

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum
Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica

Jan Kunzfeld

Příspěvek k modernizaci vyučovacích prostředků v akustice

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica, Vol.
10 (1969), No. 1, 277--321

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/119913>

Terms of use:

© Palacký University Olomouc, Faculty of Science, 1969

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Katedra experimentální fyziky a metodiky fyziky přírodověd. fakulty

Vedoucí katedry: prof. dr. Josef Fuka

PŘÍSPĚVEK K MODERNIZACI VYUČOVACÍCH PROSTŘEDKŮ V AKUSTICE

JAN KUNZFELD

(Došlo dne 15. června 1968)

Soudobé důvody vedoucí k modernizaci vyučovacího procesu v nejširším smyslu vycházejí, jak známo, z té skutečnosti, že přírodovědné vyučovací předměty, zvláště fyzika, chemie a biologie se dostaly v důsledku prudkého vědního rozvoje v nové době do svízelné situace. V krátkém vyučovacím čase mají seznámit pokolení, které stojí na prahu vědeckotechnické revoluce, s podstatně rozmnoženým množstvím poznatků. Protože už nebude možno vystačit s eliminačními metodami v probíraném učivu jako dříve, je nutno otázku narůstajícího rozsahu učiva řešit změnami ve struktuře učiva a změnami v jeho koncepci.

Jednou z cest, která by podstatně napomohla při řešení úkolu, je cesta hledání společného kvalitativního jmenovatele několika výukových oblastí, na něž by bylo možno převést rozsahovou kvantitu učební látky. Touto cestou je integrace učiva. Integrace otevírá nové cesty racionálního pronikání do podstaty učiva a takovýto integrační aspekt bude nepochybně působit jako velmi významný činitel při rozvoji myšlení. To proto, že elementární additivní a asociativní vztahy nahraňuje vztahy strukturálními — tedy řádově vyššími. V tomto případě jde tedy o otázku nového strukturálního uspořádání obsahu naukových oblastí. Při vyučování fyzice je možno najít několik okruhů učiva, jejichž nové strukturální uspořádání, doprovázené současně modernizací obsahu, by značně přispělo k ekonomizaci vyučování fyzice. Jednou z takových oblastí fyziky, kde by integrační principy byly mimořádně významné, je široká oblast vibračních a vlnových procesů. Tuto tendenci vykazují mnohé soudobé koncepce vyučovacích modelů jak zahraničních, tak domácích, ve kterých se odráží tendence usoustavnit učivo o kmitavých a vlnových procesech různých oborů fyziky do jediné integrované soustavy, vázané formální jevovou podobností. Je zcela samozřejmé, že je věnována prvořadá pozornost právě oblasti vibračních a vlnových jevů, neboť tyto děje mají prvořadý význam pro pochopení soudobé moderní fyziky.

Při řešení modernizačních úkolů je nutno jít cestou komplexního řešení. Nelze tedy oddělit řešení otázek obsahu a koncepce od otázek vyučovacích metod, metod diagnostických a otázek modernizace vyučovacích prostředků. Není bezvýznamná ani otázka metodiky využití soudobých vyučovacích prostředků, jak ukazuje současný stav na našich školách.

Nedávná doba vykazovala především jisté pokroky v oblasti využití moderních vyučovacích prostředků při vyučovacím procesu. Tyto prostředky se dostávají na naše školy ve stále dokonalejším technickém provedení, přesto však nevykazují

ještě ten stupeň funkční dokonalosti, který by odpovídal soudobému stavu techniky a soudobým možnostem realizace vyučovacích prostředků. Je překvapivou skutečností, že příliv novodobých vyučovacích prostředků do vyučovacího procesu nevykazuje adekvátní účinnost při jejich zařazení. Nedávné průzkumy didaktické účinnosti soudobých vyučovacích prostředků a pomůcek ukázaly, že jejich použití vede mnohdy k pasivní účasti žáků, kdy žák se stává pouze nezúčastněným divákem. Je nutno hledat příčiny tohoto neúspěšného uplatnění moderních vyučovacích prostředků a pomůcek. Jedna z příčin může být v přemíře sdělovaných informací, se kterými se žák setkává na každém kroku. Jiná příčina v nesprávném didaktickém použití prostředků, v jejich nevhodném zařazení do vyučovacího programu, v jejich neúměrném využití ap. Příčiny musí objasnit výzkum.

Tyto soudobé a jistě dočasné závěry nemohou však popřít obecně platný a teoreticky zdůvodněný význam zařazení prostředků poznávání v procesu vyučování na všech úrovních školního vzdělávání. Vyděme-li z teorie poznávání, jeví se jako přirozené — a to obzvláště při vyučování fyzice — zdůraznit právě prostředky a jejich poslání ve výukovém procesu. Jsou bází informační práce smyslových orgánů a prostředkem k pozorování vzájemného působení projevů skutečnosti. Jejich význam je nepopíratelný v procesu přímého poznávání, při kterém dochází k pochopení jevové podstaty. Vzhledem k tomu, že smyslové poznání vnímá makroskopický děj, neinformuje o mikrostruktuře a neposkytuje tak informaci vysvětlující, je nutno využít procesu zprostředkovaného poznávání. K tomuto procesu dochází zprostředkovaně na základě transformací mikrostrukturálních dějů na děje smyslovému vnímání přístupné. Fyzika je v tomto směru oborem nejprogresivnějším, má obrovskou poznávací sílu v procesu odrazu skutečnosti ve vědomí pozorovatele. Tyto zprostředkovací funkce mají svůj význam nejen v oblasti vědeckého bádání, ale především je jich nutno využít ve vyučovacím procesu, při kterém vyučovací prostředek tvoří nutně neoddělitelnou součást vyučovacích metod.

1. Význam akustiky pro modernizaci vyučování fyzice

Akustika je jednou z klasických naukových disciplín a spolu s mechanikou a termikou zahrnuje oblast, z jejichž naukových principů se rozvíjely obory mladší jako elektřina, optika a později celá moderní fyzika. V současné době jsou akustické jevy velmi podrobně a téměř ve vyčerpávajícím rozsahu rozpracovány jak po stránce teoretické, tak experimentální a vývoj poznatků je téměř dokončen. K poznatkům klasickým přistupují dnes pouze specializované pohledy na oblast jevů ultrazvukových, hyperzvukových, na obor nelineární akustiky a na problémy aplikované akustiky.

Pokud jde o postavení akustiky mezi jinými obory fyziky, jak se s ním setkáme ve školské fyzice, je možno říci, že akustika byla i v nedávné době značně opomíjena a stále více vytlačována z výukového programu, zvláště na školách nižšího stupně. Bylo tomu proto, že při starém pojetí akustiky se jevílo její zařazení do výukového procesu jako neekonomické a v některých částech již jako archaické ve srovnání s jinými, mladšími obory. Na školách základních nebyla akustika vůbec zařazena. Na středních školách pouze v tradičním uspořádání a v omezeném rozsahu. Zdůvodnění, proč na školách základních byla akustika vůbec vypuštěna z osnov, včetně učiva o kmitavém pohybu, vychází z přetížnosti osnov učivem a z poukazu na obtížnost nauky o vlnění, která se jeví jako

obsahově nepřiměřená chápání žáků základní školy. Učivo o kmitavém pohybu a vlnění, jak je v současné době zařazeno do výuky na našich školách středních, tvoří úzkou, uzavřenou a izolovanou oblast poznatků bez poukazu na širší souvislosti a podobnosti s jinými výukovými obory a je předkládáno bez zaměření na moderní přístup, vycházející z mikrostruktury látek a prostředí. Vymizela pouze stará, historicky tradovaná část o hudební akustice a přibyla místo ní zmínka o ultrazvuku, vyvolaná současným stavem techniky.

Pokud jde o výuku akustiky na školách vysokých, je možno říci, že ani zde mnohdy nevykazuje moderní přístup, hlavně v oblasti demonstračních a experimentálních prostředků, které jsou mnohdy velmi zastaralé. I na této úrovni školního vzdělávání mají své důležité postavení demonstrační a měřicí prostředky, které svým názorným způsobem sdělování mohou doplnit informace získané teoretickou cestou a prakticky interpretovat matematické formulace, ze kterých fyzikální obsah není vždy dosti názorně zřejmý. Při práci experimentální je možno využít snadného modelování akustického pole, které vede k ověření teoretických dedukcí. V oblasti akustického vlnění je možno studovat jevy, které nelze snadno realizovat v jiných oborech vlnění.

Současné světové tendence modernizace vyučování fyzice zahrnují dvě základní složky, které by měly výrazně vystoupit v nové koncepci osnov. Prvá složka je zahrnuta v již zmíněné snaze seskupit jevy vlnivé povahy (mechanické, akustické, elektromagnetické) do souboru se zdůrazňovanou podobností formální, funkční i interpretační. Druhá tendence vede ke zvýraznění informací žáků o molekulové struktuře látek, ze které je možno vyvozovat mikrostrukturální děje, vysvětlující přesněji podstaty a mechanismy jevů makroskopických. V nauce o vlnění a při vyvozování pojmu pole s jeho prostoročasovou existencí není možno rozvíjet správné chápání jevů a budování jejich výkladu bez znalosti mikrojevů a jejich izolovaných forem (abstrakce částic pole, elementárních oscilátorů apod.).

Z pohledu moderní fyziky nabývá v současné době akustika širšího významu, než vymezuje základní pojem akustiky „zvuk“, který byl původně vztahován na procesy registrované sluchovým orgánem. Později byl rozšířen na jevy v oblasti ultrazvukové a infrazvukové, zahrnující kmitové jevy s frekvencí nad 16 kHz a pod 16 Hz, a oblast hyperzvukovou, která takto označuje jevy kmitání velmi vysokých frekvencí, které vznikají v mechanickém tepelném spektru a nemohou být vyrobeny ani pomocí čistě mechanických nebo piezoelektrických prostředků. V moderní akustice je nutno vyzvednout charakteristické principy vlnové a vibrační povahy, které prolínají celou moderní fyzikou.

Ve snaze o modernizaci akustiky je nutno přejít od dřívějších popisů makroskopických dějů k mikrostrukturálním mechanismům jevů a tím ke kvalitativně nové formě jejich vysvětlování. Z hlediska obecnosti principů, tvořících základ každé výukové disciplíny, je nutno z klasického rozdělení akustiky na akustiku hudební, fyziologickou a akustiku fyzikální zdůraznit akustiku fyzikální, včetně neoddělitelné součásti akustiky — nauky o vlnění.

Význam akustiky pro vytváření pojmu pole

Vlnové nebo vibrační procesy prostupují dnes celou fyzikou a jsou součástí současné abstraktní fyziky. V přítomné době je celá fyzika, nebo lépe řečeno fyzikální teorie polí, rozdělena do několika polí. Jsou to základní typy polí: pole gravitační, elektromagnetické, mesonové, pole elektron-pozitronové a even-

tuálně i jiná pole odvozená, která nemají již tak bezprostřední vztah k objektivní realitě. Mimo akustické pole je nejlépe prostudováno pole elektromagnetické, přestože periodické děje toto pole charakterizující se nedají sledovat přímo a bezprostředně. Projevy tohoto pole je možno sledovat až po převodu na jiné děje jakožto interakci mezi polem a soustavou zprostředkující o tomto poli informace.

Abychom vytvořili představu o vlastnostech příslušného pole a mechanismech dějů v něm probíhajících, využíváme analogických představ, známých z oblasti reálných makroskopických dějů. Kupříkladu elektromagnetické pole si při výkladu mechanizmů jevů v něm probíhajících představujeme na základě formální analogie jako soubor mechanických lineárních oscilátorů, nekonečně početných, kde každý oscilátor má vlastní frekvenci a jakmile se v tomto poli šíří elektromagnetická vlna, dostávají se oscilátory do nucených kmitů, dále září a tím se vibrační děj šíří od jednoho oscilátoru ke druhému v podobě vlnivého procesu. Představa lineárního oscilátoru je matematickou abstrakcí, odvozenou od konkrétního mechanického oscilátoru, jehož vlastnosti formálně přenášíme na oscilátor abstraktní. Využíváme zde představ známých z mechaniky a akustiky, kde představa o skutečnosti jevu jsou totožné. Pole samo se sice neskládá z reálných mechanických oscilátorů, když je ale popíšeme pomocí těchto mechanických modelů, plynou z teorie výsledky, které se dají experimentálně ověřit. Jiná je otázka vysvětlení rozdílů mezi podstatou pole akustického a jiných polí se specifickými složkami, magnetickou a elektrickou. Dosud se nemůžeme opřít o konkrétní představy takové, které by beze zbytku odpovídaly realitě pole. Příslušné modely polí se snažíme vybudovat takovým způsobem, aby byly pro nás fyzikálně co nejpochopitelnější a zároveň aby nám dávaly dobré výsledky, které je možno získat cestou matematickou a ověřit cestou experimentální. Každý takový model má pochopitelně své nedostatky a mnohé vzájemné shody jsou provázené jinými rozporů, které principům shody modelu a reality odporují.

Popis pole mesonového a jeho model vypadá obdobně jako představa o poli elektromagnetickém až na to, že mesonové pole se vyskytuje v nitru atomu, eventuálně v jeho nejtěsnější blízkosti.

Každé pole má své kvantum energie. V akustickém poli je to „fonon“, v elektromagnetickém jde o foton, tedy částici, která má spin 1 a nemá vlastní hmotu setrvačnou. V poli mesonovém je to meson, který má sice spin 0, ale hmotu od nuly různou, pohybující se kolem 270 hmot elektronu. Jde tedy o pole zcela odlišné podstaty.

U pole elektron-pozitronového vznikne specifická potíž při vytváření modelu, neboť jde o pole relativistické, lépe řečeno všechny rovnice lze získat z relativistické kvantové mechanické rovnice Diracovy, která poskytuje řešení jak pro kladné, tak pro záporné hodnoty energie, ve kterých se mohou částice vyskytovat. I v tomto poli však probíhají periodické děje. Každou z částic je možno popsat pomocí vlnové funkce a každá částice sama se chová jako komplex vln, „vlnové klubko“.

O poli gravitačním víme poměrně málo. I v tomto poli probíhají periodické děje v podobě tzv. gravitační vlny.

Mezi akustická pole se také řadí pole tepelných kmitů. V atomové mřížce kmitají atomy kolem rovnovážných poloh a kmitající mřížku je možno považovat za akustické pole.

Pro všechna pole je společné to, že v nich probíhají periodické děje, které

vyjadřujeme matematicky a nemůžeme je vyjádřit dosti názorně fyzikálně. Většina matematických vyjádření těchto periodických dějů je formálně totožná s popisem pole akustického. Velmi známá je fyzikální podobnost matematického popisu dějů elektromagnetických a vlnivých dějů hmotné povahy. U elektromagnetických vln je možno napsat např. výraz pro okamžitou výchylku

$$x = x_0 e^{(kx - \omega t)},$$

kde $(kx - \omega t)$ je fáze. Úplně stejně se vyjádří vlnová funkce pro elektron nebo pro jinou elementární částici a stejně pro akustickou vlnu.

Jakou důležitost může mít akustika při modernizaci vyučování fyzice?

Akustika se může stát obecným metodickým prostředkem pro vyvozování poznatků moderní fyziky z těchto důvodů:

Poskytuje snadnější pochopení matematického aparátu, který je pro jevy vlnivé povahy analogický a který má v akustice bezprostřední vztah k fyzikální realitě bez násilné abstrakce. V jiných polích má naproti tomu matematický aparát velmi abstraktní vztah ke konkrétní fyzikální realitě. Bez pochopení akustiky není možno dobře pochopit ani fyzikální děje probíhající v těchto polích. Bez pochopení akustiky by bylo těžko chápat kvantovou mechaniku. Akustika by neměla být chápána jako samostatná a uzavřená partie fyzikální, ale měla by tvořit spojovací článek mezi mechanikou a moderní fyzikou. V klasické elektromagnetické teorii pole je možno vyjít z akustických představ.

Akustické děje je možno snadno demonstrovat a najít jejich bezprostřední vztah k matematickému aparátu.

V akustice je velmi důležitý jev „superpozice stavů“. Aparát superpozice stavů byl bezezbytku převzat do kvantové mechaniky. Tento princip v akustice říká, že dvě vlnění se vzájemně skládají a dávají vlnění jedno. Opakem superpozice je harmonická analýza — rozklad do jednotlivých složek. Vezměme vlnovou funkci v mechanice kvantové, která odpovídá vlnové funkci v akustice. Tato vlnová funkce popíše vlastnosti fyzikálního systému, například v jednoduchém případě popisu vlastností elektronu. Tato vlnová funkce není v podstatě ničím jiným než superpozicí stavů, protože elektron se nenachází přímo v tom stavu, který popíše vlnová funkce, ale nachází se v kterémkoliv z vlnových stavů, které tuto funkci skládají. Vlnovou funkci rozložíme v řadu podle tzv. vlastních funkcí a naopak jestliže vlastní funkce sečteme, dostaneme výslednou vlnovou funkci, což je úplná analogie superpozice, jak je používána v akustice.

Princip vázaných oscilátorů v poli složeném z elementárních lineárních oscilátorů je základním principem přenosu energie v poli. Spolu s principem rezonance jsou opět obecnými jevy široké oblasti vlnivých procesů. Princip vázaných oscilátorů provází každý jev v akustickém poli. Jestliže dopadající kmitání a vynucené jsou v rezonanci, dochází k absorpci. Principy známými v akustice je možno vyloužit jevy jako absorpci kovů, jevy v dielektriku aj.

V závěru je možno říci, že v moderní fyzice je nutno pracovat s představou periodických dějů, které se v akustice objevují v zjevné a reálné formě. Přestože jde o periodické procesy, probíhající v mechanických soustavách, čímž se podstatně liší od podstaty vlnivých procesů jiných, poskytují fyzikálně názorný úvodní pohled do oblastí krajně abstraktních. Tím se stává akustika základním didaktickým prostředkem pro výuku moderních disciplín současné fyziky. Akustika se může stát propedeutikou moderní fyziky.

2. Elektroakustická lavice jako nový vyučovací prostředek

Při vyučování akustice na všech stupních výukového procesu, v obsahovém zaměření uvedeném v části 1, je nutno použít nových moderních demonstračních a laboratorních zařízení. Soudobé pomůcky a názorné vyučovací prostředky jakož i laboratorní soupravy pro akustiku jsou zastaralé a nemohou splnit náročné požadavky moderního způsobu výuky akustiky. Některá zařízení pocházejí ještě z dob prvních průkopníků akustiky — Kundta, Helmholtze, Kirchoffa aj.

Modernizace obsahu nauky o akustice spočívá především ve zdůrazňování mikrostrukturálních jevů fyzikální akustiky, ze kterých jsou odvozeny její stěžejní části, nauka o vlnění a nauka o akustickém poli. Je známo, že nové pojmy, které si žáci v procesu vyučování mají osvojit, se v první fázi poznávacího procesu nejlépe vytvářejí na základě vnímání konkrétních jednotlivostí a chápání komplexních vztahů mezi nimi. Reálný vjem napomáhá vytvářet obecný pojem v jeho širokém obecném významu a v jeho logickém sepětí s širší pojmovou oblastí. Pojem vlnění a pojem pole se při výuce akustiky objevují poprvé, a to jako základní pojmy akustiky, ekvivalentní svým významem kategorii hmota, prostor, čas, energie v oblasti mechaniky. Ve výukovém procesu navazují logicky na mechaniku a termiku. Tak jako je v mechanice dominujícím pojmem hmota a její pohyb v makroskopickém smyslu, v termice tepelný pohyb s novým znakem hromadnosti a neuspořádanosti pohybu hmoty, tak ve fyzikální akustice je základním principem pohyb „akustických částic“ v poli nekonečného množství elementárních oscilátorů, vyjádřený pojmem „vlnění“.

Má-li se opírat vyvození pojmu vlnění a pojmu akustické pole o reálnou skutečnost a mají-li být názorně demonstrovány a při vyšších nárocích studovány a analyzovány fenomenologické vlastnosti vlnění — způsoby jeho vzniku, šíření, odrazu, lomu, interference — je nutno vybudovat soustavu prostředků, které by postupně vytvářely reálné jevy jako modely na různé úrovni abstrakce.

Vývoj elektroakustické lavice sledoval realizaci takové soustavy, která by mohla s ekonomickou souborností modelovat jevy vlnění, vytvářet modely akustického pole s jeho typickými složkami intenzivními a extenzivními, energetickými a přenosovými. Má umožňovat studium vzájemných souvislostí jevů probíhajících v akustickém poli, a to jak fenomenologické makroděje, tak vnitřní děje, pro které neexistuje přímý odraz a které musí být sdělovány zprostředkovaně.

Obecné záměry realizace soustavy vycházejí z těchto požadavků:

- a) vyvinout jednotný celek univerzálních vlastností
- b) vyvinout soubor prvků a prostředků, kde audiální vjemy je možno současně kombinovat s vjemy vizuálními použitím projekce, oscilografického zobrazení, optické indikace a grafické registrace
- c) zavést částečnou automatizaci (posuvy prvků, časové vyhodnocování, obrazová dokumentace)
- d) kvalitativní stránky jevů rozšířit o možnost stanovení kvantitativních vztahů
- e) sledovat perspektivní možnost rozšíření funkcí na oblast ultrazvukovou, oblast jevů elektromagnetických vln centimetrových vlnových délek, oblast optických jevů.

Souprava má tvořit pohotový soubor, který je schopen demonstrovat jevy vlnění různých fyzikálních oborů po záměně funkčních prvků.

Vnější uspořádání soustavy v podobě „lavice“ není samočelné. V akustice stejně jako v optice nelze rychle a spolehlivě demonstrovat jevy cestou improvizace, zvláště ne jevy se sledovanou kvantitativní složkou. Vzájemná poloha prvků

a jejich fixace je v akustice stejně jako v optice velmi citlivá a nelze ji zajistit improvizací. Navíc v akustice je často nutno pohyb prvků soustavy v akustickém poli řídit dálkovým ovládáním. Náročnost těchto požadavků bude zřejmá z dalších částí pojednání.

