ČESKOSLOVENSKÁ SOCIALISTICKÁ REPUBLIKA
( 19 )

ÚŘAD PRO VYNÁLEZY A OBJEVY

# POPIS OBJEVU K DIPLOMU

# 32

Přihlášeno: 13 04 78 /PO 31-78/
Právo přednosti od 31 10 73 pro bod 1. definice
/Lékař a technika, 1973, 5:81-84/
od 31 05 74 pro bod 2. definice
/Lékař a technika, 1974, 3:43-44/

Zveřejněno: Lékař a těchnika, 1973, 5:81-84
Lékař a technika, 1974, 3:43-44

Uděleno: 20 02 86

Vydáno: 15 06 86

MDT
534.7

Autoři objevu: WAGNER JIŘÍ CSc., PRAHA,
VESELÝ CTIBOR doc. MUDr. CSc., HRADEC KRÁLOVÉ

Název objevu: **Zákonitost rozlišování zvukových impulsů periferií sluchového analyzátoru**

Předmět objevu:

1. Zákonitost rozlišování dvou oddělených zvukových impulsů, přicházejících do ucha se stejnou amplitudou zvukového tlaku $A_1 = A_2$ a s vzájemným časovým odstupem $\Delta t$, jako dvou oddělených sluchových podnětů periferií sluchového analyzátoru, spočívající v rozlišovací schopnosti tohoto analyzátoru, vyjádřené vztahy

(1) $N(\Delta t) = N_2(\Delta t) : N^*$ (2) $N(\Delta t) = [N_1(\Delta t) - N^*] : N^*$

přičemž při $\Delta t > T$ se vybavují dvě oddělené nervové odpovědi a tedy i dva oddělené sluchové podněty, zatímco při $\Delta t \leq T$ se vybavuje jediná nervová odpověď a tedy i jediný sluchový podnět, přičemž znamená

$\Delta t$ = proměnný časový odstup obou zvukových impulsů,

$N^*$ = amplituda nervové odpovědi periferie sluchového analyzátoru na osamocený zvukový impuls o amplitudě zvukového tlaku $A^* = A_1 = A_2$,

$N_1 = N_1(\Delta t)$ resp. $N_2 = N_2(\Delta t)$ = amplituda nervové odpovědi periferie sluchového analyzátoru na prvý resp. druhý zvukový impuls, v závislosti na jejich časovém odstupu $\Delta t$,

$N = N(\Delta t)$ = průběh relativní amplitudy nervové odpovědi periferie sluchového analyzátoru na druhý zvukový impuls, pro časový odstup obou impulsů $\Delta t \geq T$,

$\Delta N = \Delta N(\Delta t)$ = průběh relativního přírůstku amplitudy nervové odpovědi periferie sluchového analyzátoru na prvý zvukový impuls, pro časový odstup obou impulsů $\Delta t \leq T$,

T = diskriminační faktor vyšetřovaného sluchového analyzátoru, definovaný jako taková hodnota časového odstupu $\Delta t$ mezi oběma zvukovými impulsy $A_1$ a $A_2$, při níž druhá nervová odpověď vymizí.

2. Zákonitost podle bodu 1, spočívající v tom, že při růstu amplitud zvukového tlaku obou impulsů $A_1$ a $A_2$ hodnota diskriminačního faktoru T klesá až na prahovou hodnotu $T_0$, která se při dalším zvyšování zvukového tlaku již nemění, a která je pro každého jedince charakteristická.

---

V technice prostorové akustiky se ke zjišťování akustických vlastností sálů používá impulsní měřicí metody, založené na vyhodnocování odpovědi sálu na krátký zvukový impuls do něho vyslaný. Celý proces se buď realizuje fyzikálně, nebo se digitálně modeluje na počítači. Digitální model procesu šíření a doznívání akustické energie v uzavřených prostorech (Wagner, J: Mathematical and logical criticism of the classical reverberation theory, Rozpravy Československé akademie věd, řada matematických a přírodních věd, ročník 81, sešit 3/1971, Academia Praha) byl vyvinut proto, že umožňuje rychlejší a snazší dosažení přesnějšího výsledku než časově náročná a pracná experimentální metoda, kde vysoké technické nároky na použité přístroje často omezují dosažitelný rozsah měření.

Souhlas výsledků digitálního modelování se skutečností byl ověřen měřením (Wagner, J: Digitální modely dozvukových polí, sborník Třetí pracovní konference československých fyziků Olomouc 1973, Academia Praha 1974), přičemž bylo prokázáno, že digitálním modelováním lze detailně určit akustické vlastnosti sálu již ve stadiu projektu, zatímco všechny ostatní metody je dokáží zjistit až na hotovém, vystavěném objektu.

Při digitálním modelování se zvuková vlna podle principů geometrické akustiky simuluje hustým izotropním svazkem zvukových paprsků (1 000 až 400 000), vysleným z jednoho nebo více zdrojů. Vyhodnocují se dopady zvukové energie přenášené jednotlivými zvukovými paprsky při jejich dopadu na zvolenou registrační plochu nebo do zvoleného registračního objemu. Dostáváme tak velmi husté časové spektrum dopadů elementárních kvant zvukové energie do jednotlivých registračních míst. Aby bylo možno tuto mohutnou a hustou množinu přesných informací převést do prakticky použitelné podoby, je nutno jednotlivá energetická kvanta vždy přes určitý časový interval (dále "sčítací interval") sečíst, a součet uvažovat jako hodnotu zvukové energie v čase, rovném středu příslušného sčítacího intervalu.

