyd. J. R. Newman). New York, Simon & Schuster 1956, str. 1, 703.
- Yngve W. H.: Gap analysis and syntax. *IRE Trans. Information Theory* 1956, IT-2, 3, 106–112.
- Youngblood J. E.: Style as information. *J. Music Theory* 1958, 2, 24.
- Youngblood J. E.: Music and language: some related analytical techniques. Nevydaná doktorská disertace. Indiana University 1960.
- Zipf G. K.: *Human behavior and the principle of least effort*. Cambridge, Mass., Addison-Wesley 1949.
- Joel E. Cohen: Information Theory and Music. *Behavioral Science*, April 1962, Vol. 7, No. 2, 137–163. Přeložil a poznámkami opatřil Jan Rychlík.