2.1. Obecné požadavky na technické vlastnosti nové demonstrační a měřicí soupravy pro vyučování akustice

Vývoj soupravy vycházel z těch podmínek, za kterých bude souprava pracovat, a z požadavků kladených na kvalitativní ukazatele funkcí prvků soustavy.

a) Akustická souprava má být používána v uzavřeném prostoru učebny nebo laboratoře, který po stránce akustické není upraven a často je prostorem akusticky nevhodným. Akustické pole v takovém uzavřeném prostoru je nehomogenní v důsledku několikanásobných odrazů od stěn a předmětů. Prostory větší objemové rozložitosti vykazují značnou dobu dozvuku a malou akustickou pohltivost, zvláště pro nízké kmitočty. Tyto okolnosti znesnadňují jakákoliv měření v otevřených akustických polích, a tím vyučování akustice ochuzují o nejpodstatnější část názorného sdělování v oboru fyzikální akustiky.

b) Akustické pole, uměle vyvolané při realizaci jevů, je při výuce narušováno nežádoucími akustickými projevy, které spadají kmitočtově do široké spektrální oblasti. Je to řeč učitele, hluk žáků, vnější rušivé vlivy, doprovodné hluky mechanických pohybů žáků, učitele, předmětů apod.

c) V obráceném sledu zvuky vyzařované soustavou při její činnosti maskují řeč učitele a jsou nepříjemně rušivé, zvláště při vyšší úrovni hlasitosti a při dlouhodobém monotonním trvání, jak to některé demonstrační a hlavně měřicí úkony vyžadují.

d) Vlnové délky příslušné akustickým kmitočtům se pohybují od několika metrů do několika centimetrů. V učebně nebo laboratoři s omezenými prostorovými rozměry není možno pracovat s většími vlnovými délkami.

e) Struktura a homogenita akustického pole je narušována pohyblivými objekty. Při studiu akustického pole narušuje jeho homogenitu i identifikační prvek, je-li jeho velikost větší než vlnová délka zvukové vlny.

f) Sondou identifikovaný stav pole není možno bezprostředně prokázat audiálním vjemem. Při značném zesílení akustického signálu zachyceného sondou nelze signál bezprostředně reprodukovat v téže místnosti, neboť dochází k akustické vazbě mezi zářičem a sondou.

Při vývoji soustavy bylo nutno najít způsob řešení, který by všechny jmenované rušivé vlivy vyloučil. Soustava má použít moderních elektroakustických prvků a vyhnout se zastaralým prvkům a metodám klasickým.

Jedním z principů, odstraňujících rušivé vlivy při práci s otevřeným akustickým polem je volba úzkého kmitočtového pásma v oboru kmitočtů 10 kHz až 16 kHz, ve kterém mají příslušné vlnové délky hodnoty cca 3 až 2 cm. Vyžaduje-li to specifický případ jevu, může být kmitočtový rozsah rozšířen dolů ke kmitočtům 200 Hz a nahoru až po hranici 60 kHz. K volbě vysokých pracovních kmitočtů v okolí horní hranice slyšitelnosti vedly tyto důvody: Omezený prostor místnosti a omezený rozměr lože lavice (150 cm). Pracovní prostor daný geometrickými rozměry lavice je roven přibližně 30 až 50 vlnovým délkám. Většina jevů probíhá v prostoru odpovídajícím pěti až desíti vlnovým délkám. Rušivé okolí pracovního prostoru (stěny místnosti, předměty, osoby) je v účinné vzdálenosti 200 až 500 vlnových délek a jeho rušivý vliv je mizivý. Interferenční jevy

vzniklé v uzavřené místnosti ruší tím méně, čím je volena kratší vlnová délka pracovního signálu, neboť u vysokých kmitočtů dochází k žádoucí absorpci zvukové vlny ve vzduchu, která vzrůstá s druhou mocninou frekvence. Odražené vlnění má již malou intenzitu a jeho odraz na stěnách a předmětech je pro tyto vlnové délky difuzní. Pro uvedenou kmitočtovou oblast 10 kHz až 60 kHz je možno vyvinout miniaturní a velmi účinné selektivní snímače akustického pole, které dovolují pracovat i v poli s nízkou úrovní hlasitosti. Malá citlivost sluchového orgánu v kmitočtové oblasti těsně pod hranici slyšitelnosti a dostačující nízká úroveň hlasitosti pracovního signálu zabraňují vzniku nepříjemného rušivého vjemu. Při vysokých kmitočtech vyzařovaných akustickým zdrojem dochází k výhodnému směrovému vyzařování akustické energie. Akustická energie je soustředěna do úzkého svazku a při jejím směrování se omezí vliv odrazů na dílčích částech lavice a okolí. Selektivní citlivost akustických sond vylučuje nežádoucí vliv rušivého akustického pozadí.

2.2. Návrh a řešení elektroakustické lavice a jejího příslušenství

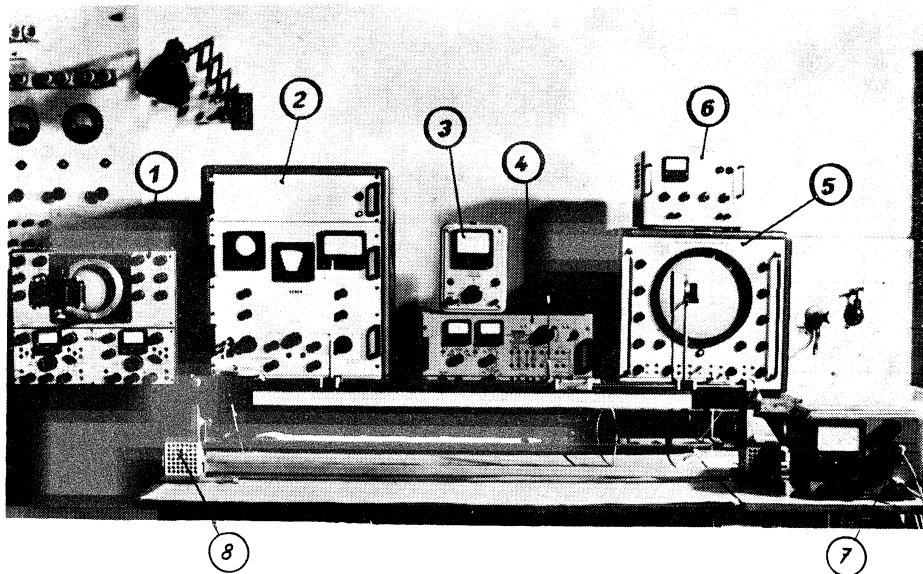
Mechanická část soupravy

Provedení a vnější vzhled jsou zřejmé z fotografií F1, F2 a F3. Základní část tvoří lože lavice, vytvořené dvěma rovnoběžnými hlazenými tyčemi kruhového průřezu, délky 150 cm, po kterých se posouvá soubor jezdců, nesoucích prvky soupravy (F1). Posun jezdců je dálkově ovládán tažnými lanky, která obepínají kladky na obou koncích lože. K posouvání jezdců je možno použít buď ručního ovládání kladkou 2 (F2), nebo pohonu elektrického synchronním motorem s proměnnými otáčkami (F6). Posuvná rychlost je proměnná v širokých mezích. Hlavní jezdec 2 (F3) je lehce posouvatelý na kuličkových ložiskách a unáší elektromagnetický zapisovací systém 5, který prostřednictvím táhla 6 a trubičkového pera 7 píše záznam na průhledný papír, podložený na skleněné desce 7 (F2, F4). Skleněnou desku je možno natočit do průčelné roviny a psát záznam viditelný zředu. Hlavní jezdec unáší akustickou sondu zasazenou do konektoru 1 (F3). Soubor pomocných jezdců nese jiné pomocné prvky (zářič, držák tyčí, odrazové plochy aj.). Průčelní plochy všech jezdců jsou opatřeny noniem 8 (F3). Někteří jezdcé mají na zadní ploše elektrický kontakt, který se posouvá podél odporového drátu 4 (F3) děliče napětí, ze kterého může být odebírán referenční elektrický signál pro časovou osu osciloskopu.

Mezi čely lavice je na průčelní stěně instalováno ocelové pravítko 3 (F3) se dvěma stupnicemi, hrubou s dělením na cm a přesnou s milimetrovým dělením, vyrytou na zkosené ploše pravítka. Proti přesné stupnici se posouvají nonie jezdců a poloha jezdců může být odečítána s přesností na desetinu milimetru.

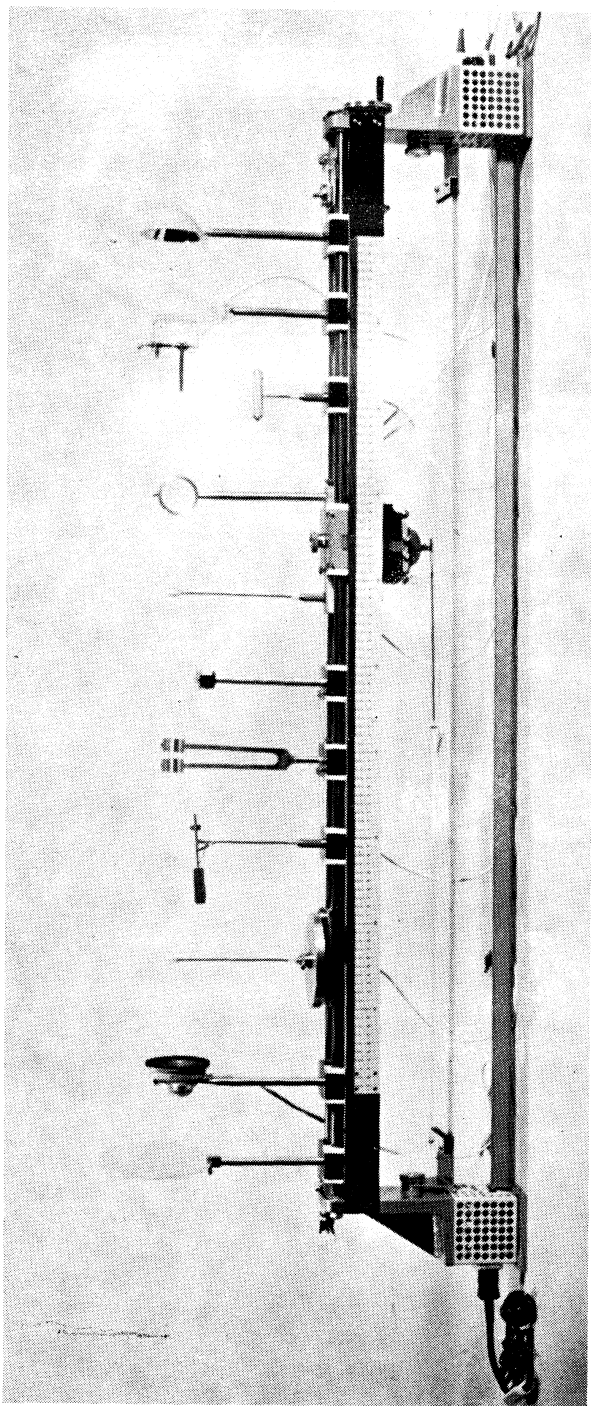
Posuv jezdců na lavici může být sprážen s pohonem tónového generátoru nebo s osciloskopem. Změny polohy prvků na lavici jsou synchronní se změnami kmitočtu v prvním případě a ve druhém je synchronně vychylována světelná stopa na stínítku osciloskopu. Fotografie F7 ukazuje sprážení tónového generátoru TESLA BM 218 s náhonem lavice pro účel stanovení a současného zápisu kmitočtové charakteristiky sondy nebo zářiče.

Tónový generátor je upraven pro jemné rozladování v okolí zvoleného kmitočtu na rozsahu 2 kHz až 20 kHz. K jednomu z doladovacích trimrů přemostěného zpětnovazebního článku T generátoru je připojen otočný vzduchový kondenzátor 30 pF s lineárním průběhem charakteristiky. Jemného otáčení je dosaženo šrou-

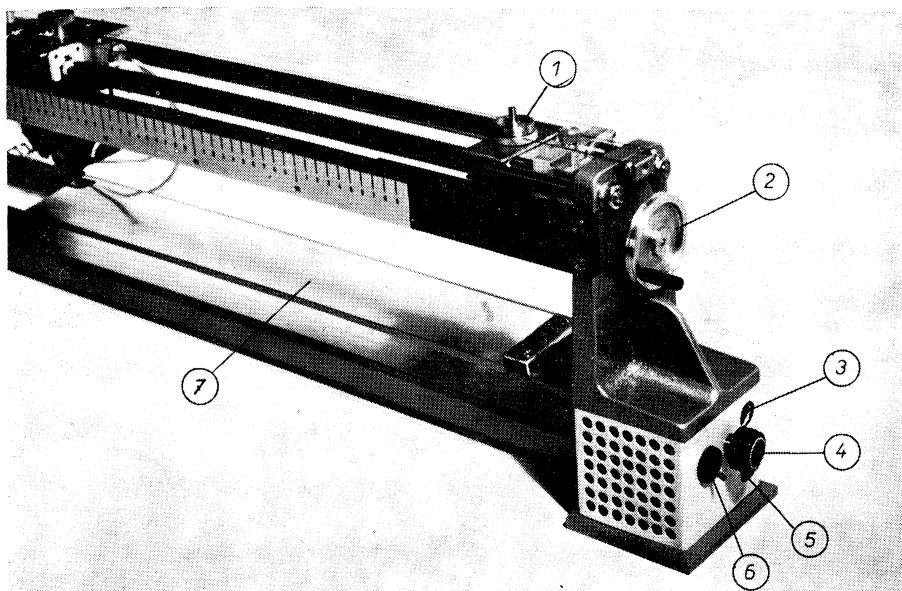


F0

Část vývojového pracoviště. (1 – dvojkánalový osciloskop, 2 – přesný tónový generátor, 3 – elektronkový milivoltmetr, 4 – regulovatelný zdroj síťového napětí, 5 – osciloskop s dlouhodobým dosvitem, 6 – předzesilovač a generátor časových značek pro osciloskop OPD, 7 – pracovní zesilovač elektroakustické lavice, 8 – podstava lavice se zesilovačem zapisovače)

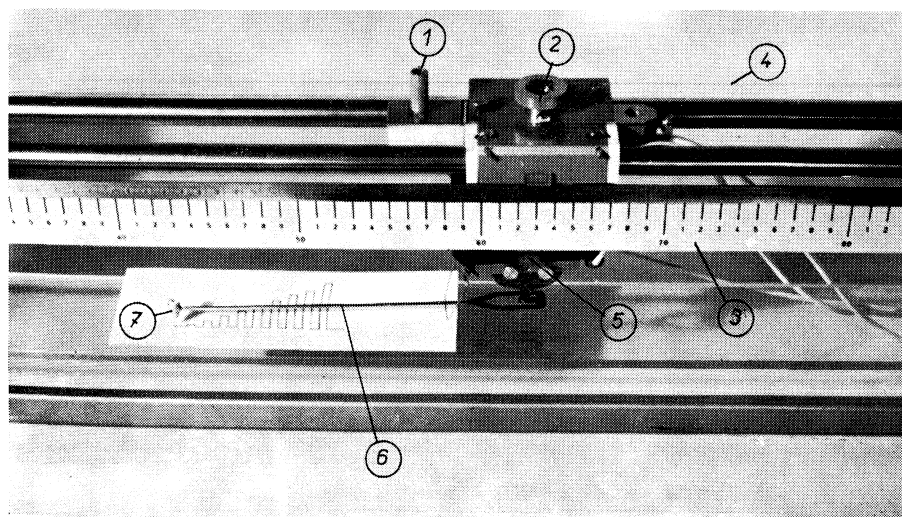


F1
Lože elektroakustické lavice s jezdcí a některými prvky soupravy



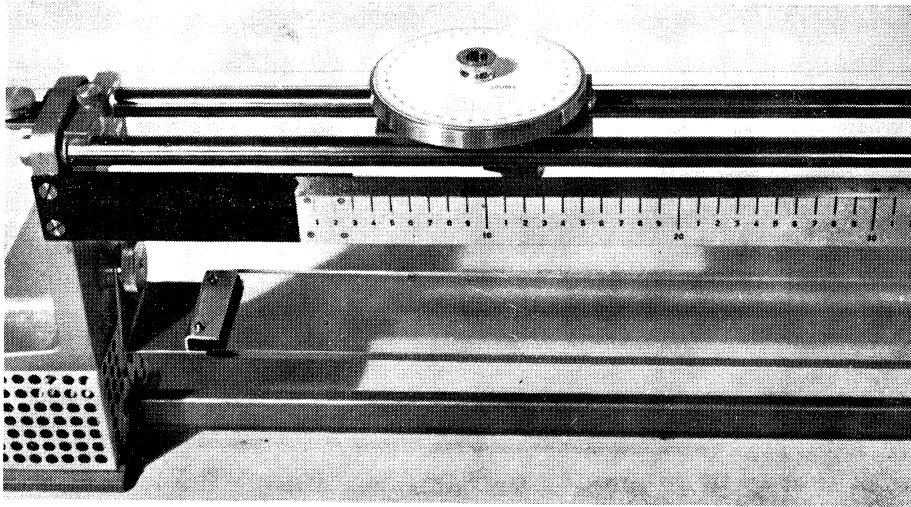
F2

Pravé čelo lavice s ovládacími prvky. (1 – šnekový převod pro záznam rezonančních křivek, 2 – ovládací kladka posunu jezdců, 3 – vstupní konektor zesilovače zapisovače, 4 – regulátor amplitudy záznamu, 5 – výstupní konektor pro připojení zapisovací hlavy, 6 – vypínač detektoru, 7 – podložní skleněná deska zapisovacího zařízení)

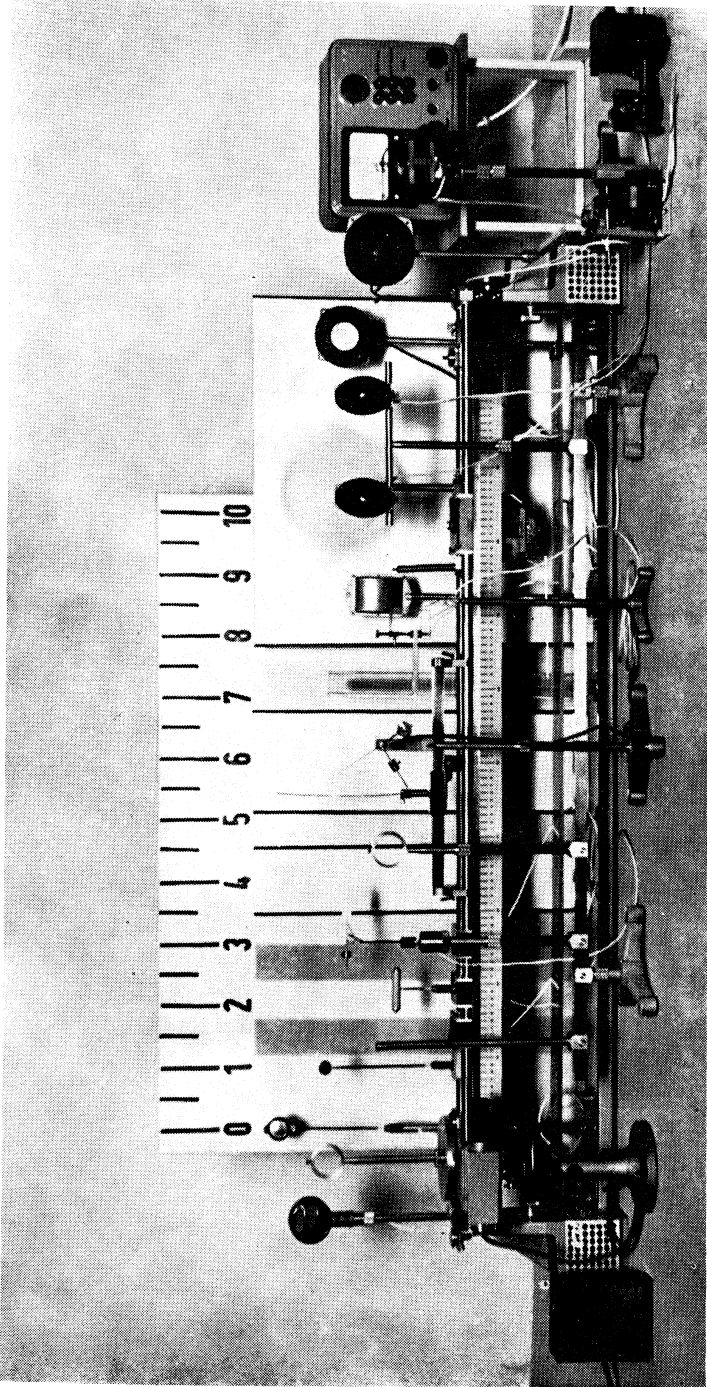


F3

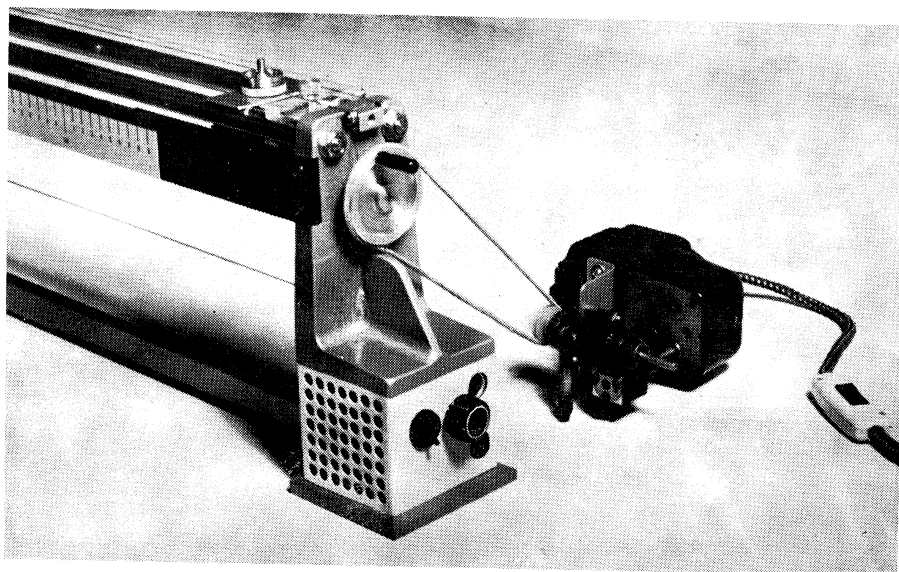
Hlavní jezdec lavice se zapisovačem. (1 – konektor pro zasouvání elektroakustické sondy, 2 – držák zapisovače, 3 – hrubé a přesné měřítko, 4 – drátový potenciometr, 5 – elektromagnetický zapisovač, 6 – rameno zapisovače, 7 – písátko zapisovače)