Na délce sčítacího intervalu podstatně závisejí výsledky vyhodnocení měření, jako např. průběh doznívání, průběh názvuku, i jednočíselné ukazatele z nich odvozené, např. doba dozvuku dané místnosti. Až do doby tohoto objevu byla délka sčítacího intervalu volena podle nejrůznějších technickofyzikálních kritérií, podle technických možností použitého měřicího zařízení (většinou jí odpovídala integrační konstanta dané aparatury), a především bez znalostí příslušných vlastností sluchového orgánu a jejich respektování; volba byla tedy v podstatě libovolná.

Objev přináší objektivní vyřešení tohoto problému. Ukazuje, že sluchový analyzátor zpracovává dva samostatné zvukové impulsy, přicházející do ucha s určitým časovým odstupem mezi nimi až do určité hodnoty tohoto časového odstupu jako jediný zvukový vjem; při dalším zvětšování časového odstupu jako dva zvukové vjemy. Hranici mezi oběma způsoby zpracování dvojice zvukových impulsů definuje objev jako diskriminační faktor sluchového analyzátoru. Pro digitální modelování šíření a doznívání zvuku tedy hodnota diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru představuje délku sčítacího intervalu, určenou podle přirozených zákonů percepce zvuku. Objev dále přináší zjištění jevů, které oba způsoby zpracování dvojice zvukových impulsů provázejí a zjištění zákonitostí, jimiž se zpracování řídí.

Objev dává možnost širokých technických aplikací v oboru průmyslové akustiky a akustiky kulturních, shromažďovacích a pracovních prostorů, jelikož řeší výše zmíněnou otázku časové integrace zvukové energie, která je pro hodnocení akustických vlastností místností otázkou klíčovou; objev přináší řešení na základě zjištění dosud neznámých vlastností sluchového analyzátoru. Z biologického hlediska představují zákonitosti různého zpracování dvojice zvukových impulsů při jejich různém časovém odstupu i existence diskriminačního

faktoru sluchového analyzátoru nové poznatky, které nebyly v biologické oblasti dosud popsány.

Podstatou objevu je především zjištění zákonitostí rozlišování dvou oddělených zvukových impulsů, přicházejících do ucha se stejnou amplitudou zvukového tlaku $A_1 = A_2$ a s vzájemným časovým odstupem $\Delta t$. Periferie sluchového analyzátoru je zpracovává na sluchové vjemy podle zásad rozlišování, které můžeme vyjádřit dvěma rovnicemi:

(1) $$N(\Delta t) = N_2(\Delta t) : N^*$$

(2) $$N(\Delta t) = [N_1(\Delta t) - N^*] : N^*$$

Význam jednotlivých veličin je patrný z obr. 2. V jeho horní části jsou ve druhém řádku vyneseny průběhy zvukovéhp tlaku impulsů o amplitudách $A_1$ a $A_2$ (dvojice), nebo průběh osamoceného impulsu (vpravo) o amplitudě $A^*$; všechny tři amplitudy jsou si rovny. V prvním řádku jsou naznačeny průběhy nervových odpovědí, označené $N_1$, $N_2$ a $N^*$ (indexy jsou shodné s indexy amplitud akustického tlaku), nebo obecně N. Amplitudu první vlny nervové odpovědi $N^*$ na osamocený zvukový impuls $A^*$ považujeme za amplitudu jednotkovou, protože není ovlivněna žádným předcházejícím zvukovým signálem, a poskytne nám pro další vyhodnocování potřebný standard. Z obrázku je vidět, že nervová odpověď na každý impuls přichází s určitým zpožděním po příchodu zvukového impulsu. Dobře je to patrné z obrázků 3 a 5, což jsou autentické záznamy z elektrofyziologických experimentů.

Symbolem T je v obrázku 2 označena hodnota diskriminačního faktoru vyšetřovaného sluchového analyzátoru. V horní dvojici řádků je časový odstup impulsů $\Delta t$ volen větší než diskriminační faktor T, takže na dva přicházející impulsy $A_1$ a $A_2$ odpoví ucho dvěma sluchovými vjemy, charakterizovanými amplitudami vytvořených nervových odpovědí $N_1$ a $N_2$. Je to případ, který na obrázku 5 ukazuje záznam z elektrofyziologického experimentu ve 3. a 4. stopě. Odpověď $N_2$ má zřetelně menší amplitudu než odpověď $N_1$; obrázek 5 zřetelně ukazuje, jak tento rozdíl amplitud závisí na hodnotě časového odstupu $\Delta t$ mezi oběma zvukovými impulsy $A_1$ a $A_2$. Obecně je tato závislost amplitudy druhé nervové odpovědi $N_2(\Delta t)$ na časovém odstupu $\Delta t$ zvukových impulsů $A_1$ a $A_2$ vyjádřena rovnicí (1) a graficky pravou větví diskriminační charakteristiky v obr. 1. Jde o relativní velikost nervové odpovědi vzhledem k nervové odpovědi $N^*$ na osamocený zvukový impuls $A^*$, jak bylo uvedeno výše.

Spodní část obr. 2 ukazuje případ, kdy časový odstup obou zvukových impulsů stejné amplitudy je menší než hodnota diskriminačního faktoru T. Na oba oddělené zvukové impulsy se vybaví jediná nervová odpověď $N_1$, a tedy i jediný sluchový vjem, jak lze sledovat na 2. stopě záznamu z elektrofyziologického experimentu na obr. 5. Je patrno, že charakter průběhu nervové odpovědi je zde stejný jako u odpovědi na jediný, osamocený impuls $A^*$. Obrázek 2 však navíc ukazuje, že v tomto případě může být amplituda nervové odpovědi $N_1$ proti odpovědi $N^*$ větší o přírůstek $\Delta N$, jak bylo zjištěno měřením.