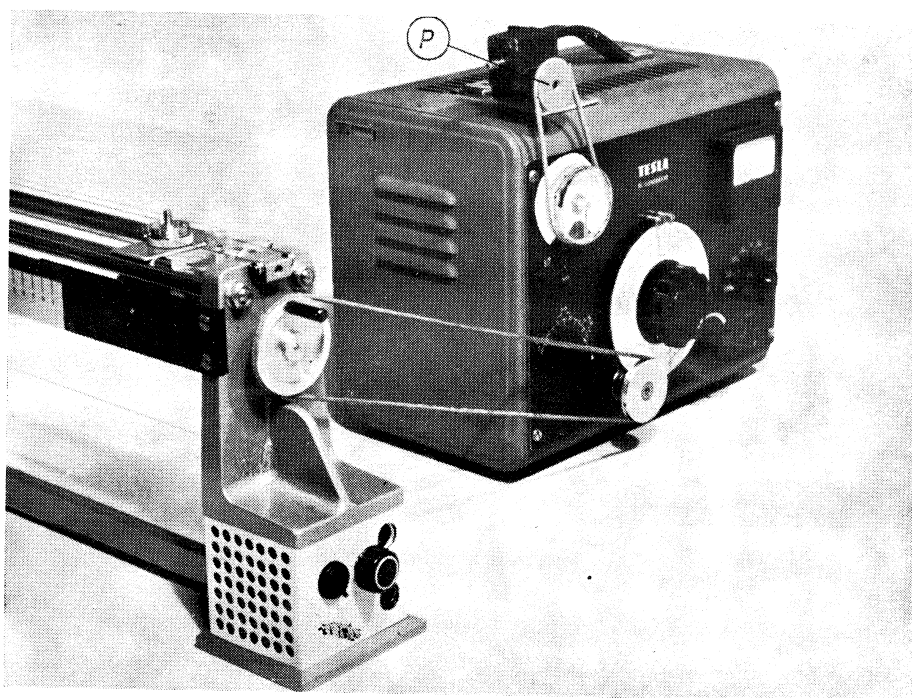
F4
Levá podstava lavice a otočný stolek s úhloměrnou stupnicí



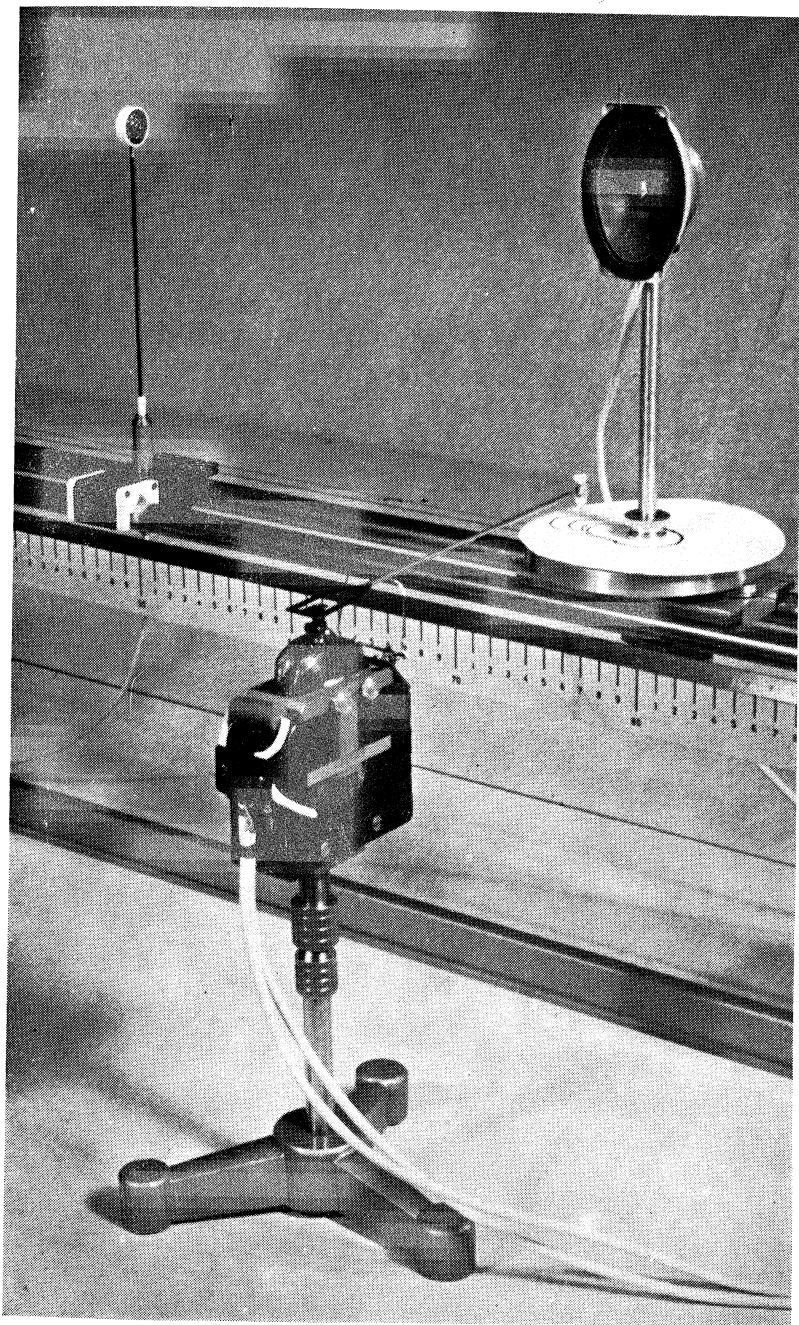
F5
Elektroakustická lavice se základními prvky



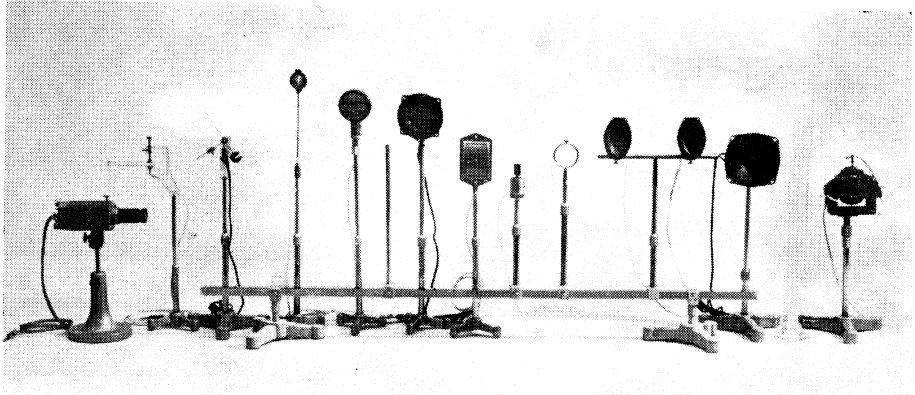
F6 Prává podstava lavice ve spojení s elektrickým posunem hlavního jezdcé



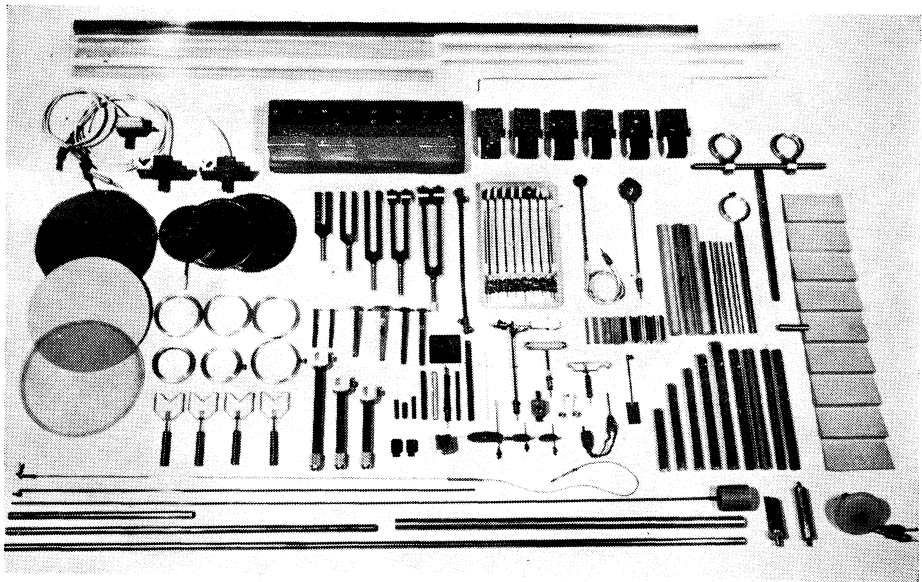
F7 Sprážení tónového generátoru s posuvným systémem lavice



F8 Uspořádání prvků při záznamu křivek v polárních souřadnicích v případě snímání vyzářovací charakteristiky elektroakustického zářiče



F9
Pomocné rameno lavice a soubor výsuvných držáků prvků



F10
Drobné příslušenství lavice

bovým převodem P (F7). Převod může být spojen ohebnou hřídelí s posuvným zařízením zapisovače. Dosáhne se jemného rozladování generátoru se současným posunem zapisovače. Zařízení slouží ke stanovení a záznamu rezonančních křivek oscilátorů při interferenčních měřeních a v jiných případech, kde je nutné plynulé jemné rozladění.

Na loži lavice je možné kdekoliv umístit převodový systém s kruhovým talířem (F4) s úhломěrnou stupnicí. Posuvný pohyb tažného lanka se převádí na otáčivý pohyb talíře. Příslušné funkční prvky (zářič, snímač, odrazová deska, soustava zářičů, zrcadlová plocha aj.) se upevňují do konektoru ve středu talíře.

K mechanické části lavice přísluší soubor stojánků s výsuvnými tyčemi, různé držáky, trubkový nosník s rytou centimetrovou stupnicí, používaný jako rameno kolmé k loži lavice, dále soubor akustických stínidel a jiných pomocných prvků (F10).

V obr. F8 je znázorněno uspořádání pro záznam v polárních souřadnicích.

Elektronická část soupravy

Elektroakustické prvky lavice jsou při své funkci vázány na jiná elektronická zařízení a přístroje. Některé elektronické přístroje pocházejí ze základního vybavení komerčního (tónový generátor, osciloskop, magnetofon). Pro náročnější práce je použito přesného zdroje kmitočtů, nízkofrekvenčního voltmetru, dvoukanálového osciloskopu, osciloskopu s dlouhodobým dosvitem, elektronkového přepínače, generátoru obdélníkových kmitů, měřiče frekvence, fázoměru, kmitočtového modulátoru aj.

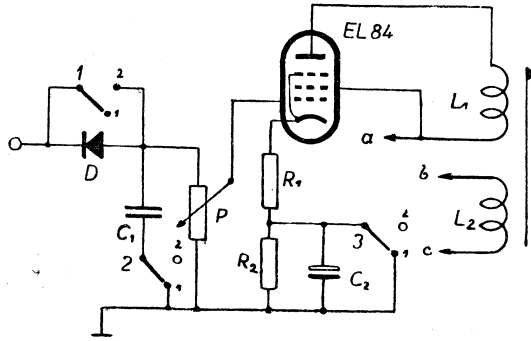
Pro speciální funkce prvků elektroakustické lavice bylo třeba vyvinout víceúčelové elektronické příslušenství, které by všestranně poskytovalo několik specializovaných funkcí. S přihlédnutím k speciálnosti požadovaných funkcí elektronické části soupravy elektroakustické lavice byl v rámci výzkumných prací realizován vlastní návrh a konstrukce elektronického příslušenství. Elektronické doplňky tvoří dva samostatné celky:

1. elektronický výkonový stupeň zapisovače
2. univerzální víceúčelový pracovní zesilovač

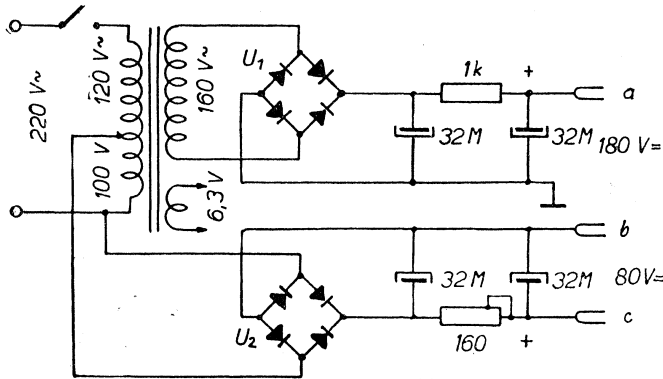
Elektronický výkonový stupeň zapisovače, jeho návrh a řešení

Ke grafickému zápisu stavu akustického pole snímaného akustickou sondou je použito elektromagnetického zapisovacího systému (komerční prvek kardiografu Karditest). Sestává z otočné části uchycené na robustním torzním pásku s velkým torzním momentem. Otočná část je umístěna v magnetickém poli mezi polovými nástavci permanentního magnetu, mezi dvěma pevnými cívkami souměrně uspořádanými. K vyvinutí dostatečné síly pro vychýlení ramene zapisovače je potřeba značného příkonu. Při záznamu tepelnou jehlou 5 cm dlouhou sleduje zapisovač bez setrvačnosti frekvence do 150 Hz. Při zápise trubičkovým perem, vedeným na rameni 20 cm dlouhém, je horní hranice 20 Hz.

Méně obvyklé řešení výkonového zesilovače pro zapisovač je schematicky naznačeno v obr. 1. Řešení je jednoduché a zaručuje pracovní výchylku, která je lineární až do amplitudy hrotu velikosti 5,5 cm. Celý zesilovač je umístěn v podstavách čel lože lavice. Jak je zřejmo ze schematického nákresu, je v zesilovači použito elektronky EL 84, v jejímž anodovém obvodu je zařazeno jedno z vinutí L_1 zapisovače. Vinutí L_1 je pracovní. Cívkou L_2 protéká proud opačného směru,

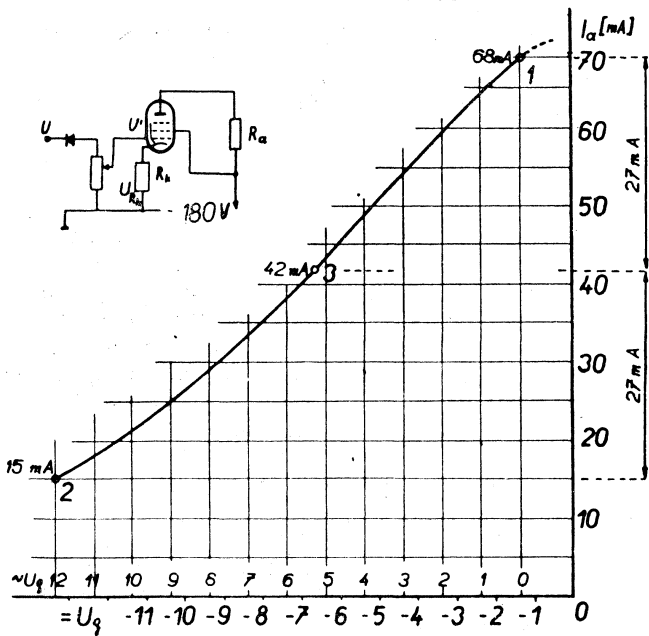


Obr. 1



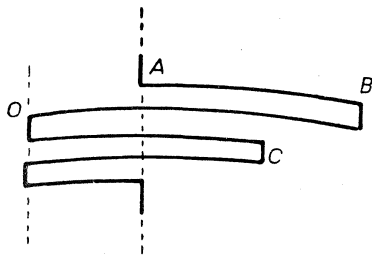
Obr. 2

odebíraný ze samostatného zdroje, obr. 2 (svorky *b*, *c*) přes vyrovnávací odpor 160 ohmů. Střídavý řídicí signál je při poloze 1 přepínačů 1, 2, 3 v obr. 2 detekován členy *D*, *P*, *C*₁ a přiváděn na řídicí mřížku elektronky EL 84. Vzhledem k malému katodovému odporu ($R_1 = 20$ ohmů) leží pracovní bod na mřížkové charakteristice v bodě 1 na obr. 3, tj. na počátku oblasti náběhového proudu.

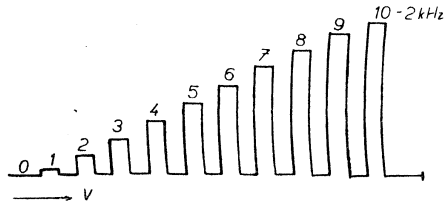


Obr. 3

Mírná záporná proudová vazba linearizuje průběh charakteristiky elektronky. Záporné řídicí napětí, odebírané po detekci z potenciometru P , posouvá pracovní bod z bodu 1 do bodu 3. Změna anodového proudu je téměř lineárně úměrná velikosti střídavého vstupního napětí. Nelinearita charakteristiky detekční diody D a elektronky se při tomto zapojení téměř kompenzují, neboť jsou přibližně zrcadlové. Odezva výchylky zapisovacího hrotu je znázorněna přímým zápisem v obr. 4. Po zapojení na síť vznikne vlivem napětí na L_2 výchylka hrotu z polohy A do polohy B . Po nahřátí katody elektronky naroste pozvolna anodový proud, tekoucí vinutím L_1 , a zapisovací hrot přejde do bodu 0, odpovídajícímu nulové linii zápisu. Při zvyšování vstupního signálu vzrůstá lineárně úměrně výchylka zapisovacího hrotu až do bodu C . Výslednou citlivost a linearitu zápisu ukazuje přímý zápis na obr. 5. Amplituda grafického zápisu je konstantní v oboru kmitočtů 200 Hz až 200 kHz.

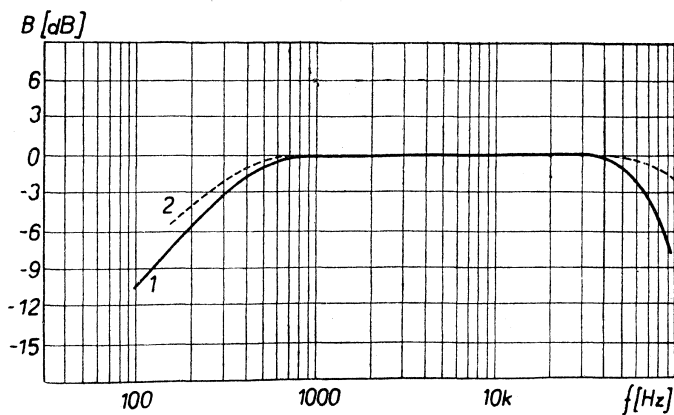


Obr. 4



Obr. 5

Výkonového zesilovače zapisovače je možno použít jako samostatného výkonového stupně pro zesílení střídavých akustických frekvencí. Přepnutím přepínačů 1, 2, 3 v obr. 1 do polohy 2 je místo vinutí L_1 připojen vnější transformátor o impedanci cca $2\text{ k}\Omega$ s převodem pro zátěž 10 až 15 ohmů. Místo výstupního transformátoru je možno připojit ohmický odpor $2\text{ k}\Omega$, ze kterého je odebíráno pracovní napětí přes oddělovací kondenzátor pro napájení kondenzátorového záříče při práci v ultrazvukové oblasti. Kmitočtové charakteristiky udává obr. 6

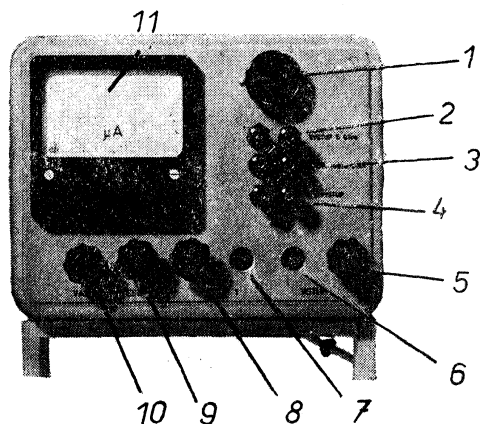


Obr. 6

Křivka 1 odpovídá zátěži 10 ohmů na sekundární straně výstupního transformátoru. Propustné pásmo dosahuje až do 70 kHz. Křivka 2 udává šířku propustného pásma pro lineární zátěž 2 k Ω .

Návrh a řešení univerzálního pracovního zesilovače pro elektroakustickou lavici

Pro různé varianty práce na elektroakustické lavici bylo nutno vyvinout pracovní elektronickou soustavu se speciálními funkcemi, jak je práce s lavicí vyžaduje. Při návrhu bylo počítáno se všemi alternativami funkcí jak v oboru slyšitelných kmitočtů, tak v oblasti ultrazvukové. Navržená souprava zpracovává přímým způsobem kmitočty od 150 Hz do 35 kHz. Při kmitočtech vyšších používá soustava principu modulace nebo transpozice pracovního kmitočtu. Funkce soustavy je inverzní; soustava zpracovává vstupní signál jako odezvu akustického jevu, který zesiluje a jehož velikost indukuje na výstupním měřidle, nebo obráceně — budí akustické pole s kontrolovanou velikostí budící elektrické složky, jejíž velikost indukuje na výstupním měřidle. Vnější provedení ukazuje obr. 7.



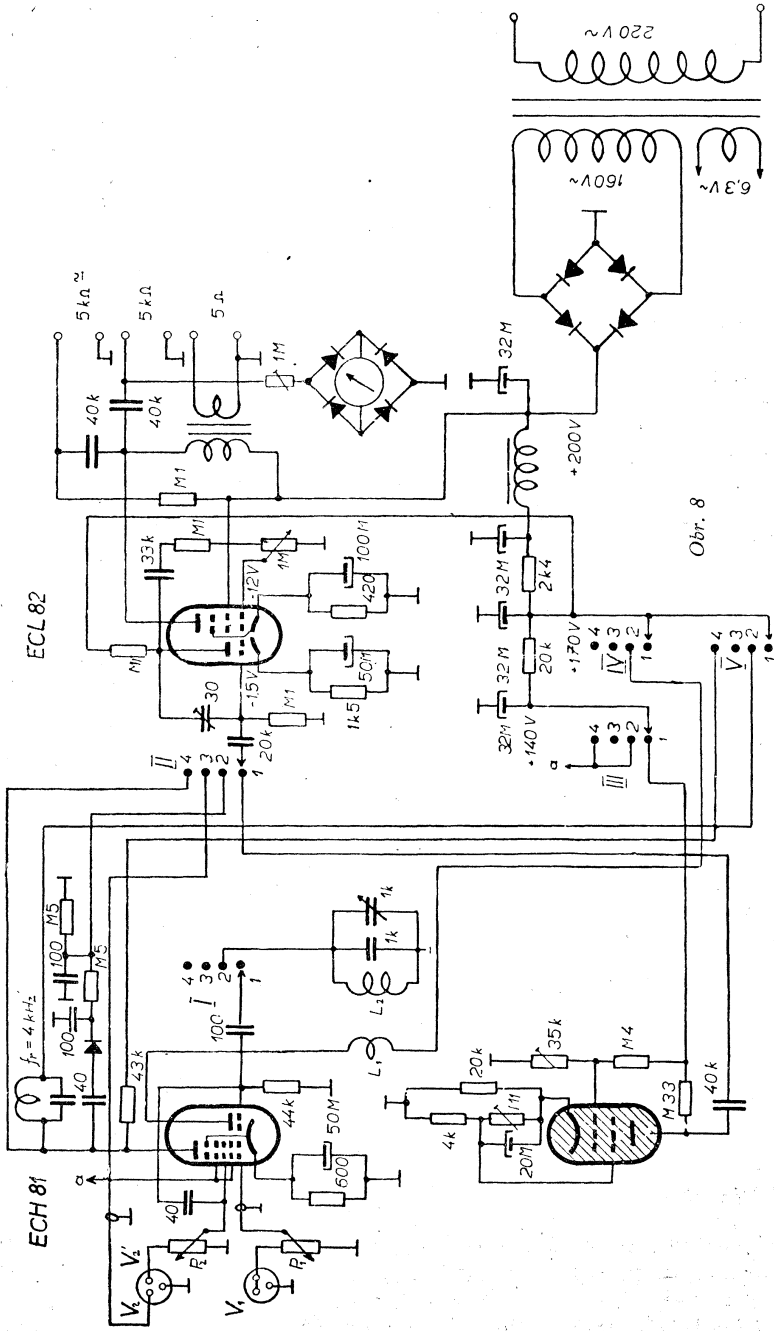
Obr. 7 Pracovní zesilovač elektroakustické lavice

Na čelním panelu jsou tyto ovládací prvky: 1 — ladící kondenzátor oscilátoru, 2 — výstup 5 ohmů, 3 — výstup 5 k Ω , 4 — výstup pro kondenzátorový reproduktor, 5 — regulátor vstupu V_2 , 6 — vstup V_2 , 7 — regulátor vstupu V_1 , 8 — vstup V_1 , 9 — regulátor citlivosti vstupu koncové elektronky, 10 — přepínač funkcí, 11 — stupnice měřiče výstupního napětí.

Pro speciální funkce elektroakustické lavice poskytuje elektronická soustava pracovního zesilovače tyto funkční možnosti:

1. Šumový generátor
2. Měníč kmitočtu
3. Nízkofrekvenční zesilovač s citlivostí 70 mV
4. Nízkofrekvenční zesilovač s citlivostí 5 mV
5. Interferometr
6. Fázoměr

Ze schematického nákresu v obr. 8 je patrné výsledné řešení soustavy.



Poloha přepínače 1. Šumový generátor

Segment III přepínače funkcí zavádí v poloze 1 anodové napětí na elektronku 21TE31 (tyratron). Elektronka pracuje ve funkci tyratronového generátoru šumu. Po seřízení napětí první a druhé mřížky tyratronu pomocí nastavitelných odporů v příslušných mřížkových obvodech generuje tyratron spojité spektrum kmitočtů od 100 Hz do 50 kHz. Signál je převáděn z anody tyratronu na vstup nízkofrekvenčního zesilovače ECL 82 segmentem přepínače II. Reprodukter, připojený na výstupu zesilovače vyzařuje široké spektrum kmitočtů, které svým složením je analogické bílému světlu v optice a v elektroakustice se nazývá bílý šum.

Poloha přepínače 2. Měnič kmitočtu

Při práci v ultrazvukové oblasti umožňuje měnič kmitočtu transponovat neslyšitelný akustický projev na slyšitelný. Při nastavení této funkce pracuje elektronka ECH 81 jako měnič kmitočtu. V heptodové části jsou směřovány dva signály o kmitočtech f_1 a f_0 , které dávají výslednou frekvenci součtovou nebo rozdílovou $f_r = \pm f_0$. Rozdílový kmitočet f_r spadá do slyšitelné oblasti akustického spektra. Signál o kmitočtu f_1 je odebrán z akustického snímače, signál f_0 dodává triodový oscilátor. Podmínky jsou voleny tak, aby platilo

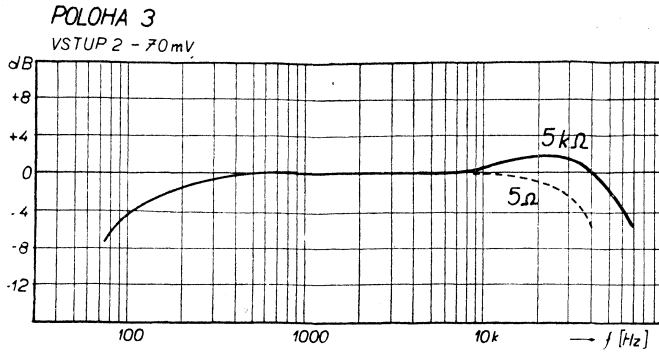
$$f_r = (f_1 - f_0) = 4 \text{ kHz} = \text{konst.}$$

Segment I v poloze 2 připojuje k mřížce triodového systému elektronky ECH 81 laděný obvod s plynule proměnným rezonančním kmitočtem $f_0 = 17\,800$ Hz až 25 500 Hz. Laděný obvod je buzen pozitivní zpětnou vazbou přes vazební cívku L_2 v anodovém obvodu triody. Triodová část elektronky tvoří oscilátor směšovače.

Napětí oscilátoru, jehož vhodná velikost je nastavitelná velikostí svodového odporu mřížky triody, je přiváděno vnějším obvodem přes vazební kapacitu 40 pF na mřížku g_3 heptody. Potenciometr P_2 je vytočen na plnou hodnotu odporu. Na mřížku g_1 heptody je přiváděno vnější napětí ze vstupu potenciometru P_1 , odpovídající kmitočtově signálu f_1 , který má být transponován od oblasti slyšitelné. V anodě heptody je jako pracovní zátěž zapojen selektivní laděný obvod s rezonanční frekvencí $f_r = 4$ kHz. Napětí na obvodě je detekováno diodovým detektorem. Výstup detektoru je spojen se vstupem zesilovače ECL 82. Na výstupu pracovního zesilovače je pak k dispozici zesílený slyšitelný signál 4 kHz, který může být použit k přímé reprodukci. Nedochozí k mikrofonní vazbě, což je druhou výhodou směšovací metody. Soustava je citlivá pouze na úzkou kmitočtovou oblast kolem frekvence f_1 vstupního signálu.

Poloha přepínače 3. Zesilovač 70 mV

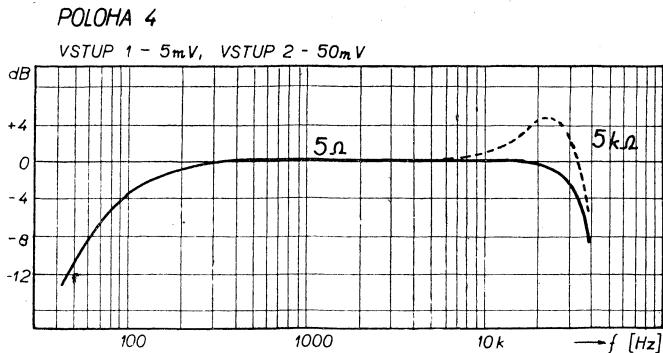
Při nastavení přepínače funkcí do polohy 3 je v činnosti pouze širokopásmový zesilovač s elektronkou ECL82. Kmitočtovou charakteristiku udává obr. 9. Z průběhu křivek je vidět, že zesilovač zpracuje kmitočtovou oblast do 35 kHz při nízkohmové zátěži a do 55 kHz při zátěži vysokohmové.



Obr. 9

Poloha přepínače 4. Zesilovač 5 mV. Interferometr. Fázoměr.

Heptodové části je využito jako předzesilovače vstupního napětí pro výstupní zesilovač. Poskytuje patnáctinásobné zesílení vstupního signálu, přiváděného na mřížku g_1 vstupu V_1 . Pracuje s citlivostí 5 mV pro plné vybuzení soustavy. Kmitočtovou charakteristiku uvádí obr. 10.



Obr. 10

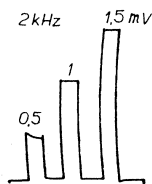
Druhý vstupní signál je možno přivést na třetí mřížku g_3 heptody přes potenciometr P_2 na vstup V_2' . Citlivost na g_3 je 50 mV a průběh kmitočtové charakteristiky je stejný jako pro g_1 . Pomocí potenciometrů P_1 a P_2 je možno směřovat oba signály vstupní. Smíšený signál je odebrán z anody heptody, v jejímž obvodu je v tomto případě zařazen ohmický pracovní odpor segmentem přepínače V , zatím co laděný obvod je vypojen. Detektor, který zůstává zapojen, je mimo funkci, snižuje nepatrně úroveň signálů o frekvenci nad 20 kHz a není třeba jej vypínat.

Při směřování dvou vstupních koherentních signálů harmonického průběhu je možno stanovit jejich vzájemnou fázi podle výchylky výstupního měřidla. Fázové posunutí lze stanovit ze známých velikostí amplitud srovnávaných složek a velikosti amplitudy výsledné.

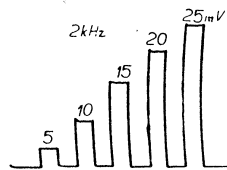
Mají-li vstupní signály frekvence různé, vzniknou rázy. Nulová frekvence rázů indikuje kmitočtovou shodu obou směřovaných signálů. Počet vzniklých záznejů indikuje kmitočtovou diferenci obou signálů.

Spojení zapisovací soustavy a pracovního zesilovače. Výsledné vlastnosti a jejich ověření

Výkonový zesilovač zapisovací soustavy potřebuje k plnému vybuzení vstupní napětí velikosti 10 V. Toto budící napětí je odebíráno na vysokoohmovém výstupu pracovního zesilovače a je redukováno na lineárním potenciometru vstupu zapisovače. Spojením obou elektronických částí vznikne složitá soustava s několika pracovními stupni, vzájemně vázanými členy impedančního charakteru. Vůbou pracovních podmínek je nutno dosáhnout takových vlastností soustavy, aby výsledná informace v podobě grafického záznamu byla adekvátní odezvou napětí vstupního. Přiložené kontrolní testy jsou autentickými zápisy pořízenými na soustavě po její konečné úpravě. Obr. 11a udává závislost výchylky hrotu zapisovače na vstupním napětí na mřížce g_1 heptody. Obr. 11b ukazuje odezvu



Obr. 11a



Obr. 11b

na signál působící na mřížce heptody g_3 . Příslušné křivky udávají současně maximální citlivost soustavy jako celku. Vysoké citlivosti 0,5 mV na 2 cm zápisu lze dosáhnout pouze při přímém spojení zapisovače a tónového generátoru s nízkoohmovým výstupem. Jinak je krajní pracovní citlivost asi 2 mV na 1 cm zápisu.

Použití RC generátoru TESLA BM 218

Zcela nutným příslušenstvím elektroakustické lavice je generátor sinusového napětí, který slouží jako zdroj pracovních signálů harmonického průběhu. Přesto že je konstruován jako zdroj napětí, dovoluje jeho nízkoohmový výstupní odpor ($R_z = 200$ ohmů při rozsahu 10 voltů na výstupních svorkách) využít přístroje jako napájecího zdroje akustických zářičů. Vysoká selektivní citlivost elektroakustických sond, jak bude dále uvedeno, umožňuje pracovat i v akustických polích malých intenzit. K vybuzení akustického pole tedy dostačí malý elektrický příkon zářiče (cca 0,01 VA), který je možno přímo odebírat z generátoru. Generátor TESLA BM 218 má při výstupním napětí 10 V výstupní impedanci 200 ohmů, může tedy poskytnout výkon 0,5 watt. Je nutno dodržet podmínky impedančního přizpůsobení. Je-li R_z výstupní odpor generátoru a R impedance zátěže, platí pro čtverec transformačního poměru přizpůsobovacího transformátoru vztah

$$p^2 = R/R_z.$$

Podmínka latí jak pro přizpůsobení vysokoohmové zátěže, tak nízkoohmové. Je nutno použít kvalitního přizpůsobovacího transformátoru, který má schopnost přenést nezkráceně široké kmitočtové pásmo. Primární impedance transformátoru má být při chodu naprázdno rovna asi trojnásobku výstupní impedance generátoru, a to pro nejnižší přenášené pásmo. Vzhledem k tomu, že transformátor pracuje v oblasti velmi vysokých frekvencí, lze tuto podmínku snadno splnit.

Výběr a vývoj elektroakustických prvků pro elektroakustickou lavici

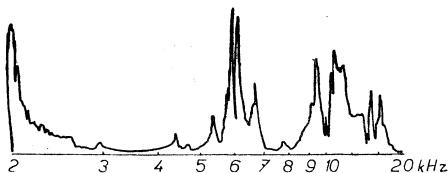
Plánované úkoly kvalitativní i kvantitativní povahy, pro které je souprava elektroakustické lavice konstruována, vyžadují výběr a vývoj pomocných prostředků a funkčních prvků. Některé nové prvky bylo nutno realizovat v dílčí vývojové práci. Jsou to především vhodné elektroakustické snímače akustického pole, snímače chvění, magnetické měniče a soubor zářičů, které by byly schopny pracovat v kmitočtové oblasti 1 kHz až 60 kHz. Pro práce v kapalinách je nutno vyvinout vhodné ponorné zářiče akustického pole a snímače tohoto pole. Soubor některých prvků ukazuje fotografie F9 a F10.

Snímací elektroakustické sondy

Běžné komerční mikrofony není možno použít pro jejich velké rozměry, malý rozsah citlivosti v oblasti vysokých frekvencí a nežádoucí vysokou citlivost v oblasti středních a nízkých kmitočtů. U popisované soupravy jsou použity pouze pro několik málo příležitostí, kdy pracuje souprava v oboru nízkých kmitočtů. Pro práce s elektroakustickou lavicí nevyhověla ani řada miniaturních komerčních mikrofonů pro naslouchací přístroje. Jsou naprosto nevnímavé k vysokým kmitočtům. U nás se nevyrábějí speciální miniaturní sondy pro obor vysokých frekvencí. Zahraniční sondy vyžadují značného zesílení poskytovaného signálu nebo vysoké intenzity akustického pole. Bylo nutno přistoupit k vlastnímu vývoji tohoto základního prvku, na jehož dokonalé funkci závisí úspěch řešení soustavy jako celku.

V obr. 12 jsou zobrazeny dva typy nově vyvinutých sond. Sonda 1 je určena pro identifikaci tlakové složky akustického pole. Sonda 2 je sondou gradientovou a reaguje na akustickou rychlost. Jejich konstrukce je provedena na bázi funkce piezoelektrických elementů pro tento účel speciálně vypracovaných. Piezoelektrický bimorfni člen, vhodných, experimentálně zjištěných vlastností je uchycen v hlavici sondy a spojen s kruhovou membránou průměru 14 mm u starších sond a 7 mm u nových. Bimorfni člen je vytvořen z destiček Seignety soli velikosti 6×6 mm vybroušených na tloušťku 0,1 mm a je opatřen membránou z pěnového polystyrenu. Běžně užívané materiály pro výrobu membrán (duralová fólie, slída, leptaná fosforová bronz aj.) naprosto nevyhověly v oblasti vyšších kmitočtů. Membrány z pěnového polystyrenu se vyznačují značnou mechanickou pevností, nepatrnou setrvačnou hmotou a schopností snadno přenášet na aktivní člen sondy vibrační děje akustického pole. Pracují až do kmitočtu 60 kHz. Velkou výhodou — která umožnila realizaci elektroakustické lavice a realizaci jevů z oboru akustického pole i za pracovních podmínek krajně nepříznivých (jak bylo uvedeno dříve) — je selektivní citlivost sond k úzkým kmitočtovým oblastem. Pro práci na elektroakustické lavici je nutno mít soubor několika sond a na základě známých kmitočtových charakteristik vybírat pro daný účel sondu s vhodnou charakteristikou (obr. 13). Technické podrobnosti vývoje zde nebudou uváděny.

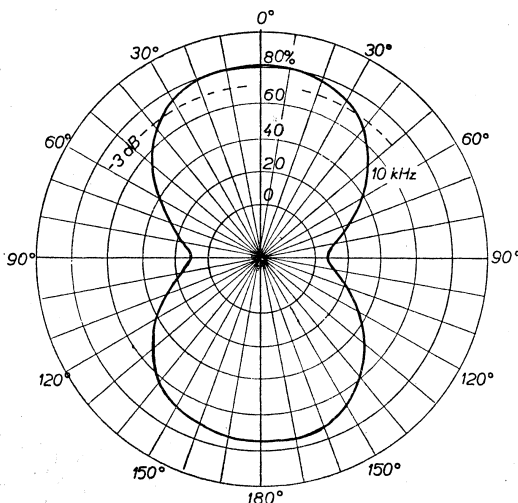
Elektroakustické vlastnosti sond byly sledovány a zaznamenány graficky pomocí zapisovací soustavy lavice (obr. 14). Uvedená křivka odpovídá kombinaci zářič—snímač. V uvedeném případě jde o zářič TESLA ARV 081, který vyzařuje téměř rovnoměrně a spojitě frekvence až do 19 kHz, napájený z generátoru přes přizpůsobovací transformátorek příkonem 20 mW. Akustický tlak v místě



Obr. 14

sondy byl cca $1 \mu\text{bar}$. V rezonančních maximech dosahuje citlivost sondy průměrné hodnoty $3 \text{ mV}/\mu\text{bar}$. Selektivní maxima jsou vyvolána vlastními rezonancemi bimorfního členu a membrány. Citlivost mimo rezonanční oblasti není nulová, je však nižší asi o 20–30 dB. Při práci na lavici je používáno akustických tlaků až $10 \mu\text{bar}$, při kterých dosahuje napětí sond velikosti několika desítek milivolt. Tímto napětím je možno vybudit i méně citlivou elektronickou soustavu, např. osciloskop se vstupní citlivostí $10 \text{ mV}/\text{cm}$. Zvýšení citlivosti sond asi o 6 dB lze dosáhnout po upevnění odrazové plošky ve vzdálenosti $(2n - 1) \frac{\lambda}{4}$ za hlavicí sondy.

Velmi malé rozměry snímacích sond nedeformují akustické pole. Selektivní citlivost zabraňuje rušivému vlivu nízkých frekvencí a mechanických otřesů. Ani hlasitá řeč experimentátora není indikována. Směrová charakteristika je osmičková, jak je zřejmo z autentického záznamu v obr. 15. Odrazová ploška



Obr. 15

zvysuje smerovost, omezuje ji na jeden smer a zabranuje vlivu odrazené zpětné akustické vlny.

U tlakové sondy je bimorfni člen vzduchotěsně uzavřen v prostoru mezi dvěma membránami. Každá z membrán přenáší tlak na protilehlé vrcholy piezoelektrického dvojčete čtvercového tvaru, které je torzně namáhané vnějšími přetlaky na obou membránách.

Pro rychlé sondování akustického pole je používáno sondy s prodlouženým přírodním kabelem (obr. 16).

Pro účely snímání chvění pevných látek je použito rovněž bimorfni členů, uchycených na konci gumové hadičky a opatřených dotykovým hrotem. Orientace výbrusu bimorfniho členu dovoluje identifikovat kmitosměry.

Elektroakustické zářiče

Pro práci na elektroakustické lavici byly vyzkoušeny tyto elektroakustické zářiče:

Elektrodynamické	<	výškové normální tlakové
Piezoelektrické	<	tyčinkové plošné
Magnetostrikční	<	feromagnetické feritové
Elektrostatické	—	kondenzátorové

Jako nejvýhodnější a nejúčinnější se jeví skupina elektrodynamických a piezoelektrických zářičů (F9)

Tesla ARO 131 (5 ohmů, 7 cm, 2 W) pro širší kmitočtovou oblast,

Tesla ARV 081 (5 ohmů, 7 × 5 cm, 1 W) výškový do 19 kHz,

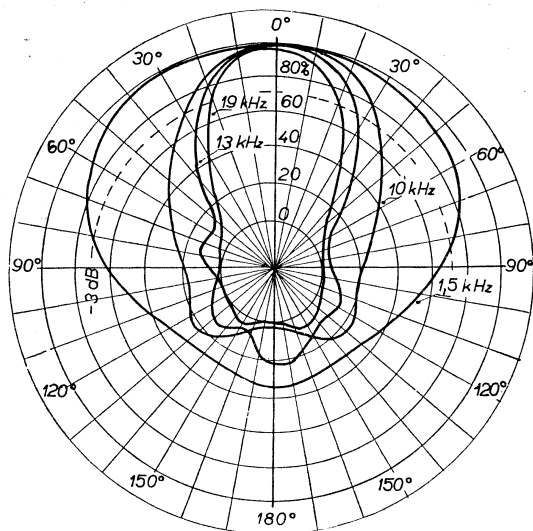
Tesla ARV 231 (10 ohmů, 9 cm, 3 W) výškový do 18 kHz.

Zářiče pracují buď jednotlivě, nebo ve dvojicích. V oblasti nízkých kmitočtů pracují přibližně jako bodové zdroje. V oblasti vysokých kmitočtů pracují jako směrové zářiče se směrovostí vzrůstající s frekvencí vyzařovaného pole. Autentický záznam pořízený na lavici ukazuje v obr. 17 vyzařovací charakteristiky těchto zářičů.