Hodnota přírůstku $\Delta N$ se z naměřených hodnot amplitud nervové odezvy $N_1$ a $N^*$ vypočte podle rovnice (2); závislost této hodnoty na časovém odstupu $\Delta t$ obou zvukových impulsů $A_1$ a $A_2$ ukazuje levá větev diskriminační charakteristiky sluchového analyzátoru v obr. 1. Je to křivka heterogenní, jejíž pravá větev při postupu zprava doleva znázorňuje pokles amplitudy nervové odpovědi $N_2$ na druhý zvukový impuls ($A_2$) z dvojice impulsů $A_1$, $A_2$ při zmenšování jejich časového odstupu $\Delta t$. Při poklesu tohoto odstupu na hodnotu diskriminačního faktoru T ukazuje nulová amplituda $N_2$ že tato druhá nervová odpověď zaniká.

Přírůstek $\Delta N$ amplitudy odpovědi $N_1$ na první z obou zvukových impulsů ($A_1$) má v bodě $\Delta t = T$ rovněž nulovou amplitudu, což znamená, že amplituda odpovědi $N_1$ na prvý impuls $A_1$ dosud není ovlivněna existencí druhého impulsu dvojice $A_2$. K tomu dochází při dalším přibližování obou impulsů: postupujeme-li po diskriminační charakteristice dále vlevo, vidíme, že se přírůstek $\Delta N$ amplitudy nervové odpovědi $N_1$ zvětšuje.

Jinak můžeme význam diskriminační charakteristiky sluchového analyzátoru vyložit také takto: dva fyzikálně oddělené zvukové impulsy spadající (podle jejich časového odstupu) do levé větve diskriminační charakteristiky vzbuzují jediný sluchový vjem (jehož intenzita závisí na hodnotě přírůstku $\Delta N$), dva impulsy spadající do pravé části charakteristiky vzbuzují dva sluchové vjemy, přičemž intenzita druhého z nich závisí na časovém odstupu $\Delta t$ výše popsaným způsobem. Při plynulém zvyšování nebo snižování časového odstupu $\Delta t$ indikuje posluchač průchod bodem $\Delta t=T$ tím, že pozoruje změnu kvality sluchového vjemu.

Další zjištěná zákonitost, která spoluvytváří podstatu objevu, spočívá v závislosti hodnoty diskriminačního faktoru T na amplitudě akustického tlaku obou impulsů $A_1$ a $A_2$: při zvyšování této amplitudy klesá hodnota diskriminačního faktoru T až na prahovou hodnotu $T_0$, která se při dalším zvyšování zvukového tlaku již nemění, a je pro každého jedince charakteristická.

Závislost hodnoty diskriminačního faktoru na intenzitě zvuku a na stupni trénovanosti sluchu ukazuje obr. 6. Obr. 6a ukazuje vyšetření 7 hudebníků, obr. 6b výsledky získané u 7 nemuzikálních osob. Opakovací frekvence dvojice impulsů byla v obou případech 8 za sekundu. V obrázku 6c jsou zprůměrovány výsledky vyšetření nemuzikálních i muzikálních osob při různých opakovacích frekvencích OF = 2/s, 4/s, 8/s, v obr. 6d je pro každou z obou skupin M (hudebníci) a N (nehudebníci) vyznačen průměr přes všechna měření. Přibližování hodnoty diskriminačního faktoru T k jeho prahové hodnotě $T_0$ při zvyšování zvukové intenzity (tj. při postupu zprava doleva) je nejlépe patrné z průměrných křivek, stejně tak i vliv trénovanosti sluchu a vliv opakovací frekvence OF; jeho nevýznamný vliv na hodnotu diskriminačního faktoru T u skupiny hudebníků (M) dokumentuje vliv trénovanosti sluchu z dalšího hlediska.

## DŮKAZ OBJEVU

Důkaz objevu byl proveden experimentálně. Sledujeme-li cestu zvukového podnětu mezi vnějším prostředím a centrálním nervovým systémem, nalezneme, že dříve než je zvukový signál zakódován do číslicového kódu nervových drah, je zpracován strukturami vnějšího a vnitřního ucha. Vlastní překlad zvukového podnětu do jazyka počítače nervové soustavy se uskutečňuje v synapsích mezi Cortiho orgánem a prvým neuronem sluchové dráhy.

Synapse funguje jako analogo-číslicový převodník. Na určité úrovni spojitého signálu v presynaptické struktuře odpoví postsynaptický element jednorázovým vzruchem, jehož elektrický projev (akční potenciál) má co do amplitudy i tvaru uniformní charakter. Šíří se po neuronu až k další synapsi. Sledování činnosti i několika málo neuronů je velmi složitá statistická úloha, protože v synapsích je poměr aktivit jen zřídkakdy 1:1, může nabývat nejrůznějších hodnot a za různých fyziologických stavů se plasticky mění.

Při studiu diskriminačních vlastností a schopností sluchového analyzátoru se pozornost soustředila na aktivitu prvého neuronu sluchové dráhy; to proto, že právě převod mezi čivými buňkami Cortiho orgánu a prvým neuronem je místo, kde jsou schopnosti sluchového analyzátoru omezeny. Dále proto, že zde nastává elementární analogo-číslicová transformace zvukového signálu, která ještě není zatížena složitými zákonitostmi sdílení informace po nervových drahách.

Další aspekty přenosu zvukového podnětu ukazují, že při jeho zpracování pracují první neurony sluchové dráhy nesynchronně. Synchronizovaného vybavení akčního potenciálu ve všech nebo alespoň ve větším počtu neuronů se dosáhne například stimulací krátkým zvukovým impulsem (klikem). Synchronizace akčních potenciálů pak nastává proto, že tento podnět za určitých podmínek vybudí všechny nebo alespoň velkou část neuronů k aktivitě zhruba se stejnou latencí. Vhodně umístěná elektroda pak zaznamená charakteristickou odpověď, složenou z mikrofonní složky (CM) produkované Cortiho orgánem s kratší latencí,

a ze sumy nervových akčních potenciálů (s delší latencí), která vykazuje jeden i více vrcholů. Příklad charakteristické odpovědi na jediný (osamocený) zvukový impuls je na obrázku 3; zde je rovněž patrno, že při zvyšující se amplitudě akustického tlaku impulsu se latence nervové odpovědi poněkud snižuje.

Tyto důvody vedly k názoru, že pro zjištění schopnosti sluchového analyzátoru rozlišit dva oddělené zvukové impulsy jako dva oddělené sluchové vjemy je rozhodující experimentálně stanovit, za jakých podmínek vybavuje periferie sluchového analyzátoru na dva oddělené zvukové impulsy dvě oddělené nervové odpovědi, a za jakých podmínek na ně vybavuje odpověď jedinou; dále za jakých podmínek tyto jevy probíhají a jakými zákonitostmi se řídí. Podle tohoto cíle byla zvolena experimentální metodika důkazu objevu.

## EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA

Pokusy byly rozděleny do dvou částí: vyšetření sledovaných jevů na pokusných zvířatech a ověření dosažených výsledků na člověku.

Pokusným zvířetem bylo morče, jehož sluchový analyzátor má s lidským stejnou funkční strukturu. Pokusná aparatura (obr. 4) sestávala ze stimulační jednotky STIM, která ve volitelném časovém odstupu spouštěla generátory GEN 1 a GEN 2 vzájemně shodných, tvarově i amplitudově přesně definovaných zvukových impulsů, dále časovou základnu osciloskopu a 800-kanálový paměťový analyzátor DIDAC. Stimulační jednotka opakovala dvojici impulsů s volitelným opakovacím kmitočtem OF. Reproduktory R1 a R2 obou generátorů byly umístěny v bezdozvukové komoře o objemu asi 1 $m^3$ a byly nasměrovány na hlavu pokusného zvířete, fixovaného na podložce. Shoda průběhu zvukového tlaku obou impulsů se před každým pokusem kontrolovala čtvrtpalcovým měřicím mikrofonem M, který při vlastním pokusu sloužil k určení polohy zvukových impulsů na časové ose.

Pokusné zvíře mělo zavedenu snímací elektrodu k okrouhlému okénku kochley. Snímané potenciály (řádově desítky mikrovoltů) se předzesilovaly a monitorovaly na osciloskopu, dále se přiváděly na vstup analyzátoru DIDAC. Průběh elektrické odpovědi kochley i průběh zvukového tlaku obou impulsů se vzorkoval, maximální vzorkovací kmitočet byl 100 kHz. Vzorky se ukládaly do paměti analyzátoru, stimulace se v každém pokusu opakovala 200 i vícekrát.

Zprůměrované výsledky každého pokusu se zobrazovaly na paměťové obrazovce analyzátoru, odkud se fotografovaly; příklad ukazuje obr. 5. Na dolní lince je vždy zaznamenán průběh akustického tlaku stimulujících zvukových impulsů, na horní lince průběh sumy akčních potenciálů příslušných nervových odpovědí. Oba paprsky jsou časově cejchovány a synchronizovány, takže ze snímků bylo možno odečítat vedle amplitud i hodnoty časového odstupu zvukových impulsů či nervových odpovědí, i latence nervových odpovědí proti budícímu impulsu. Pro vyhodnocování byly používány zvětšené snímky.

## VÝSLEDKY POKUSŮ NA ZVÍŘATECH

Obrázek 5 ukazuje čtyři charakteristické případy stimulace. Na první stopě je zachycena odpověď na jediný (osamocený) podnět, na dalších stopách je vždy odpověď na dva zvukové impulsy, s různým časovým odstupem. Latence prvního vrcholu nervové odpovědi proti vrcholu zvukové vlny byla ve všech případech 1,2 milisekundy.

Na druhé stopě je dvojice zvukových impulsů $A_1$ a $A_2$ s časovým odstupem 0,6 ms. Porovnání nervové odpovědi na tuto dvojici impulsů s nervovou odpovědí na jediný (osamocený) zvukový impuls v první stopě nevykazuje žádný rozdíl. Z toho vyplývá, že eperiferní struktury sluchového analyzátoru v obou případech zpracovávají podněty na jediný sluchový vjem.

Ve třetí stopě je zachycena stimulace dvěma zvukovými impulsy s časovým odstupem 3,72 ms. Zde se již vytvářejí dvě zřetelné, oddělené nervové odpovědi $N_1$ a $N_2$. Povšimněme si však, že amplituda druhé nervové odpovědi ($N_2$) je proti amplitudě první odpovědi ($N_1$) znatelně nižší, přestože amplitudy akustického tlaku obou impulsů jsou stejné ($A_1=A_2$).

V posledním případě je časový odstup zvukových impulsů 8 ms. Je vidět, že amplituda nervové odpovědi $N_2$ na druhý akustický impuls $A_2$ se zvětšujícím se časovým odstupem mezi impulsy roste, a zde se již blíží amplitudě nervové odpovědi $N_1$ na prvý zvukový impuls $A_1$.

Tyto výňatky ze série měření ukazují charakteristickou závislost nervové odpovědi $N_2$ na časovém odstupu $\Delta t$ mezi oběma zvukovými impulsy $A_1$ a $A_2$, podrobně popsanou pravou větví diskriminační charakteristiky sluchového analyzátoru v obr. 1 a rovnicí (1). Porovnání amplitudy $N_2$ s amplitudou nervové odpovědi $N^*$ na osamocený zvukový impuls $A^*$ bylo použito proto, aby bylo a priori vyloučeno možné zkreslení výsledku závislostí amplitudy $N_1$ na přírůstku $\Delta N$ podle rovnice (2).