Jako velmi výhodné se jeví použití tyčinkových zářičů piezoelektrických, opatřených rovinnou polystyrenovou membránou. Tyčinky jsou řezány z monokrystalu Seignetovy soli s orientací $X 45^\circ$. Vlastní rezonance tyčinky při podélném chvění je rovna

$$f_l = 2100/l, \quad [\text{kHz}, \text{mm}]$$

Je-li tyčinka uchycena v držáku na jednom konci (F9), je její rezonanční frekvence poloviční. Uchycením tyčinky v různých vzdálenostech od jejího konce lze dosáhnout různých rezonančních frekvencí v rozmezí jedné oktávy. Docílí



Obr. 17

se tak velké vyzařovací účinnosti. Výkon se ještě zvýší při použití odrazové plošky vzdálené od aktivního konce tyčinky o hodnotu čtvrtiny vlnové délky vyzařovaného vlnění.

Kratších piezoelektrických tyčinek je použito jako kontaktních budičů chvění. Krystalový výbrus K je uchycen v držáku D (obr. 18). Jeho délka je volena tak, aby pracoval v podrezonančním oboru, kde pracuje jako prvek prakticky kmitočtově nezávislý. Při buzení pole v pevných látkách doléhá prvek s konstantním tlakem na povrch tělesa, v němž má být vyvoláno chvění. Tlak je řízen závažím Z . Spolu s dotekovým snímačem chvění je tento prvek základním prostředkem při studiu akustických vlastností pevných látek.

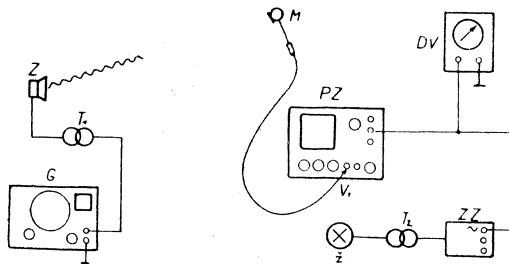
Pro vyzařování kmitočtové oblasti nad 20 kHz je používáno zářičů kondenzátorových. Jejich nevýhodou je, že pracují se superponovanou stejnosměrnou složkou.

Popis jiných zářičů zde nebude uváděn.

3. Některá použití elektroakustické lavice v demonstrační a měřicí technice

3.1. Orientační identifikace akustického pole v okolí akustického zářiče

Soubor prvků uspořádáme podle obr. 19. Zdrojem akustického pole je dynamický zářič Z , napájený z generátoru G přes přizpůsobovací transformátor T_1 . Akustická sonda M přenosného typu je spojena se vstupem pracovního zesilovače PZ , k jehož vysokohmovému výstupu je připojen demonstrační voltmetr DV a současně zesilovač zapisovače ZZ . Výstup zesilovače ZZ je zatížen žárovkou λ (6V, 300 mA) přes výstupní transformátor T_2 .



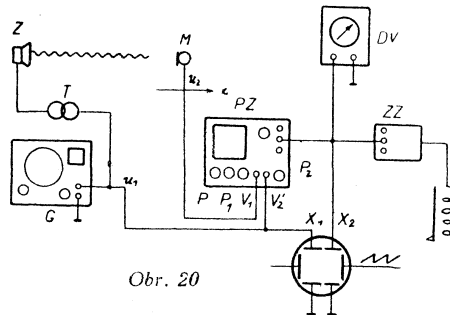
Obr. 19

Sondu M vkládáme do různých míst akustického pole. Žárovka indikuje společně s demonstračním měřidlem a výstupním měřidlem pracovního zesilovače pole v okolí zářiče. Prokáže i existenci pole ultrazvukového. Informačně určí přibližný vyzařovací úhel zářiče při různých kmitočtech a eventuální nehomogenitu pole.

3.2. Vlastnosti postupné akustické vlny

a) Porovnáním obrazů na dvojstopém osciloskopu

Podle obr. 20 umístíme na konci lože akustický zářič Z . Budicí napětí má průběh



Obr. 20

$$u_1 = U_1 \sin \omega t$$

a vyzařované akustické vlnění má časový průběh ekvivalentní budící elektrické složce. Akustická sonda uchycená v pojízdném držáku se posouvá ve směru osy zářiče Z . Sondou snímaný elektrický signál u_2 má průběh

$$u_2 = U_2 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right),$$

který odpovídá stavu postupné vlny v bodě x , šířící se v kladném směru rychlostí c . Fázové posunutí v bodě x je rovno

$$\varphi_x = - 2\pi \frac{x}{\lambda}$$

a pro body $x = k\lambda$ je $\varphi = -2k\pi$, ($k = 1, 2, 3, \dots$). Důkaz $\varphi = \varphi(x)$ identifikujeme na osciloskopu srovnáváním s u_1 . Na jednostopém osciloskopu skládáme u_1 a u_2 ve vzájemně kolmých směrech, což je nevýhodné a málo názorné.

b) Superpozicí s referenčním signálem

Vydeme ze znalosti směšování dvou izochronních harmonických průběhů $u = u_1 + u_2$. Napájecí napětí zářiče u_1 volíme jako referenční s konstantní fází a přivedeme je na vstup pracovního zesilovače V'_2 . Napětí sondy u_2 na vstup V_1 . Při nastavení pracovního zesilovače na funkci IV jsou oba signály směšovány. Jejich superpozicí vznikne výsledný signál u . Nastavíme-li velikost amplitud $U_2 = kU_1$ a volíme-li $k = 1$, bude mít výsledný signál u průběh

$$u = 2U_1 \cos \omega \left(\frac{x}{2c} \right) \sin \omega \left(t - \frac{x}{2c} \right).$$

Amplituda $2U_1 \cos \omega \left(\frac{x}{2c} \right)$ je funkcí souřadnic a nabývá extrémních hodnot v bodech

$$x = (2n - 1) \frac{\lambda}{2}, \quad \text{pro } n = 1, 2, 3, \dots$$

V těchto bodech mají amplitudy U_1 a U_2 opačné fáze a výsledná amplituda $U = U_1 + U_2 = 0$. V bodech

$$x = 2n \frac{\lambda}{2}, \quad \text{pro } n = 0, 1, 2, \dots$$

jsou obě amplitudy soufázové a výsledná amplituda $U = 2U_1$. Vzdálenost minim a maxim identifikovaných sondou je rovna vlnové délce λ . Mezi dvěma maximy nabývá fázový úhel φ hodnot $0 \leq \varphi = 2\pi$. Potvrdíme tak experimentální cestou jednu z důležitých vlastností postupného vlnění, že akustická výchylka v bodě pole P_x je v protifázi s výchylkou v bodech akustického pole, ležících ve vzdálenosti x_1 a x_2 takové, že platí

$$\frac{x_2}{c} - \frac{x_1}{c} = \frac{1}{2} kT, \quad k = 1, 3, 5, \dots$$

a opakuje se ve vzdálenosti

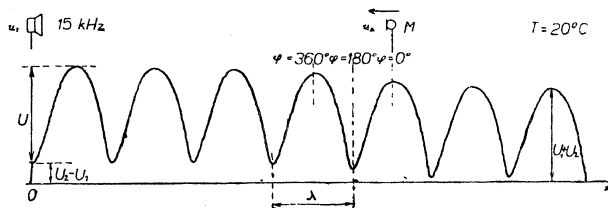
$$x_2 - x_1 = \frac{1}{2} kcT = \frac{1}{2} k\lambda.$$

Výchylka u v bodě P_x je ve fázi s výchylkou v bodech pole, ležících ve vzdálenosti x_1 a x_2 , platí-li

$$x_2 - x_1 = kcT = k\lambda \quad \text{pro } k = 1, 3, 5, \dots$$

Při praktické realizaci jevu volíme pracovní interval $0 \leq x \leq x_n$ v místech pole, kde U_2 je konstantní (v dostatečné vzdálenosti od zářiče). Potenciometr P_1 vstupu V_1 vytočíme na plnou citlivost; potenciometr P_2 , řídící citlivost vstupu V'_2 , na nulu. Potenciometrem P , řídícím celkovou citlivost smíšeného

signálu, nařídíme výchylku výstupního měřidla pracovního zesilovače do poloviny rozsahu stupnice. P_1 stáhneme na nulu a regulátorem P_2 nastavíme stejnou výchylku pro signál u_2 . Amplitudy U_1 a U_2 směřovaných signálů jsou stejné, neboť jsme zvolili $k = 1$. Poté vytočíme P_1 opět na plnou citlivost a oba signály jsou směřovány. Při posouvání sondy M kolísá výchylka ručičky výstupního měřidla v rozmezí $U = 0$ až $2U_1$. Minima jsou ostře vyjádřena. Dodatečně korigujeme velikost $U_1 = U_2$ při nastavení sondy v místě minima současnou pečlivou změnou U_2 a polohy x , až je výsledná výchylka dokonale nulová. Pak je možno s velkou přesností stanovit polohy minim, jejichž vzájemná vzdálenost je právě rovna vlnové délce λ . Těto metody je možno použít k velmi přesnému stanovení fázové rychlosti šíření zvukové vlny. Zapisovací soustavy použijeme k rychlému a instruktivnímu záznamu obalové křivky kladných amplitud, jak jej uvádí přímý záznam v obr. 21.

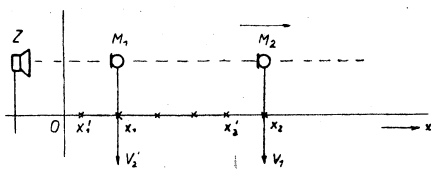


Obr. 21

Je-li v rovnici $U_2 = kU_1$, $k \neq 1$, zůstává v uzlech zbytková složka $|U_2 - U_1|$. Při posuvu sondy k zářiči je $U_2 > U_1$, v opačném směru je $U_2 < U_1$. Principu superpozice referenčního a pracovního signálu je možno využít pro řadu případů analýzy akustických jevů.

c) Zkoumání fázových vlastností pole pomocí dvojice sond

Dvojice sond (obr. 22) M_1 a M_2 umístěných v jedné ose se zářičem Z poskytují signály u_1 a u_2 . Sondu M_1 postavíme do bodu x_1 . Její napětí u_1 přivedeme na vstup V'_2 směšovače a regulátorem P_2 vytočíme plnou citlivost. Poté regulátorem P upravíme výslednou výchylku U výstupního měřidla do poloviny rozsahu



Obr. 22

stupnice. Sondu M_2 postavíme do libovolného bodu. Při vytažené sondě M_1 nastavíme výchylku $U_2 = U_1$. Po zasunutí M_1 posouváme M_2 ve směru osy x . V bodě x_2 vzdáleném o $k\lambda$ vznikne maximální výchylka a opakuje se pro každé k .

Posuňme M_1 do bodu x'_1 . Bod x_2 přejde do x'_2 ve vzdálenosti $k\lambda$. Při průběžném posouvání kterékoliv sondy se opět opakují periodická rozložení kmiten a uzlů.

Najdeme polohu $x_2 - x_1 = \lambda$. Spojme oba držáky sond spojkou, aby jejich distance $d = \lambda = \text{konst.}$ Výsledná výchylka při posouvání sond je trvale stejná. Všechny body pole vzdálené o λ nebo $k\lambda$ kmitají soufázově. Úpravou vzdálenosti sond $d = \frac{1}{2} \lambda$ nebo $\frac{1}{2} k\lambda$ prokážeme, že všechny body pole, takto vzdálené, kmitají v protifázi.

3.2. Měření fázové rychlosti šíření zvuku ve vzduchu použitím postupné vlny

Metoda uvedená v 3.2.b je velmi vhodná pro přesná měření fázové rychlosti šíření zvukové vlny ve vzduchu. Vylučuje nedostatky interferometrických metod pracujících se stojatým vlněním. Abychom zvýraznili polohu minim, zvýšíme celkové zesílení soustavy. Z řady opakovaných měření je uvedeno jedno pro demonstraci přesnosti použité metody. Měření bylo provedeno za těchto podmínek:

Použitý kmitočet: $f = 15 \text{ kHz} \pm 5 \cdot 10^{-4}$,

teplota laboratoře: $t = 20,5^\circ \text{C}$

vlhkost: 60 %, normální obsah CO_2 .

Po běžném zpracování a vyhodnocení byla naměřená fázová rychlost c rovna

$$c = 343,8 \pm 0,42 \text{ ms}^{-1}$$

Podle údaje Bergmannova pro $t = 20,5^\circ \text{C}$ vychází pro fázovou rychlost c hodnota

$$c = 343,9 \pm 0,05 \text{ ms}^{-1}.$$

Relativní chyba naměřené hodnoty je asi 0,1 %. Přesnost měření by bylo možno zvýšit v otevřeném prostoru.

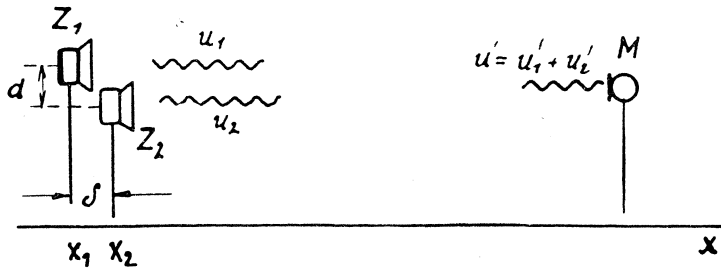
Tato vysoká citlivost umožňuje demonstračně identifikovat vliv svítíplynu přimíseného krátkodobě do proměřovaného prostoru. Rovněž uměle vyvolané změny teploty v měřeném prostoru při ozáření infražárovkou jsou nápadně identifikovatelné.

Tato metoda dovoluje rovněž potvrdit teoretický vztah Kirchoffův-Helmholtzův, určující změnu rychlosti šíření zvuku trubici, jak bude dále uvedeno.

3.3. Interference dvou koherentních vlnění, postupujících v témž směru

Dva zářiče Z_1 a Z_2 jsou umístěny na jednom konci lavice těsně nad sebou, aby jejich vertikální vzdálenost d byla menší než vlnová délka vyzářovaného vlnění. Podle obr. 23 přicházejí do míst sondy M obě vlnění s rozdílem drah $\overline{Z_2M} - \overline{Z_1M}$. Interval vzdáleností $\delta = x_2 - x_1$. Fázový rozdíl φ obou vlnění je roven

$$\varphi = \omega \frac{\delta}{c} = 2\pi f \frac{\delta}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \delta.$$



Obr. 23

Interferenční jev vyvodíme touto cestou: Zářič Z_1 ponecháme na místě. Zářič Z_2 posuneme v kladném směru osy x o vzdálenost δ . Najdeme stav pro $\delta = \lambda$ a ukážeme jeho opakování ve vzdálenosti $\delta = 2k \frac{\lambda}{2}$. Podobně nastavíme $\delta = \frac{\lambda}{2}$ a ukážeme jeho opakování pro vzdálenosti $\delta = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$ za podmíněk, jak bylo uvedeno.

Prokážeme, že pro každé x je stav pole stejný a že výsledné pole vykazuje vlastnosti pole s postupnou vlnou. Fázové okolnosti prokážeme metodou superpozice, popsanou v 3.2.b. Vyhledáme polohy minim pro každé ze základních vlnění odděleně složením u_1 a u_1' , kde u_1 je budící napětí zářiče Z_1 a u_1' signál sejmутý sondou M . Obdobně složíme u_2 a u_2' . Minima jsou ve vzdálenosti λ . Obě soustavy minim jsou vzájemně posunuté o hodnotu δ . Složením referenčního signálu u_1 nebo u_2 s výsledným signálem sondy $u' = u_1' + u_2'$ získáme rozložení minim výsledného složeného vlnění a určíme jeho fázové posunutí ψ . Velikost leží v intervalu $0 \leq \psi \leq \delta$. Ukážeme, že velikost ψ je závislá nejen na δ , ale i na velikosti amplitud skládaného vlnění U_1 a U_2 .

Dále ukážeme, že amplituda výsledného vlnění U je funkcí fázové difference φ , a tím funkcí dráhové difference δ .

U dvou vlnění postupujících v témž směru je $U = U(\varphi)$ a je vyjádřeno vztahem

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi .$$

Vyjádříme-li dráhovou diferencí pomocí vlnové délky, je výsledná amplituda U rovna

$$U^2 = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta .$$

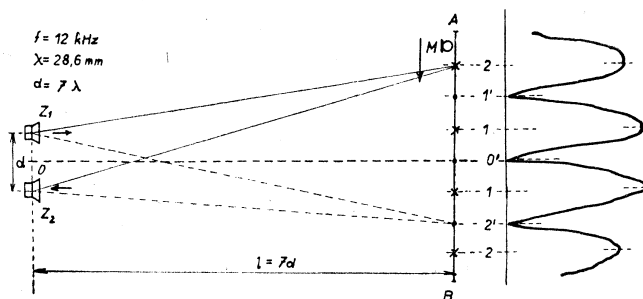
Pro demonstraci výrazu použijeme dvou shodných zářičů, paralelně napájených z generátoru. Vyzařovaná vlnění necht' mají stejnou amplitudu $U_1 = U_2 = U$. Vyjdeme-li ze základního postavení zářičů, při kterém je $\delta_0 = \lambda$, nabývá amplituda výsledného vlnění $U(\delta)$ hodnot $2U \geq U \geq 0$, platí-li současně $0 \leq \delta \leq 2\pi$. Přikrytím jednoho nebo druhého zářiče prokážeme původní dílčí stavy vlnění. Po odkrytí ukážeme výsledný stav vlnění, odpovídající různým fázovým podmínkám.

Důkaz směru šíření výsledného vlnění provedeme pomocí dvou sond M_1 a M_2 , které umístíme na stejné souřadnici x_m . Snímané signály u_1' a u_2' zobrazíme na

dvojstopém osciloskopu. Jednu ze sond posuneme v kladném a poté v záporném směru osy x . Obraz napětí posouvané sondy se fázově posouvá vzhledem k obrazu sondy pevné. Je-li fázové posunutí záporné, pak směr pohybu určuje směr šíření výsledného záření.

3.4. Akustické pole dvou blízkých zářičů

a) Jednoduchou úvodní demonstraci provedeme podle obr. 24. Ve vzdálenosti l , kolmé k loži lavice, umístíme dva stejné zářiče Z_1 a Z_2 malého průměru membrány. Horizontální vzdálenost zářičů d je rovnoběžná s ložem lavice. Akustickou sondu M posouváme na loži lavice z bodu A do bodu B . Ověříme, že pro dráhový rozdíl δ obou vlnění rovný $\delta = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}$, pro $k = 1, 2, \dots$, má v místě M vlnění minimum (body $1', 2', \dots$), je-li $\delta = 2k \frac{\lambda}{2}$, $k = 1, 2, \dots$, je v místě M maximum (body $1, 2, \dots$). Rozložení amplitud vlnění na spojnici AB je v obr. 24 vyznačeno přímým záznamem. Záměnou kmitosměrů zářičů



Obr. 24

vznikne záměna poloh kmiten a uzlů. Je-li $l \gg d$, budou maxima rozložena ve vzdálenosti x od středu O' rovné

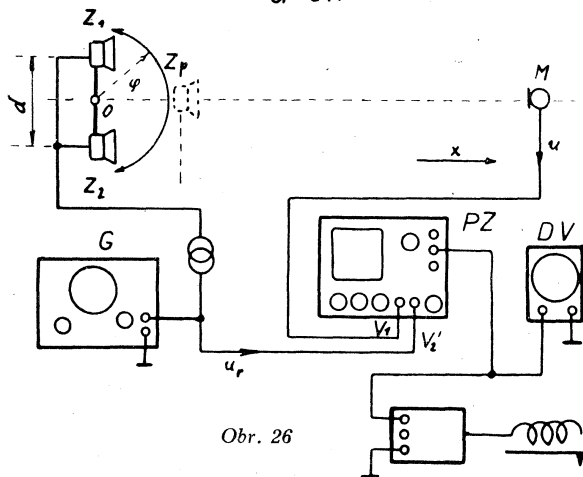
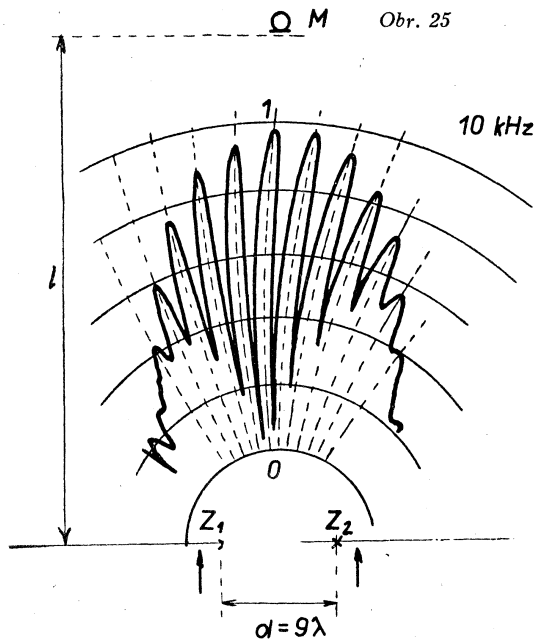
$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} 2k \frac{\lambda}{2},$$

minima ve vzdálenosti

$$x_{\min} = \pm \frac{l}{d} (2k - 1) \frac{\lambda}{2}.$$

V akustice platí tento vztah jen velmi přibližně. Hledané hodnoty extrémů leží na průsečíku soustav konfokálních elips a hyperbol.

b) Vyzářovací diagram dvojice otáčivých zářičů, vyjádřený v polárních souřadnicích pro vzdálenost zářičů $d = 9\lambda$ a frekvenci vlnění 10 kHz, ukazuje obr. 25, který je přímým záznamem pořízeným na popisované soustavě pomocí uspořádání v obr. 26.