Pravá větev diskriminační charakteristiky v obr. 1 ukazuje, že při časovém odstupu obou zvukových impulsů nad 15 ms jsou amplitudy prvé i druhé nervové odpovědi sluchového analyzátoru zpravidla stejné ($N_1=N_2$) a rovné amplitudě nervové odpovědi periferie na osamocený zvukový impuls ($N_1=N_2=N^*$), takže relativní velikost druhé odpovědi je jednotková ($N=1$).

Jak je patrno z popisu, pokusy probíhaly podle běžných elektrofyziologických metod, takže výsledky jsou snadno ověřitelné. Je třeba dodat, že zdvojení amplitudy nervové odezvy $N_1$ i průběh přírůstku $\Delta N$ při krátkých časových odstupech obou impulsů byly zjišťovány za podmínek, kdy amplituda sledované nervové odpovědi je ještě lineárně závislá na amplitudě akustického tlaku.

OVĚŘENÍ PLATNOSTI OBJEVU PRO ČLOVĚKA

Prvé pokusy o ověření vycházely z předpokladu, že o rozlišení dvou oddělených zvukových impulsů jako dvou oddělených sluchových vjemů rozhodují vstupní struktury sluchového analyzátoru a jejich funkční mechanismy. Jinak řečeno, má-li se kdekoli na sluchové dráze objevit informace o dvojici sluchových vjemů, musí být příslušné dva zvukové impulsy nejprve rozlišeny periferními strukturami. Proto jsou meze schopnosti rozlišit dva podněty periferními strukturami předpokládanými mezemi možností a schopností celého sluchového analyzátoru.

V elektrofyziologických experimentech na morčatech bylo prokázáno, že nejmenší časový odstup $\Delta t$ dvou zvukových impulsů, při kterém je ještě periferními strukturami zaznamenána a vyšším oddílům sluchového analyzátoru postoupena informace o dvou různých sluchových vjemech, leží mezi 500 a 600 mikrosekundami.

Dále byl uspořádán pokus ověřit na člověku - v jednoduše uspořádaném experimentu - - alespoň v hrubých rysech toto:

a) zda pracovní předpoklad, že vlastnosti periferních struktur sluchového analyzátoru jsou určujícími kvalitami při hledání rozlišovací hranice pro dva zvukové impulsy, je správný;

b) zda existuje a jaká je závislost hodnoty diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru na intenzitě zvukového impulsu;

c) zda hodnoty diskriminačního faktoru T, nalezené v elektrofyziologickém experimentu na morčatech, lze kvalitativně a kvantitativně srovnávat s hodnotami nalezenými u člověka;

d) zda hodnota diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru závisí na vlastnostech jednotlivce a na jakých.

EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA U ČLOVĚKA

Ke generaci zvukových impulsů bylo použito stejného technického zařízení jako v elektrofyziologickém experimentu na morčatech. Rovněž poslechové prostředí bylo tlumeno tak, aby se co nejvíce podobalo podmínkám vyšetřování morčat.

Dva generátory zvukových impulsů s přesně definovaným tvarem a amplitudou byly řízeny stimulační jednotkou, která dvojice impulsů opakovala s volitelným opakovacím kmitočtem. Vyšetření probíhalo při opakování dvojice zvukových impulsů dvakrát, čtyřikrát a osmkrát za sekundu. Časový odstup obou impulsů ve dvojici byl plynule řiditelný od nuly do několika sekund, v experimentu byl využit rozsah regulace 0 až 35 ms.

Základní hodnota intenzity zvukových impulsů byla stanovena poslechovým testem, porovnáním intenzity subjektivního vjemu hlasitosti použitých impulsů s hlasitostí sinusového signálu o intenzitě 70 dB. Na této hodnotě byla amplituda akustického tlaku měřením kontrolována a udržována. Jednotlivé hladiny intenzity byly cejchovány podle změn maxima akustického tlaku. Měřilo se celkem při 10 stupních zvukové intenzity, které se vzájemně lišily přibližně o 1 dB, přičemž nejvyšší hodnota byla zmíněných 70 dB.

Pokusné osoby byly umisťovány jedním uchem v ose zářičů obou generátorů zvukových impulsů. V tomto místě byla předem ověřena objektivní časová poloha obou zvukových impulsů na časové ose pomocí měřicího mikrofonu a osciloskopu. Na začátku byl časový odstup obou impulsů dvojice nulový, pak se impulsy od sebe vzdalovaly standardní rychlostí. Pokusné osoby měly za úkol oznámit, kdy se charakter sluchového vjemu začne lišit od vjemu jediného podnětu nebo - přesněji řečeno - od vjemu takového uspořádání dvojice impulsů, při němž oba podněty vnímáme jako jediný sluchový vjem.

EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY U ČLOVĚKA

Již první pokusy ukázaly, že

a) hodnoty diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru lze popsaným způsobem zjišťovat;

b) hodnoty diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru se u jednotlivých osob poměrně značně liší;

c) hodnoty diskriminačního faktoru jednotlivců závisejí na stupni trénovanosti jejich sluchu, tj. na tom, zda jsou zvyklí sluchu k jemné diferenciaci používat;

d) hodnoty diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru všech zkoušených jednotlivců jednoznačně závisely na intenzitě použitých zvukových impulsů.

Vzhledem k tomu, že skupina jednotlivců s lepší rozlišovací schopností byla tvořena vesměs hudebníky, tj. aktivními či pasivními znalci hudby, dělily se v dalším všechny pokusné osoby na hudebníky (M) a nehudebníky (N). Výsledky šetření byly získány na dvou skupinách typických představitelů obou skupin, a byly zpracovány na počítači běžnými statistickými metodami; obě skupiny pokusných osob byly sedmičlenné.