3.5. Studium vlastností stojatého vlnění v neomezeném vzduchovém prostředí

Zářiče Z_1 a Z_2 v obr. 27 vytvářejí dvě protisměrná koherentní vlnění u_1 a u_2 . Zanedbáme-li vliv rozměrů zářičů, lze považovat obě vlnění za postupná a čela vln v paraxiálním svazku za rovinná. Je-li vlnění u_1 vyjádřeno rovnicí

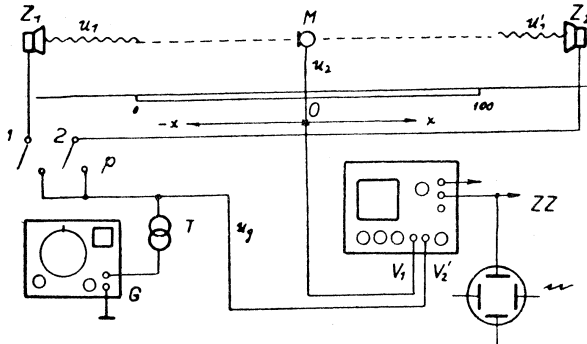
$$u_1 = U_1 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$$

a u_2 rovnici

$$u_2 = U_2 \sin \left[\omega \left(t + \frac{x}{c} \right) + \varphi \right].$$

Volíme-li $U_1 = U_2 = U$, získáme známý výraz pro stojaté vlnění v prostoru mezi oběma zářiči

$$u = 2U \cos \omega \frac{x}{c} \sin \omega t.$$



Obr. 27

Sondou M identifikujeme obalovou křivku kladných amplitud, která je dána známou závislostí na souřadnici x polohy sondy. Provedeme analýzu modelovaného akustického pole:

Metodou superpozice, která je velmi rychlá, neboť zapojení je již připraveno, vyhledáme velikost vlnové délky použitého vlnění λ . Při měření pracujeme s jedním akustickým zářičem.

Po zapojení obou zářičů identifikujeme posouváním sondy M kvalitativní změnu pole mezi oběma zářiči, odpovídající funkci $u = u(x)$. Projeví se vznikem maxim a minim. Porovnáme vzdálenost minim s dříve zjištěnou vlnovou délkou.

Demonstrační cestou vyvodíme důkaz vzniku stojatého vlnění. Vyjdeme z již známého principu superpozice vlnění. Sondou M umístíme do bodu O . Posunutím jednoho ze zářičů vyvoláme maximální výchylku na výstupním měřiči. Provedeme manipulace, při kterých vyjdeme vždy ze základního stavu:

1. Zářič Z_1 je ve stálém postavení vůči sondě M . Vlnění u_1 zůstává konstantní. Zářič Z_2 změní polohu vzhledem k sondě M o hodnotu $\pm 2k \frac{\lambda}{2}$. V bodě O se změnila fáze vlnění u_2 o úhel $\varphi_1 = \pm 2k\pi$. Po provedeném posunutí se obnoví původní stav. Totéž platí pro posunutí zářiče Z_2 .

2. Zářič Z_1 změní polohu vůči sondě o hodnotu $\delta_1 = \pm \frac{\lambda}{2}$. Zářič Z_2 rovněž o hodnotu $\delta_2 = \pm \frac{\lambda}{2}$. Stav v místě M se obnoví vždy po konečném postavení

zářičů. Výsledná fázová změna je dána součtem obou dílčích fázových změn vlnění v místě sondy.

3. Zářiče Z_1, Z_2 polohu nemění. Sonda M se posune o $\pm \frac{\lambda}{2}$. Výsledné vlnění vykazuje stav ekvivalentní s jevem 2. Fázová změna v místě sondy je dvojnásobná ve srovnání s posunutím jednoho ze zářičů. Extrémní hodnoty amplitud stojatého vlnění jsou proto ve vzájemné vzdálenosti $\frac{\lambda}{2}$.

Výraz $U' = 2U \cos \omega \frac{x}{c}$ demonstrujeme posouváním sondy ve směru osy x a provedeme záznam.

4. Posunutí kteréhokoliv zářiče o délku $\pm d$ vyvolá posunutí uzlů a kmiten ve stejném smyslu a o tutéž hodnotu.

Studium vlastností úplného stojatého vlnění.

V blízkém okolí bodu 0, kde $U_1 = U_2$ vzniká úplné stojaté vlnění. V případě jediného vzájemného prolnutí dvou vlnění dochází ke vzniku nejjednoduššího typu stojatého vlnění. Při demonstraci obalové křivky stojatých vln zobrazíme současně na osciloskopu časovou funkci $u = U' \sin \omega t$. Vynikne tak jak závislost na souřadnici x , $u = u(x)$, tak na čase, $u = u(t)$.

Pomocí tlakové sondy ukážeme polohu kmiten tlaku a kmiten akustické rychlosti. Tato demonstrace je však nápadnější při demonstraci chvění.

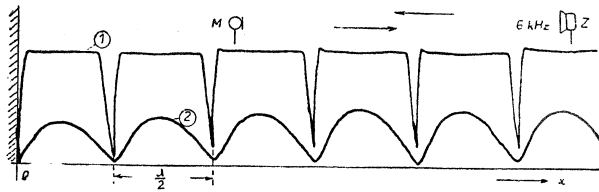
Pomocí dvou sond studujeme fázové podmínky amplitud stojatého vlnění mezi dvěma sousedními uzly v intervalech dvou sousedních polí, oddělených uzlovými rovinami. Důkaz provedeme pomocí principu směšování dvou harmonických koherentních kmitů. Sondu M_1 umístíme v libovolné kmitně a její signál u_1 přivedeme na jeden ze vstupů směšovače. Nastavíme výchylku U_1 výstupního měřidla do poloviny rozsahu. Sondu M_2 umístíme v libovolné k -té kmitně a její signál u_2 přivedeme na druhý vstup směšovače. Při vytažené sondě M_1 nastavíme výchylku U_2 výstupního měřidla rovnu U_1 . Je-li sonda M_2 umístěna trvale v kmitně liché a posouváme-li sondu M_1 ve směru osy x , bude výchylka výstupního měřidla $U = U_1 + U_2$ maximální při poloze sondy M_1 v kmitně liché a nulová při postavení M_1 v kmitně sudé. Dvě sousední pole stojatého vlnění vykazují v kmitnách pole kmity v protifázi. Dokážeme, že toto tvrzení platí pro každou dvojici bodů v neparitních intervalech mezi dvěma uzly:

Nastavíme rozestup sond rovný velikosti $\frac{\lambda}{2}$. Oba jezdce sond spojme, aby vzdálenost sond byla stále stejná. Obě sondy posouváme současně ve směru osy x . Výstupní měřič ukazuje stále nulovou výchylku.

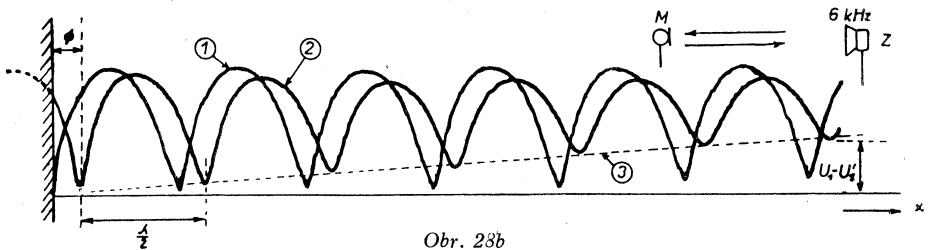
3.6. Vznik stojatého vlnění po odraze

Jeden ze zářičů v předchozí demonstraci nahradíme odrazovou deskou a provedeme záznam. Akustickou sondu posouváme v prostoru poblíž odrazové desky. Autentický záznam v obr. 28a ukazuje obálku kladných amplitud (2) s vyjádřenými uzly ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{2}$. Křivka 1 na témže obraze ukazuje zvýraznění polohy uzlů po zvýšení citlivosti zapisovače. Zaměníme-li odrazovou plochu pevnou za pružnou, lze studovat fázové změny odražené vlny na základě změny

posuvu uzlů. V obr. 28b je záznam příslušný odrazu na desce pevné (křivka 1) a na pružné membráně (křivka 2). Z poměru stojatých vln lze studovat odrazivost různých ploch.



Obr. 28a



Obr. 28b

3.7. Stojaté vlnění v akustickém poli nekoherentních zářičů

Dvě protisměrná vlnění, u_1 o frekvenci ω_1 a u_2 o frekvenci ω_2 , vzájemně interferují. Vzniklé akustické pole má zajímavé dynamické vlastnosti. Jsou-li oba interferující kmitočty velmi blízké, vykazuje výsledné pole a) rázy s frekvencí $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$, b) stojaté vlnění s pulzující amplitudou, která současně postupuje rychlostí v v kladném nebo záporném směru.

Dva zářiče Z_1 a Z_2 umístíme souose v protisměru, každý na jeden konec lavice. Každý je buzen ze samostatného generátoru. Pole mezi zářiči je identifikováno pomocí dvou sond M_1 a M_2 . Elektrické signály sond jsou indikovány dvěma samostatnými měřiči. Pracovní kmitočty ω_1 a ω_2 nastavíme velmi blízké. Oba indikátory vykazují rázy. Při vzdálenosti sond rovné $2k \frac{\lambda}{4}$ jsou výchylky ručiček

soufázové, v bodech vzdálených $(2k - 1) \frac{\lambda}{4}$ jsou ve vzájemném protifázovém pohybu.

Zvolíme-li $\omega_1 > \omega_2$, pak při rovnoměrném pohybu jedné ze sond ve směru od zářiče Z_1 klesá počet rázů touto sondou snímaných a vymizí při rychlosti v_0 . Při pohybu sondy v opačném směru se počet rázů zvětšuje v soulase s Dopplerovým jevem. Je-li kmitočet zářiče Z_1 roven f_1 , zářiče Z_2 roven f_2 a pohybuje-li se sonda rychlostí $\pm v$, změní se současně frekvence obou signálů snímaných pohyblivou sondou podle vztahu

$$f'_1 = \frac{c \pm v}{c} f_1$$

$$f_2' = \frac{c + v}{c} f_2.$$

Při rychlosti v_0 sondy dojde k rovnosti $f_1' = f_2'$ a počet rázů je nulový. Pro velikost kritické rychlosti posuvu sondy v_0 platí

$$v_0 = c \frac{f_1 \mp f_2}{f_2 + f_1}.$$

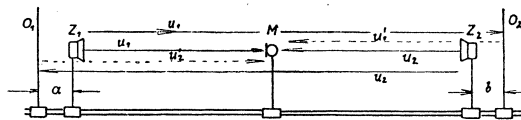
Je-li $f_2 > f_1$ je $v_0 < 0$, a obráceně pro $f_1 > f_2$ je $v_0 > 0$. Při posuvné rychlosti sondy v_0 je sondou sledován určitý zachycený stav pole (kmitna, uzel, jiný obecný stav). Výsledný stav pole se jeví, jako by akustické vlnění v jednom místě pole vznikalo a v jiném postupně nabývalo maximální velikosti. Kmitna stojatého vlnění se posouvá rychlostí v_0 ve směru od zářiče s vyšší frekvencí. Představuje-li pohyblivá sonda pozorovatele v akustickém poli se pohybujícího, dochází při jeho pohybu k subjektivní změně kmitočtu. Objektívni stav pole indikuje nepohyblivá sonda. Pohybuje-li se jeden z akustických zdrojů vůči pevným sondám, nastává objektívni změna akustické frekvence, obě sondy vykazují stejnou změnu frekvence rázů. Nastavíme-li posuvnou rychlost zdroje velikosti $2v_0$, rázy zanikají, jde-li o směr pohybu od zdroje s vyšší frekvencí.

Uvedeného jevu je možno použít k laboratornímu demonstrování Dopplerova jevu, identifikovaného sluchovým vjemem. Použijeme dvou protisměrných vlnění s ultrazvukovou frekvencí. Přenosnou sondu posouváme v akustickém poli mezi oběma zářiči. Snímaný signál transponujeme na frekvenci 4 kHz v měnič kmitočtu (funkce pracovního zesilovače II.). I pozvolné posouvání sondy se projeví nápadnou změnou frekvence 4 kHz. Při použití jednoho zářiče není kmitočtová změna tak nápadná.

3.8. Chvění v omezené části neomezeného prostoru

Vyvození pojmu „chvění“ je velmi obtížné. Na lavici je vyvodíme experimentálně takto:

Vydeme z jevu 3.5 a podle obr. 29 umístíme ve vzdálenosti a od zářiče Z_1 odrazovou plochu O_1 . Vlnění u_2 zářiče Z_2 se odráží na této ploše. Při vhodném



Obr. 29

nastavení odrazové plochy je odražené vlnění u_2' soufázové s vlněním u_1 , což se projeví vzrůstem amplitud v kmitnách stojatého vlnění. Posunutím Z_2 se stav nezmění, pouze se posunou polohy uzlů. Obdobný vliv má odrazová plocha O_2 . Po nastavení vhodné vzdálenosti b vznikne nápadný vzrůst amplitud v kmitnách v důsledku několikanásobných odrazů na obou plochách. Změníme-li

vzdálenosti a i b o hodnotu $\frac{\lambda}{2}$, mizí vyhraněný stav chvění. Při „vyladěném“ stavu vykazuje průběh zapsaných křivek tvarové změny napovídající stavům rezonance a antirezonance.

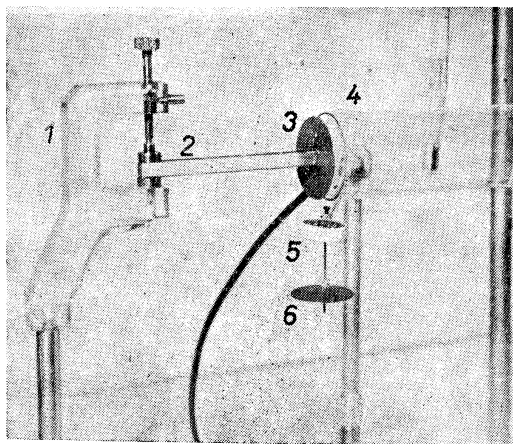
4. Akustické pole v prostorově omezeném prostředí

Kvalitativně novým je v prostorově omezeném prostředí jev několikanásobného odrazu, který vede ke složitým interferenčním jevům, přehledným pouze v speciálních případech.

4.1. Akustické pole v trubici

Pro studium akustického pole v omezeném prostředí, jakým je trubice konečné délky a daného průřezu je velmi výhodné, že akustické vlnění je soustředěno na prostor trubice a nedochází k rozptylu akustické energie. Jedním z funkčních prvků lavice je miniaturní snímač pole, sloužící k identifikaci akustického pole uvnitř trubice.

Všechny jevy probíhající v akustickém poli uvnitř trubice lze vysvětlit na základě pouček o superpozici stavů. Na obr. 30 jsou uvedeny přímé záznamy struktury akustického pole v trubici. Rovinná akustická vlna je buzena v trubici tyčinkovým piezoelektrickým zdrojem, zakončeným rovinným diskem (obr. 31,



Obr. 31 Vznik rovinné akustické vlny v trubici.
 (1 — držák zářiče, 2 — piezoelektrická tyčinka,
 3 — rovinný disk zářiče, 4 — trubice, 5 — akustická
 sonda, 6 — reflektor akustické sondy)

části soupravy 2, 3). Při záznamu je v trubici posouvána miniaturní sonda, která poskytuje signál pro zesilovač zapisovače. Soumístitně se sondou se posouvá jezdec se zapisovačem a vzniká tak spojitý zápis stavu pole v trubici. Informativní

je obzvláště tehdy, jde-li o kombinovaný útvar omezeného prostředí. Přímý záznam poskytuje daleko více informací, než v případě bodového vyšetřování pole.

Záznam v obr. 30a uvádí rozložení akustického vlnění v trubici otevřené. Poskytuje tyto informace, získané při přímém zápisu v několika vteřinách:

a) Stojaté vlnění v otevřené trubici vzniká jen při kmitočtech, pro něž platí $l = k \frac{\lambda}{2} - \frac{\pi D}{4}$, kde l je délka trubice, D průměr trubice, $k = 1, 2, \dots$

b) Vzniklé vlnění v trubici je částečně stojaté, neboť odraz na volném konci trubice je nedokonalý. Odražené vlnění se odráží se stejnou fází a na konci trubice v bodě B je kmitna deformována.

c) Zdanlivá kmitna vzniká ve vzdálenosti $\frac{1}{8} \pi D$ za otevřeným koncem trubice.

Záznam v obr. 30b udává rozložení vlnění v trubici po odraze na pevném konci trubice. V rovině odrazové plochy leží dobře vyjádřený uzel. Kmitna je ve vzdálenosti $\frac{\lambda}{4}$. Jde o známé rozložení v Kundtově trubici, vyjádřené pilinovými obrazci.

Záznam v obr. 30c ukazuje šíření pouze postupné vlny v trubici zakončené pohltivou vložkou. Křivka 1 udává konstantní stav amplitudy po celé délce vzduchového sloupce v trubici. Využitím metody superpozice s referenčním signálem vznikne záznam křivky 2, při kterém je možno zřetelně stanovit velikost vlnové délky jako vzdálenost dvou sousedních uzlů.

4.2. Rezonance vzduchového sloupce v trubici

Při identifikaci rezonančních stavů je snímací sonda 5 v obr. 31 umístěna vůči disku 3 tyčinkového zářiče 2 tak, aby vlnění z prostoru před a za diskem, která jsou vzájemně posunutá o 180° , dopadala souměrně na membránu sondy a vzájemně se rušila. Sonda může pak pracovat s mimořádnou citlivostí, neboť reaguje pouze na změny akustického pole v trubici. Při posouvání pístu vedeného souměrně se zapisovačem dochází k opakovaným rezonancím vzduchového sloupce. Průběh souboru rezonančních křivek je vyjádřen v záznamu obr. 30d.

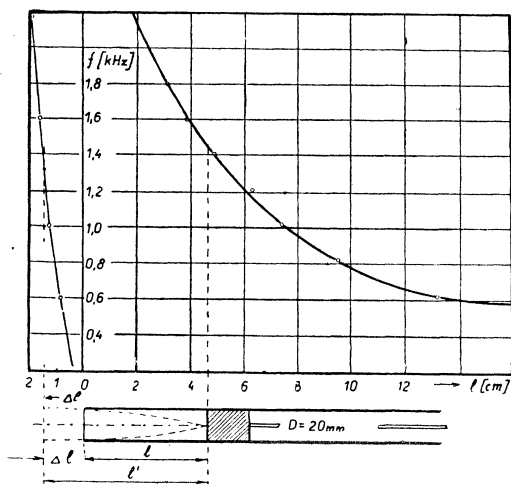
V obr. 30e je zobrazen sled rezonancí v trubici malého průřezu, kde amplituda v rezonančních vrcholech klesá v důsledku ztrát podle zákona

$$U_x = U_0 e^{-\alpha x},$$

kde α je koef. absorpce. Při bedlivém proměření je možno zjistit i zmenšení vlnové délky.

4.3. První rezonance v uzavřené trubici

K první rezonanci vzduchového sloupce v trubici dojde při nastavení pístu do prvního uzlu. Kmitna leží ve vzdálenosti Δl od otevřeného konce trubice, závislé na průměru trubice D a vlnové délce λ . Korekce na otevřený konec trubice je nesnadno teoreticky stanovitelná. Obr. 32 udává vzdálenost Δl kmitny od konce trubice pro různé kmitočty vlnění, jak byla stanovena měřením. Dokazuje neplatnost tradovaného zákona oktáv.



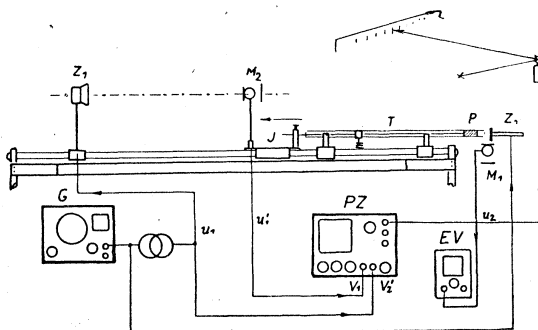
Obr. 32

4.4. Vyšší harmonické kmitočty rezonujícího vzduchového sloupce

Při použití delší trubice je možno identifikovat řadu rezonančních stavů při kmitočtech $f_n = kf_1$, pro $k = 1, 2, \dots, n$. Jako rezonátoru použijeme otevřenou trubici. K jednomu konci přiblížíme zářič, ke druhému sondu s lineární charakteristikou. Resonanční stavy jsou nápadné a lze identifikovat i 30 rezonančních stavů. Resonanční kmitočty tvoří harmonickou řadu.

4.5. Fázová rychlost zvuku v trubicích různého průřezu

Změna rychlosti šíření zvukové vlny v závislosti na průřezu trubice byla teoreticky odvozena Kirchoffem a Helmholtzem a mnohokrát byla experimentálně prověřována. Závislost lze ověřit na akustické lavici při uspořádání podle obr. 33.



Obr. 33

Závislost rychlosti šíření akustické vlny v trubici na jejím průřezu odvodil již před sto léty Kirchoff a Helmholtz. Je dána tímto vztahem

$$c_r = c_0 \frac{1 - \gamma}{2\pi \sqrt{\pi f}},$$

kde c_0 je rychlost šíření akustické vlny ve volném prostředí, r poloměr trubice, f kmitočet vlnění.

Konstanta γ je rovna

$$\gamma = \sqrt{\frac{\eta}{\rho}} + \sqrt{\kappa} \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sqrt{\frac{\lambda}{c_v}},$$

kde η je viskozita prostředí, ρ hustota plynu, λ koef. tepelné vodivosti, c_v měrné teplo při stálém objemu, κ Poissonova konstanta.

Z korekčního vztahu je zřejmé, že pro průkaz změny rychlosti je nutno volit malou frekvenci a malý průřez trubice. Oba požadavky vedou k náročným experimentálním uspořádáním. Je nutno volit kompromis.