Výsledky dosažené v ověřovacích pokusech u lidí byly podrobně diskutovány již výše. Na všech je jasně patrná reprodukovatelná závislost diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru na intenzitě zvukového impulsu: s úbytkem intenzity hodnota diskriminačního faktoru roste, a schopnost rozlišit dva fyzikálně oddělené zvukové impulsy jako dva oddělené sluchové vjemy klesá.

Výsledky měření při různých opakovacích kmitočtech OF nevykazují statisticky významné rozdíly, i když zvláště u nehudebníků (N) je patrna určitá tendence ke zlepšování diskriminační schopnosti se zvyšujícím se opakovacím kmitočtem, jak ukazuje srovnání v obrázku 6c.

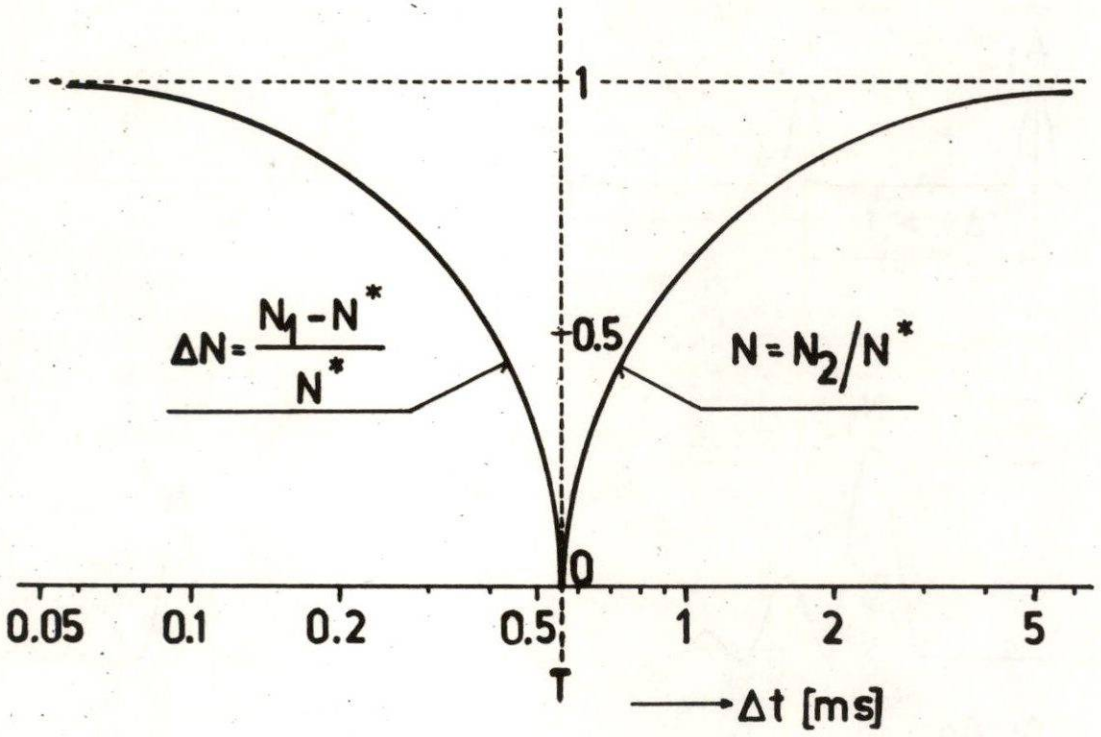
Výrazný a statisticky významný rozdíl se objevil mezi skupinou nehudebníků (N) a hudebníků (M); v celkovém průměru ze všech měření v každé skupině jej ukazuje obrázek 6d.

Nejkratší časové intervaly mezi dvěma zvukovými impulsy, při kterých posluchači identifikovali dva sluchové vjemy (tedy v našem vyjádření nejmenší hodnoty diskriminačního faktoru sluchového analyzátoru), byly zjištěny při nejvyšší použité hladině zvukové intenzity, a pohybovaly se u hudebníků od 550 do 750 mikrosekund, u nehudebníků od 600 do 1 020 mikrosekund (shrnuto přes všechny použité opakovací kmitočty). Při nejnižší použité hodnotě intenzity zvukových impulsů se hodnota diskriminačního faktoru pohybovala u hudebníků (M) od 1 000 do 1 500 mikrosekund, u nehudebníků (N) od 1 300 do 2 000 mikrosekund (při opakovacím kmitočtu OF=2/s se objevil i jeden případ T=2 500 mikrosekund).

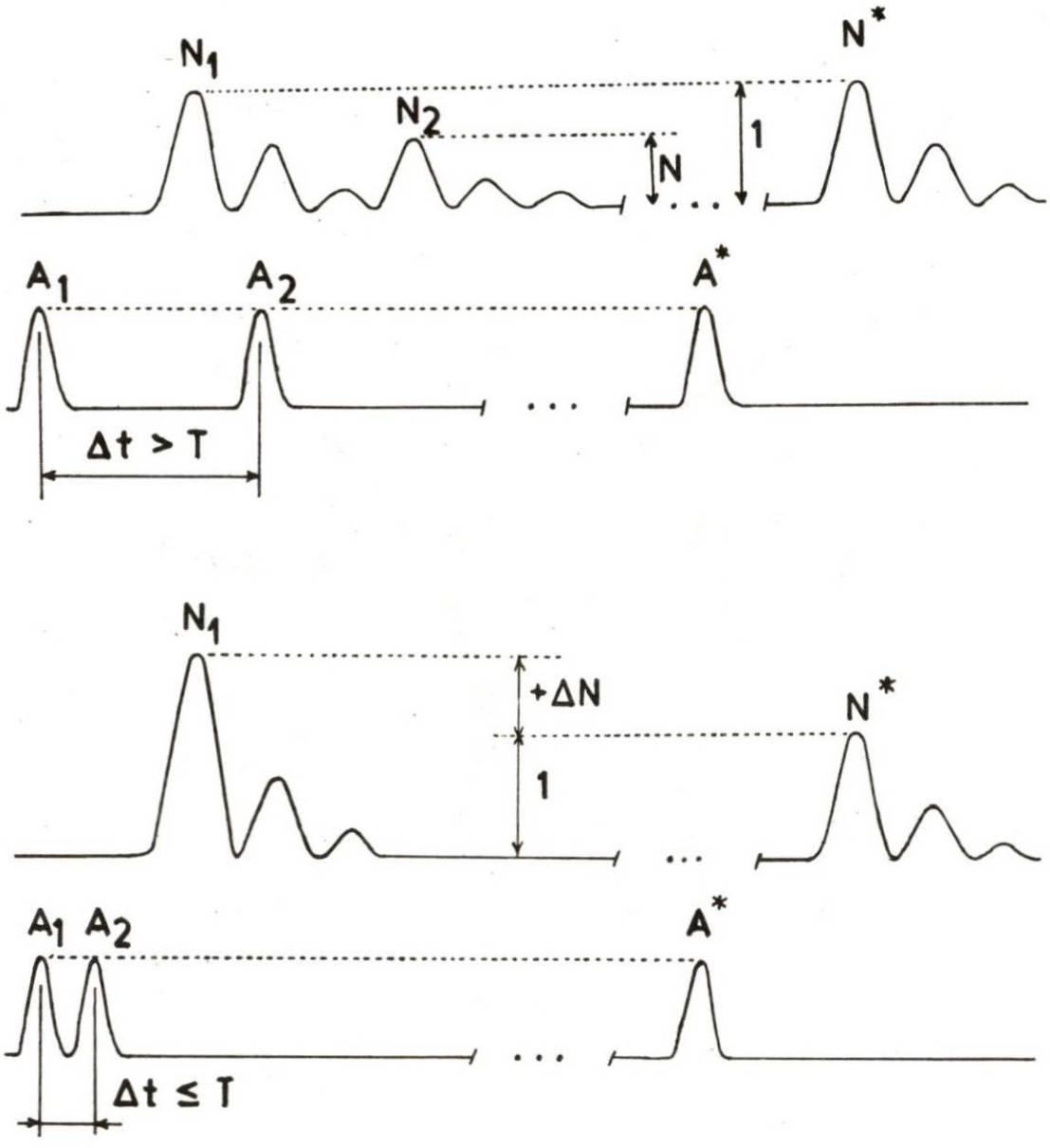
VYUŽITÍ OBJEVU

Využití objevu spočívá především v tom, že umožnil zavést do fyzikálních úvah o akustickém poli matematicko-fyzikálními prostředky vyjádřený biologický parametr (diskriminační faktor T) právě tam, kde se tyto úvahy týkají životního a pracovního prostředí člověka, tj. kde konečným arbitrem je živý organismus, na který zvuk působí. Diskriminační faktor sluchového analyzátoru T se stal základním kritériem pro sčítání elementárních kvant zvukové energie (sčítacím intervalem), a tím umožnil vytvořit počítačové modely procesu šíření a doznívání zvukové energie, pracující v přísné shodě s biologickými zákony percepce zvuku. Zavedení tohoto dosud neznámého kritérie do akustických výpočtů položilo základ k racionálnímu akustickému projektování na počítači, tj. k nové moderní metodě zlepšování pracovního a životního prostředí.

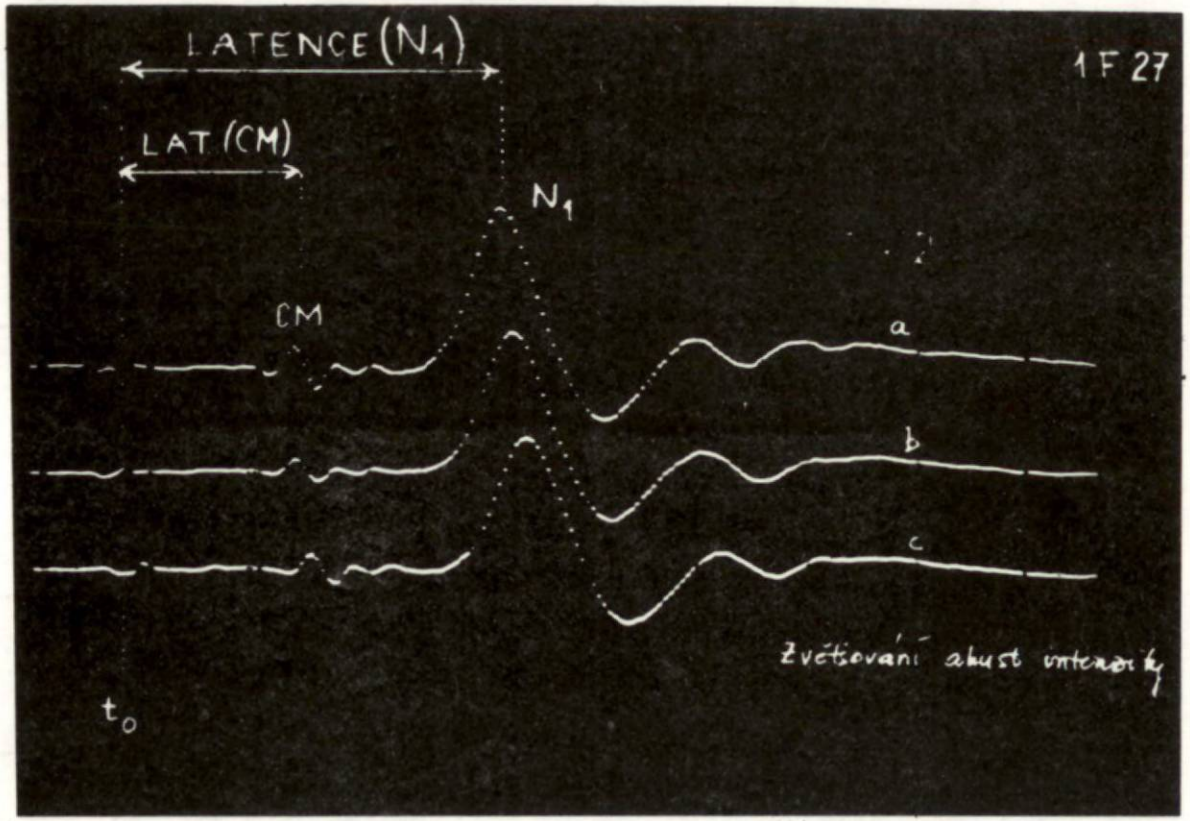
Matematicko-fyzikální základ citované metody byl položen československým objevem č. 30, jmenovitě prací o kritice teorie doznívání (Wagner, J: Mathematical and logical criticism of the classical reverberation theory, Rozpravy čs. akademie věd, Řada matematických a přírodních věd, sešit 3/1971), biologický základ pak tímto objevem diskriminační schopnosti sluchového analyzátoru (Wagner, J. a Veselý, C: Aplikace biologických kritérií při hodnocení dozvukových polí, Lékař a technika, ročník IV, č. 5, Praha 1973; Veselý, C. a Wagner, J: Pokus o experimentální ověření diskriminační schopnosti sluchového analyzátoru u člověka, Lékař a technika, ročník V, č. 3, Praha 1974).