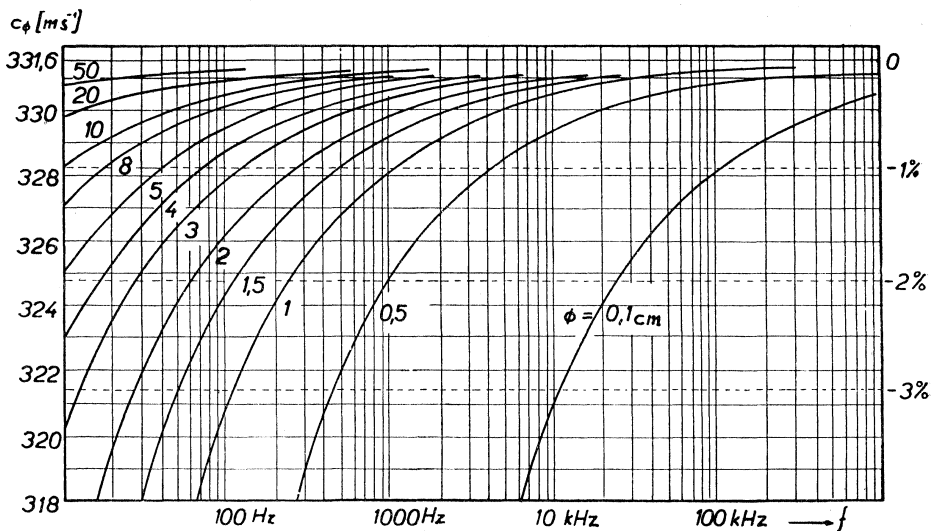
Při uspořádání podle obr. 33 je vyloučen vliv nestálosti pracovního kmitočtu. Na jednom konci lože lavice umístíme vyčištěnou trubici o poloměru r . Proti ústí trubice umístíme tyčinkový zářič Z_1 a souměrně k disku zářiče sondu M_1 , spojenou s elektronkovým voltmetrem. Na druhé polovině lavice je uchycen zářič Z_2 na jezdcí s noniem. Sonda M_2 a držák táhla pístu P jsou společně unášeny jezdcem \mathcal{J} . Oba zářiče jsou napájeny společným zdrojem G . Dvojice Z_2, M_2 měří vlnovou délku v neomezeném prostředí metodou superpozice s referenčním signálem. Dvojice M_1, Z_1 měří vlnovou délku v trubici metodou identifikace rezonančních stavů.

Při měření postavíme píst P do prvního uzlu. Zářič Z_2 posuneme vzhledem k M_2 do polohy, při které je výchylka zrcadlového galvanoměru minimální. Smíšením signálů u_1 a u_1' získáme výstupní signál u_2 , který nabývá nulových hodnot při posouvání sondy M_2 o vzdálenost vlnové délky. Minima v trubici jsou ve vzdálenosti poloviny vlnové délky. Zvýšíme citlivost indikačních přístrojů a polohy minim upřesníme. Zapišeme polohu zářiče Z_2 (čtení **a** na měřítku lavice). Jezdce \mathcal{J} posouváme ve směru šipky a odečteme sudý počet minim v trubici. Polohu posledního minima pečlivě nastavíme. Sonda M_2 , posouváná současně s pístem P , indikuje poloviční počet minim v neomezeném poli. Poslední minimum upřesníme posunutím zářiče Z_2 směrem k M_2 . Na noniu odečteme výslednou polohu zářiče Z_2 (čtení **b**). Je-li počet minim indikovaných sondou M_2 roven n , je změna vlnové délky v trubici rovna

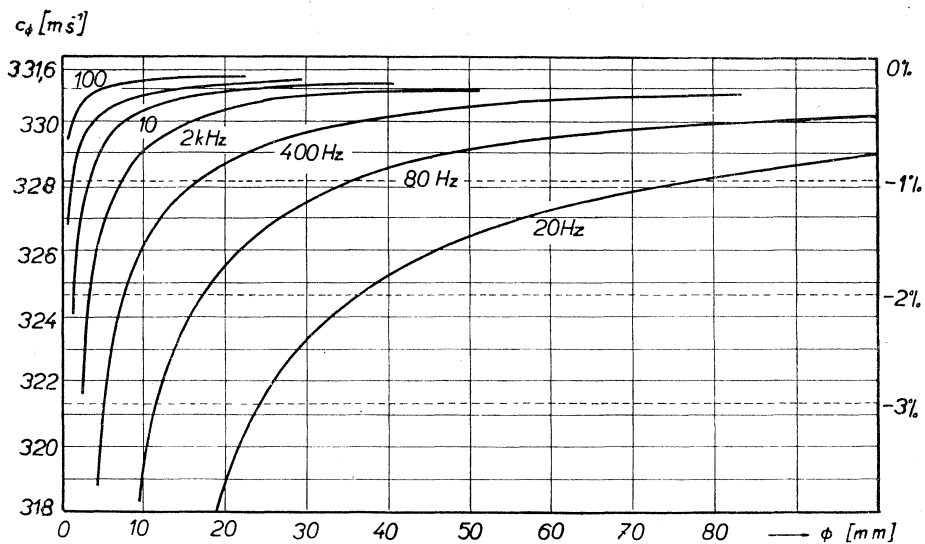
$$\Delta\lambda = \frac{b - a}{n}.$$

Odtud vypočteme změnu rychlosti Δc_r v trubici.

Z řady měření na trubicích o průměru 0,1 cm, 0,5 cm, 1 cm, 3 cm a 5 cm byla vykonstruována soustava křivek v obr. 34 a obr. 35. Jsou velmi instruktivní pro práce s trubicemi různého průřezu. Měření platí pro skleněné trubice tenkostěnné. Při použití trubic z jiného materiálu s jinou kvalitou povrchu vnitřní stěny trubice by byl průběh křivek jiný. Vliv kvality povrchu vnitřní stěny trubice lze rychle ověřit při opakování jednoho z měření, při kterém vnitřek skleněné trubice posypeme jemnými pilinami.



Obr. 34



Obr. 35

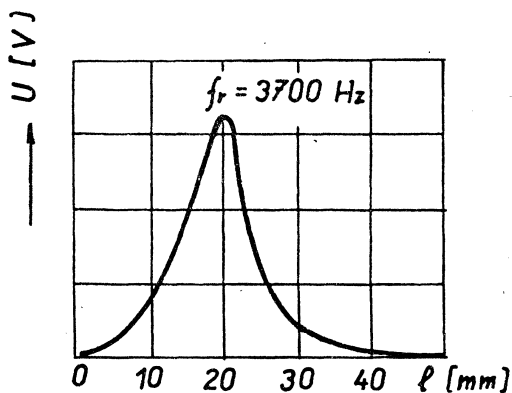
4.6. Vlnění v trubici zakončené proměnnou akustickou impedancí

Skleněnou trubici uzavřeme laděným akustickým rezonátorem v podobě válcového dutinového rezonátoru s proměnnou velikostí rezonančního objemu. Postupná vlna vyvolá vynucené kmity rezonátoru, které jsou sekundárním zdrojem vlnění, postupujícím v protisměru. Obě vlnění vytváří výsledné stojaté

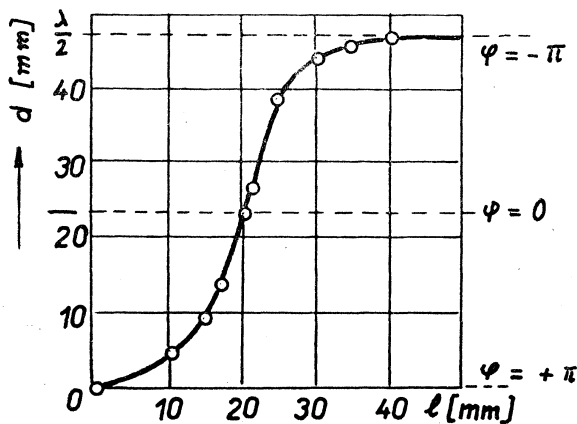
vlnění, jehož uzlové roviny leží v různých vzdálenostech od konce trubice v závislosti na stavu rozladění rezonátoru.

Podle obr. 36, křivka 6 uzavřeme skleněnou trubicí posuvným pístem P_1 , v jehož válcové dutině se posouvá píst P_2 , který uzavírá dutinu délky l . Pro $l = 0$ je trubice uzavřena rovinným čelem a nastává známý odraz s fázovým posunutím $\varphi = -\pi$. Při speciálním nastavení pístu do vzdálenosti l_r přejdou nápadně rychle původní uzly v kmitny, jak je zřejmo z křivky 5. Odražená vlna se odráží s nezměněnou fází a vzdálenost prvního uzlu od roviny odrazu je $d = \frac{\lambda}{4}$.

Rezonanční obvod se chová ve stavu podrezonančním jako akustická indukčnost, v nadrezonančním jako akustická kapacita. Obr. 37 ukazuje rezonanční křivku rezonátoru, odvozenou z jeho chování jakožto zátěže vlnovodu. Obr. 38 udává fázovou křivku rezonátoru.



Obr. 37



Obr. 38

5. Využití soupravy elektroakustické lavice pro demonstrace jevů chvění tyčí a mechanických rezonátorů

Vhodnými piezoelektrickými prvky lze snadno vyvolat tři základní vidy vibrací tyčí — podélné chvění, ohybové kmity a torzní kmity tyčí. Lokální stavy vibrací je možno identifikovat bimorfními piezoelektrickými členy malých rozměrů a nepatrné hmoty. Vysoká citlivost pracovního zesilovače a snímacího elementu dovoluje snímat vibrace s amplitudou řádově rovnou 10^{-8} metrů. Konstrukce piezoelektrických prvků je volena tak, aby vlastní rezonanční frekvence dvojice budičů — snímač spadala nejméně za hranici 25 kHz, tedy mimo pracovní kmitočtovou oblast. Jejich spektrální citlivost je v této oblasti lineární.

Při studiu vibračních jevů je tyč volná položena ve žlábků z pěnového polystyrenu. Při měření na tyči vetknuté je tyč uchycena šroubem k velké hmotě, aby byl ostře definován uzel na konci tyče. Torzní kmity vyvoláme bimorfni destičkou orientovanou na torzi, zasunutou do zářezu v základně tyče. Při vývojových pracích byly hledány takové způsoby vyvolání chvění příslušných mechanicko-akustických útvarů, při kterých by byl přídavný vliv setrvačné hmoty a tlumení útvaru budičím elementem zanedbatelně malý. Jinak, jak známo, dochází k narušení akustické funkce zkoumaného objektu. Hmoty budičeho elementu se rozkládá svým působením do všech kmiten rezonátoru a mění vlastní rezonanční frekvenci rezonátoru. Podílí se dále na útlumu studovaného objektu a mění tím podle známých zákonitostí akustické parametry. Stejný vliv má dotekový snímač chvění. Je nutno volit všude tam, kde je třeba provést přesná měření, oba prvky co nejmenších rozměrů a elastický způsob jejich uchycení. Současně je nutno použít velmi volné vazby mezi aktivním budičím prvkem a rezonátorem a také mezi snímacím prvkem a rezonátorem. Při buzení a snímání chvění kontaktními prvky se dosáhne volné vazby při umístění prvků poblíž uzlových bodů. Vliv prvků je zvláště patrný při práci s rezonátory s vysokým činitelem jakosti Q . (Q u mechanických rezonátorů dosahuje hodnot až přes 10000). Je-li dotekový snímač minimálně hmotný, je možno spojitě snímat diskretní stavy chvění, rozložené na povrchu zkoumaného útvaru. Dále bude uvedeno jen několik ukázek z této problematiky.

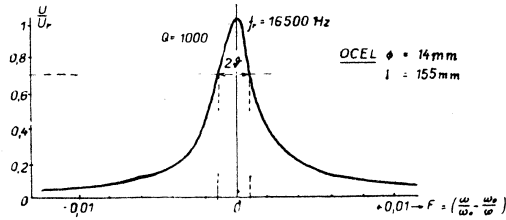
5.1. Rezonanční křivky tyčí podélně chvějících

Tyč ze zkoumaného materiálu je uložena jako tyč volná v polystyrenovém žlábků. Je podepírána podložkou ve svém středu, kde při vyvolání první rezonance leží uzlová oblast. Tyč není při tomto uchycení tlumena. Piezoelektrický budič chvění i snímač chvění se dotýkají středů základen. Sledujeme závislost akustické výchylky U tyče v místě kmity na frekvenci budičící síly ω :

$$U = U(\omega)$$

při konstantní amplitudě budičící síly $U' = \text{konst.}$

Praktické uspořádání vyžaduje možnost velmi jemného rozladování generátoru budičeho napětí. Příslušná úprava byla popsána. Vzájemné sprážením generátoru a zapisovacího zařízení umožní okamžitý záznam průběhu rezonanční křivky. V obr. 39 je uveden autentický záznam rezonanční křivky ocelové tyče. Vyjádření je provedeno v poměrových souřadnicích, jak je obvyklé u elektrických kmitavých obvodů. Při tomto vyjádření jsou rezonanční křivky rezonátorů se stejným Q totožné; křivky s různým Q mají společný vrchol. Z křivky je možno přímo odečíst číselnou hodnotu Q .



Obr. 39

Je-li U velikost amplitudy za stavu mimo rezonanci a U_r akustická amplituda za rezonance, platí známý vztah

$$\frac{U}{U_r} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 F^2}},$$

kde $F = \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}$ je činitel rozladění. Pro poměr $\frac{U}{U_r} = \frac{1}{\sqrt{2}}$, odpovídající

propustnému pásmu, lze odvodit výraz pro činitele rozladění F_0 , odpovídajícího propustnému pásmu

$$2 = 1 + Q^2 F_0^2,$$

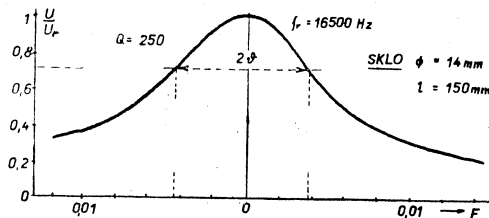
odkud

$$F_0 = \pm \frac{1}{Q} = \pm d,$$

kde d je činitel tlumení. U souboru zapisovaných křivek nastavíme při záznamu U_r všech křivek stejně velká. Souřadnice vrcholu je pak pro všechny křivky společná. Rovnoběžka s osou F , vedená ve vzdálenosti $\frac{U}{U_r} = 0,707$, protíná rezonanční křivku v bodech určujících šířku propustného pásma (body F_0); převrácená hodnota činitele jakosti Q je číselně rovna F_0 . Proto

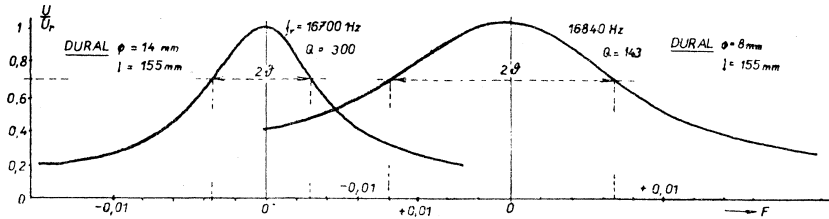
$$Q = \frac{1}{F_0}.$$

Pro srovnání je uvedena rezonanční křivka skleněné tyče (obr. 40) stejných geometrických rozměrů.



Obr. 40

Rezonanční křivky v obr. 41 přísluší dvěma tyčím z téhož materiálu, téže délky, ale různého průřezu. V tyčích je vybudeno podélné chvění a vyvolány první rezonance. Záznam vznikl opět při sprážením generátoru se zapisovačem a také křivka s vyšším rezonančním kmitočtem je posunuta ve stejném smyslu, v jakém byl rozladován generátor.



Obr. 41

Teorie vypracovaná Rayleighem uvádí vztah pro rychlost šíření akustické podélné vlny v tyči konečné délky l a daného průměru $2r$, který je uvedenými křivkami ověřován. Pro rychlost podélného vlnění v tyči c_l odvodil vztah

$$c_l = \frac{\sqrt{\frac{E}{s}}}{\sqrt{1 + \frac{k^2 \pi^2 r^2 \mu^2}{2l^2}}},$$

kde k je pořadí vlastního rezonančního stavu tyče, E modul pružnosti v tahu, s hustota materiálu tyče, μ Poissonův poměr. Vzhledem k vyšší rychlosti c_l v tyči tenké je také rezonanční kmitočet této tyče vyšší.

Rayleighův vztah byl na soustavě lavice několikrát pečlivě zkoumán, ale experiment nepotvrdil shodu s teoretickou formulací.

Tvary rezonančních křivek ukazují závislost činitele jakosti Q na průřezu tyčí. Tenký drát, podélně buzený, by se choval jako aperiodická soustava.

5.2. Vyšetření polohy uzlových bodů na tyči podrobené ohybovým kmitům

Teorie ohybových kmitů tyčí je velmi složitá a základní veličiny jsou v závěru teorie řešeny přibližnými numerickými metodami. Tak je tomu při stanovení vlastních rezonančních frekvencí a obdobně při stanovení rozložených uzlů na tyči. Experimentální cestou je možno velmi rychle stanovit příslušné vlastní frekvence jak pro tyč volnou, tak vetknutou snímáním chvění volného konce tyče, kde vždy leží kmitná amplituda rychlosti. Posouváním snímače podél tyče v axiálním směru stanovíme rozložení uzlů.

Částkové frekvence tyče s kruhovým průřezem tvoří posloupnosti bodů

I $\{\beta_n, f_n\}$ pro tyč volnou,

II $\{\beta'_n, f'_n\}$ pro tyč vetknutou.

Jsou kvadratickými funkcemi proměnných hodnot β_n a β'_n

$$f_n = K\beta_n^2 \text{ a } f'_n = K\beta_n'^2.$$

Konstanta K závisí na geometrických rozměrech tyče a materiálových konstantách. U tyče kruhového průřezu je rovna

$$K = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{ER^2}{s}},$$

kde E je modul pružnosti v tahu, s hustota, R obecně vyjádřený poloměr setrvačnosti průřezu tyče.

Koeficienty β , β' se určují složitým výpočtem, který vede k přibližným výrazům

$$\beta_n \doteq n + \frac{1}{2} ; n > 2 \text{ celé,}$$

$$\beta'_n \doteq n - \frac{1}{2} ; n > 2 \text{ celé.}$$

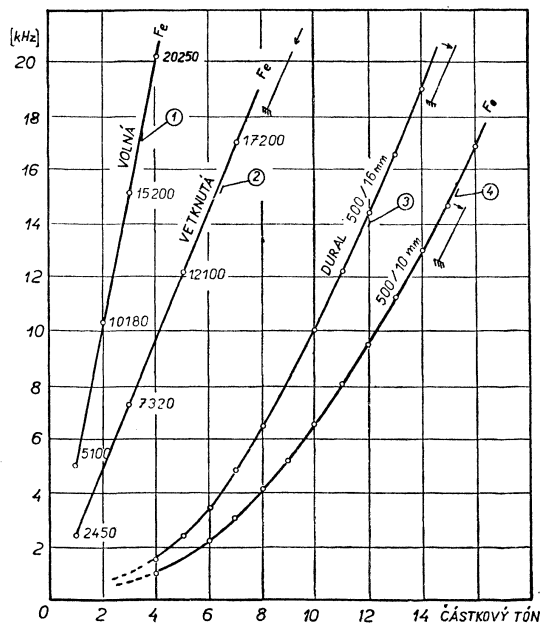
Je zřejmé, že platí

$$\beta'_n \doteq \beta_{n-1},$$

a tím také

$$f'_n \doteq f_{n-1}$$

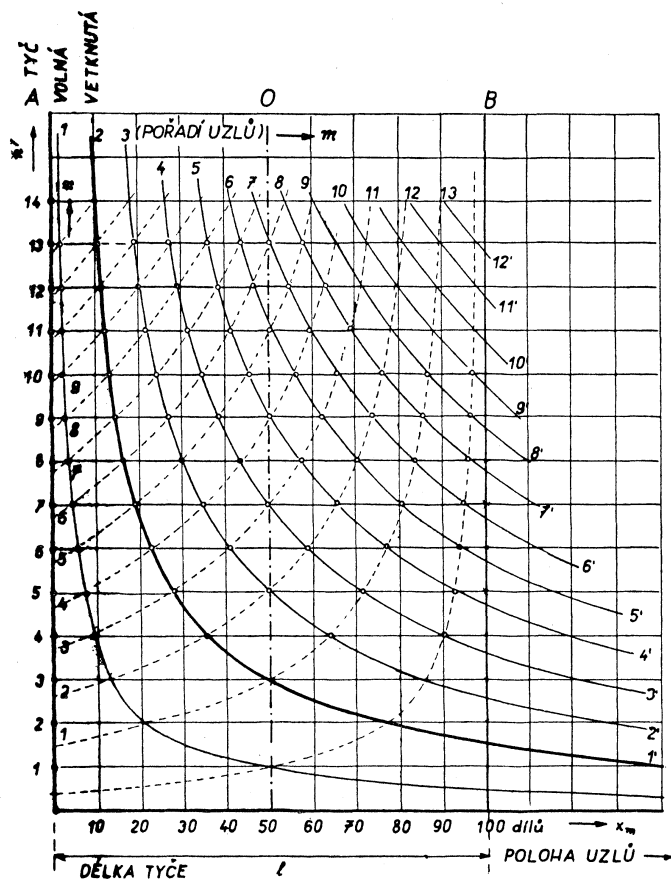
Vlastní frekvence tyče je možno velmi rychle ověřit popsanou metodou. Za stavu rezonance tyče vystoupí hodnota snímaného signálu velmi ostře i o 60 dB nad pozadí. Rychle lze získat křivky podle obr. 42, kde je uvedeno rozložení vlastních frekvencí dvou stejných tyčí, vynucených do podélného a ohybového



Obr. 42

chvění. Tato metoda má velký význam u rezonátorů zvláštních tvarů, kde není možno vlastní frekvence stanovit teoreticky.

Při studiu vlastností mechanických rezonátorů ohybově kmitajících má velký význam znalost rozložení uzlových čar. Zvláště u rezonátorů speciálních tvarů. V jednoduchém případě tyče s konstantním kruhovým průřezem přejímají i novější autoři hodnoty rozložení uzlů od volného konce od Seebeka a Donkina, jak se s nimi setkáme v teorii mechanických rezonátorů. Na popsané soupravě akustické lavice je možno stanovit rozložení uzlových bodů pro různé částkové frekvence tyče, které pak platí obecně pro jakoukoliv tyč s kruhovým průřezem. V obr. 43 je uvedena naměřená soustava uzlových bodů na tyči volné v pořadí



Obr. 43

$m = 1, 2, 3, \dots$ od volného konce tyče, pro částkový tón n . Na tyči vetknuté v pořadí $m' = 1', 2', 3', \dots$ od pevného konce. Spojnice uzlových bodů tvoří soustavy hyperbol souměrných podle osy O , jdoucí středem tyče kolmo k ose. Pro oba způsoby uchycení tyčí je soustava společná, liší se jen v případě tyče

vetknuté, kdy první uzly tyče volné přejdou na pevný konec tyče vetknuté. Soustava začíná rozložením $m' = 1'$.

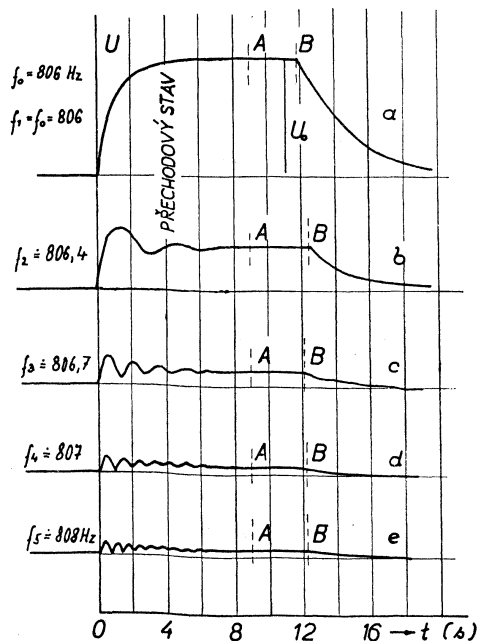
Autentický záznam rozložení uzlů na kruhové tyči je v obr. 45, záznam E.

5.3. Experimentální technika při studiu přechodových jevů mechanického rezonátoru

Experimentální studium přechodových jevů na mechanickém rezonátoru má mnoho výhod proti přímému studiu těchto jevů na rezonátorech elektrických. Při vysoké kvalitě mechanického rezonátoru, vyjádřené činitelem Q probíhají přechodové jevy velmi pozvolna (i několik vteřin) v kmitočtové oblasti velmi nízké frekvence. Lze sledovat jak frekvenční variace kmitů rezonátoru, tak časové změny amplitud v době trvání přechodového procesu.

V obr. 44 jsou uvedeny křivky odpovídající odezvě rezonátoru na jednotkový skok budící síly při různém odstupu frekvence f_1 budící síly od vlastní frekvence rezonátoru f_0 . Rychlá demonstrace s okamžitým záznamem průběhu poskytne rychlou fyzikální interpretaci teoreticky vyvozeného jevu.

Při praktickém uspořádání působí budící síla sinusového průběhu prostřednictvím akustického zářiče na kruhovou desku (vhodný tvar rezonátoru) uchycenou ve středu. Vazba mezi zářičem a rezonátorem je volná a řízená vzdáleností zářiče od desky. Chvění desky je snímáno dotekově u obvodu desky. Tlumení snímačem je minimální a konstantní. Fáze demonstrace jsou zřejmé z obr. 44.



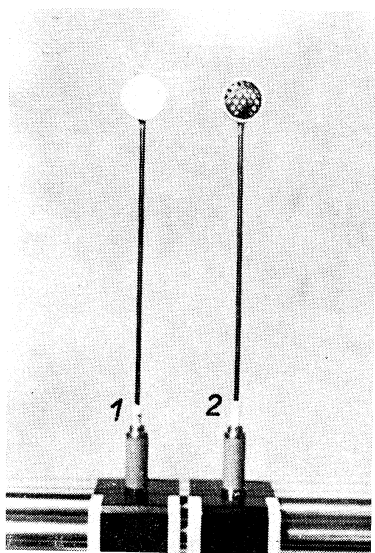
Obr. 44

5.3.1. Přechodové jevy při vynucených kmitech ladičky se zavedeným útlumem

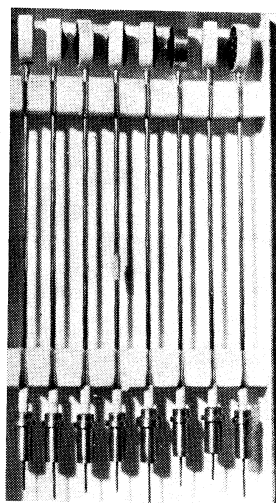
Soubor autentických záznamů v obr. 45 ukazuje vliv tlumení rezonátoru na průběh přechodových jevů. Rezonátorem je ladička s hodnotou Q asi 10 000. Buzení vynucených kmitů je opět provedeno volnou vazbou pomocí akustického pole. Křivka A udává chování rezonátoru po zavedení jednotkového skoku budicí síly v případě nulového tlumení (uměle zavedeného). Sled křivek odpovídá postupnému rozladování frekvence budicí síly a ukazuje příslušnou odezvu rezonátoru. Rozladování je velmi malé a odpovídá jednotkám kmitu. Výsledná amplituda U' je vynášena v poměrových souřadnicích $U' = \frac{U}{U_0}$.

Případy zaznamenaných křivek A , B , D odpovídají různým stupňům tlumení rezonátoru. Netlumený rezonátor nabíhá jen pozvolna do ustáleného stavu kmitání. Tlumený rezonátor naopak velmi rychle. Amplituda U_0 ustáleného stavu kmitů je velmi závislá na kmitočtu budicí síly. U tlumeného je tato závislost méně patrná. Tato skutečnost je ekvivalentní informacím odečteným z příslušných rezonančních křivek. Záznam C ukazuje zvýrazněný úkaz přechodových jevů posledního stadia křivky B při postupném zvyšování zesílení zapisovací soustavy. Ze záznamu D vystoupí velmi instruktivně skutečnost, že u velmi tlumeného rezonátoru probíhá proces nakmitávání velmi krátkou dobu, po které nastane ustálený stav. Rozladování budicí frekvence má za následek pomalý pokles amplitudy ustálených kmitů v závislosti na velikosti rozladění — rezonátor se chová jako širokopásmový prvek, ovšem za cenu nízké hodnoty amplitudy ustálených kmitů. Velmi zajímavé jsou i procesy dokmitávání, ke kterým dojde po náhlém přerušení budicího signálu. Rezonátor dokmitává s vynucenou frekvencí a současně přechází na frekvenci vlastních kmitů. Nestabilita se projeví vznikem rázů, jak je patrné z poslední křivky v záznamu C . Z křivek je možno odečíst příslušné parametry oscilátoru. Obloukový pohyb hrotu zapisovače však poněkud záznam zkresluje.

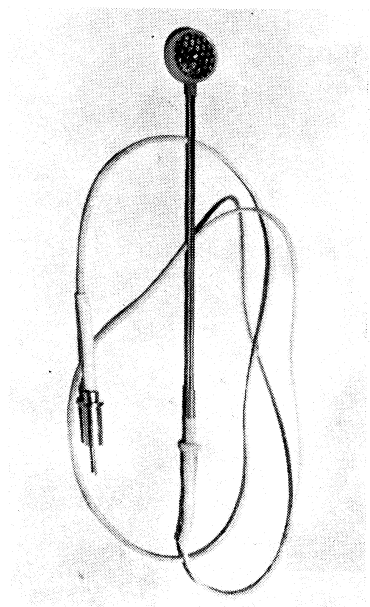
V závěru je nutno zdůraznit, že ve třetí části pojednání o problematice modernizace vyučování akustiky bylo možno uvést jen některé ukázky využití elektroakustické lavice pro účely experimentálních měření a pro fenomenologické popisy jevů akustického pole, bez širšího rozboru a matematického doprovodu. Teoretický aparát je všeobecně znám a v práci šlo o ukázky interpretace jeho dedukcí, které mají velký význam pro objasnění a konkretizaci fyzikální podstaty teorií vyjádřených jevů. Omezený rozsah příslušná rozvedení neumožňuje. Dílčí jevy budou zpracovány v samostatných monografiích.



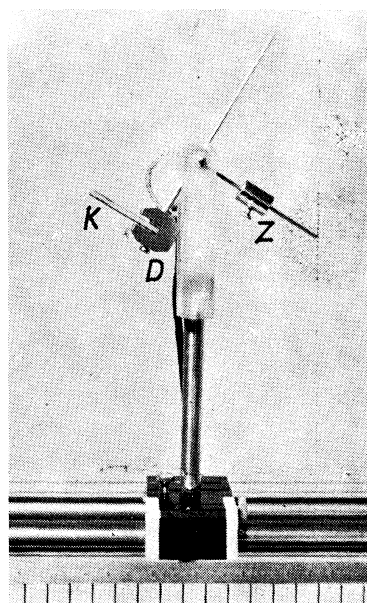
Obr. 12. Elektroakustické sondy
(1 – tlaková, 2 – gradientová sonda)



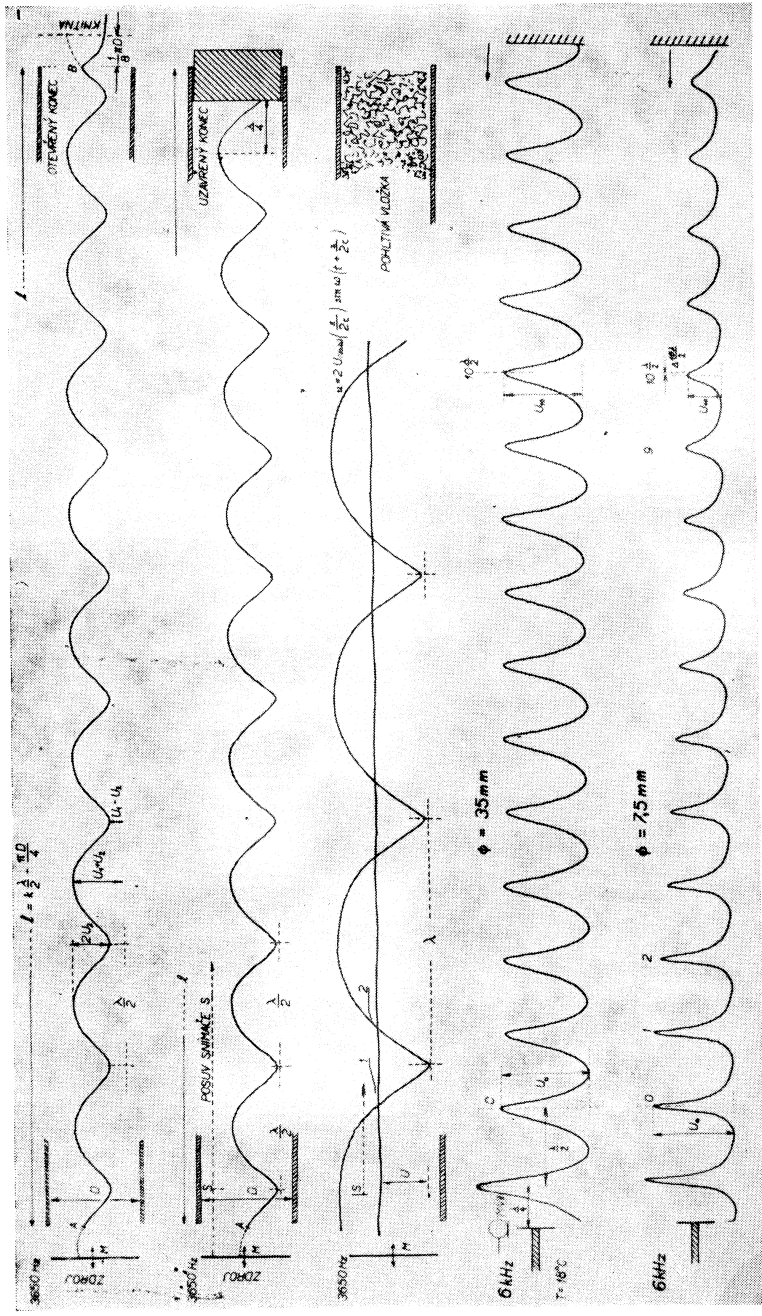
Obr. 13
Soubor elektroakustických sond



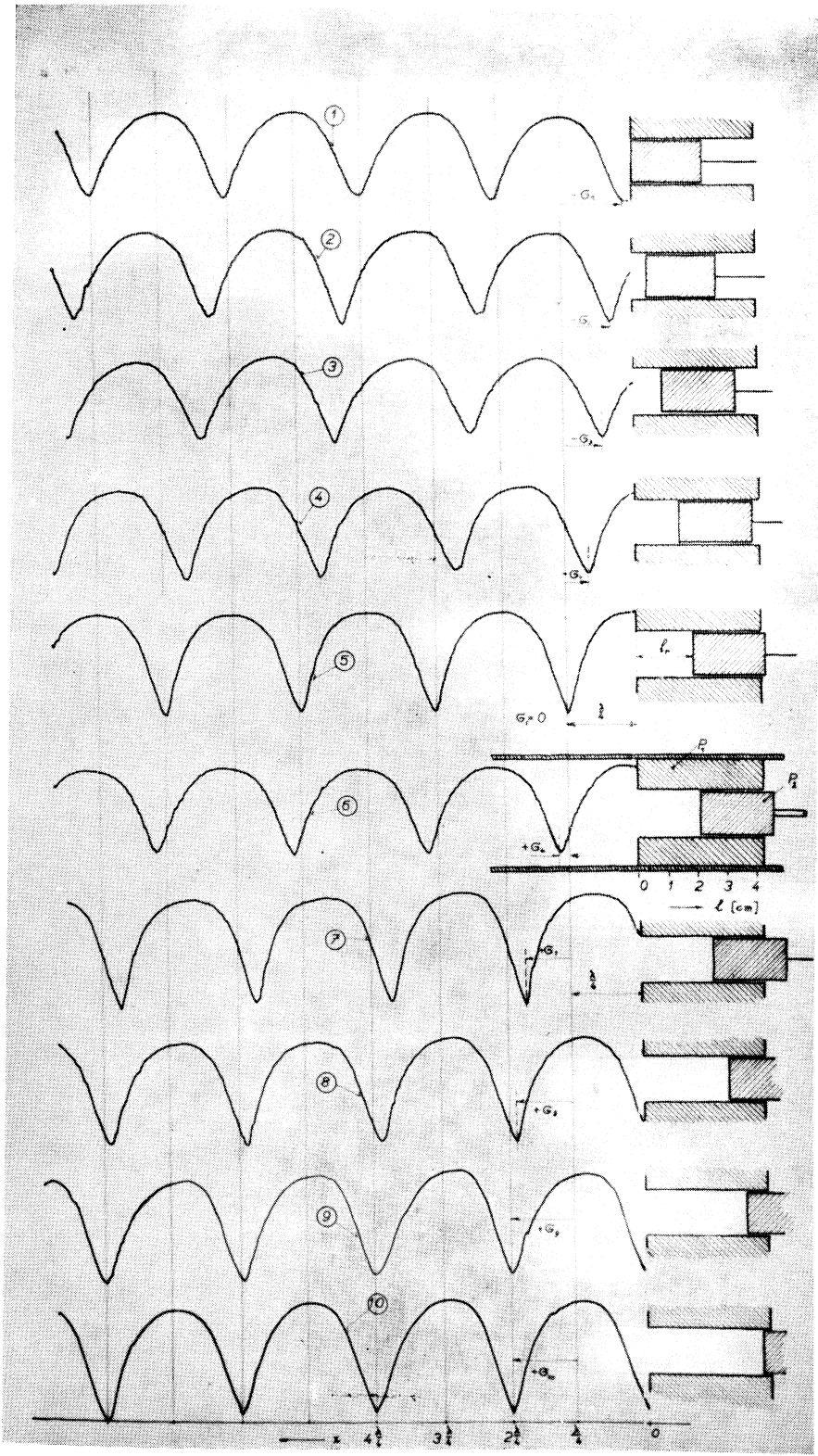
Obr. 16
Přenosná elektroakustická sonda

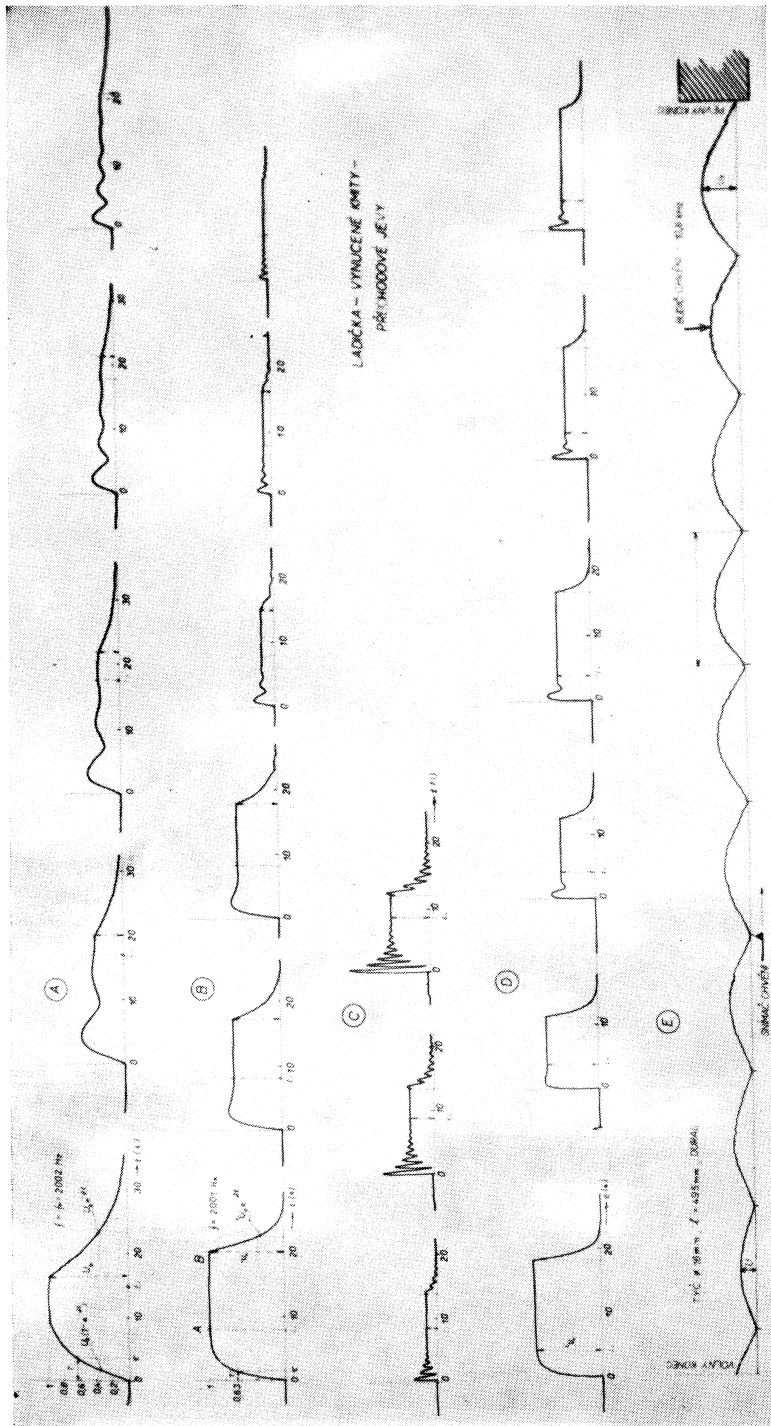


Obr. 18 Držák piezoelektrického tyčinkového budiče chvění.



Obr. 30





Obr. 45

LITERATURA

- [1] *Adolph R., Knesser, Schulz*: Die Eigenfrequenzen zylindrischen Stahlstäbe — Ann. Phys. 6 (1950), 99—104.
- [2] *Anders T.*: Beugung akustischen Wellen an kleinen kreisförmigen Öffnungen. — Zs. f. Phys. 135 (1953), 219—221.
- [3] *Beranek L.*: Acoustic Measurements (John Willey, 1950, New York).
- [4] *Bergmann L.*: Der Ultraschall und seine Anwendung in Wissenschaft und Technik — 5. Aufl. (Hirzel, 1949, Stuttgart).
- [5] *Braunbeck W.*: Neue Näherungsmethode für die Beugung am ebenen Schirm — Zs. Phys. 127 (1950), 381—5.
- [6] *Brdička M.*: Mechanika kontinua — (ČSAV, 1959, Praha).
- [7] *Eder F. X.*: Moderne Messmethoden der Physik — (Deutsche Verlag der Wissenschaften, 1952, Berlin).
- [8] *Fleury P., Mathieu J. P.*: Vibrations. Mécaniques. Acoustique — (Eyrolles, 1959, Paris).
- [9] *Houwink R.*: Elasticität, Plasticität und Struktur der Materie (Steinkopff, 1957, Leipzig).
- [10] *Michajlov I.*: Osnovy molekulárnoj akustiky — (ANCCCP, 1964, Moskva).
- [11] *Merhaut J. a kol.*: Elektroakustické měniče — (Skriptum, SNTL, 1963, Praha).
- [12] *Merhaut J. a kol.*: Příručka elektroakustiky — (SNTL, 1963, Praha).
- [13] Problemy sovremennoj akustiki — (Sbornik, ANCCCP, 1963, Moskva).
- [14] *Reichhardt W.*: Grundlagen der Elektroakustik, 3. Aufl. — (Akademische Verlagsgesellschaft, 1960, Leipzig).
- [15] *Relej*: Teorija zvuka I., II. — (GITTL, 1955, Moskva).
- [16] *Skučik E.*: (*Skudrzyk E.*) Osnovy akustiki I., II. — (Izd. inostr. lit., 1958, Moskva).
- [17] Vaprosy prikladnoj akustiki i vibracionnoj téchniki — (Sbornik, ANUCCP, 1966, Kijev).

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUR MODERNISATION DER UNTERRICHTSPROZESSE IN DER AKUSTIK

JAN KUNZFELD

In der Arbeit befasst sich der Autor mit den Problemen der Modernisation des Unterrichtsprozesses in der Akustiklehre, besonders mit der Modernisation der Demonstrations- und Messinstrumente. Der Autor berichtet über die physikalische Bedeutung der Akustik für die Auffassung der Erscheinungen moderner Physik, besonders der Physik der Kraftfelder, in denen analoge Vibrations- und Wellen-Prozesse verlaufen. Er legt Ergebnisse der Entwicklung einer neuen Mess- und Demonstrationsapparatur vor, die für Modellierung akustischer Felder in verschiedenen Modien dient. Die Apparatur ist mit elektronischem Zubehör, mit elektroakustischen Elementen und mit einer Registrierungseinrichtung ausgestattet. Zuletzt werden noch Beispiele neuer Demonstrations- und Mess-Vorgänge angeführt, wie sie die Apparatur ermöglicht.