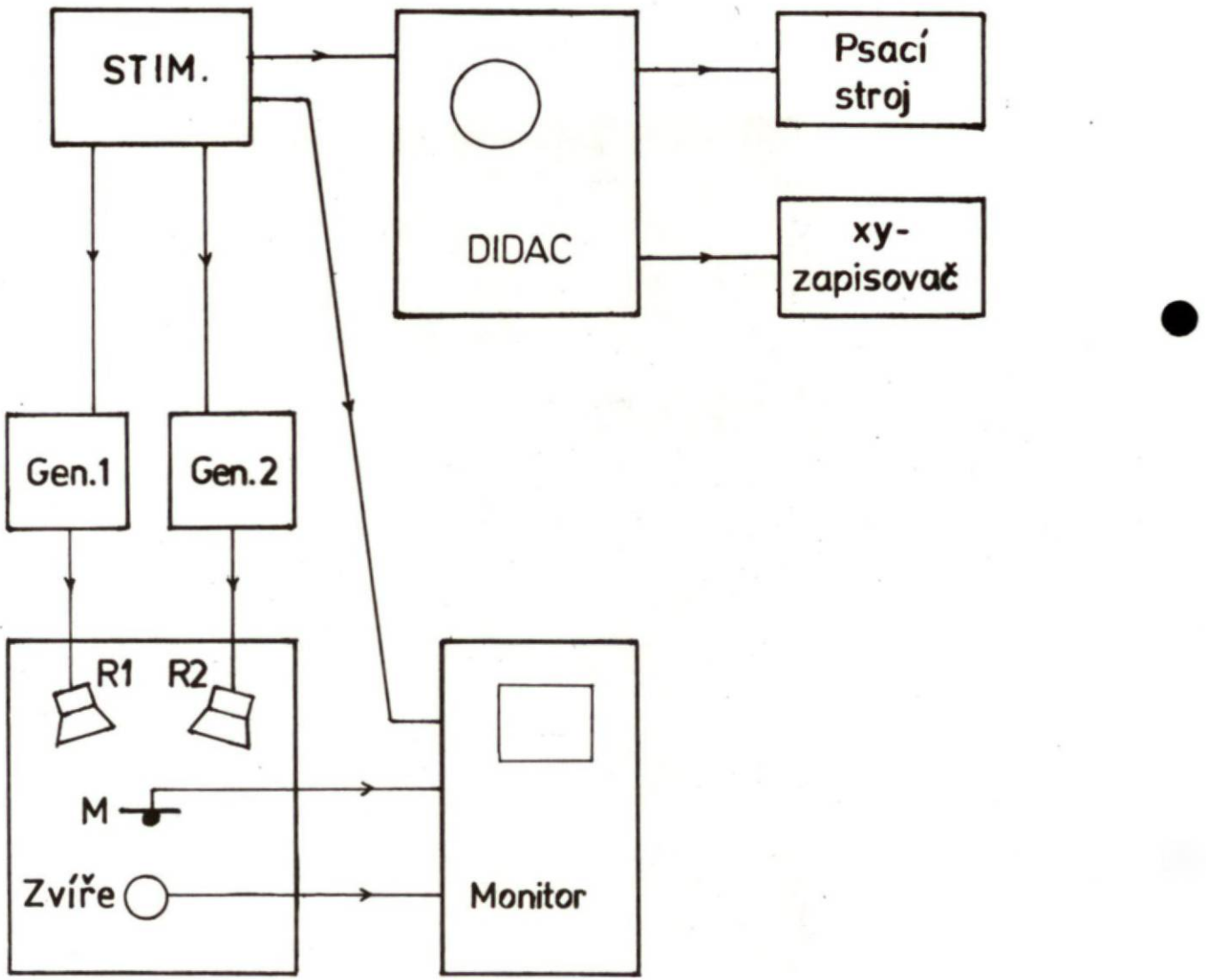

Obr. 1

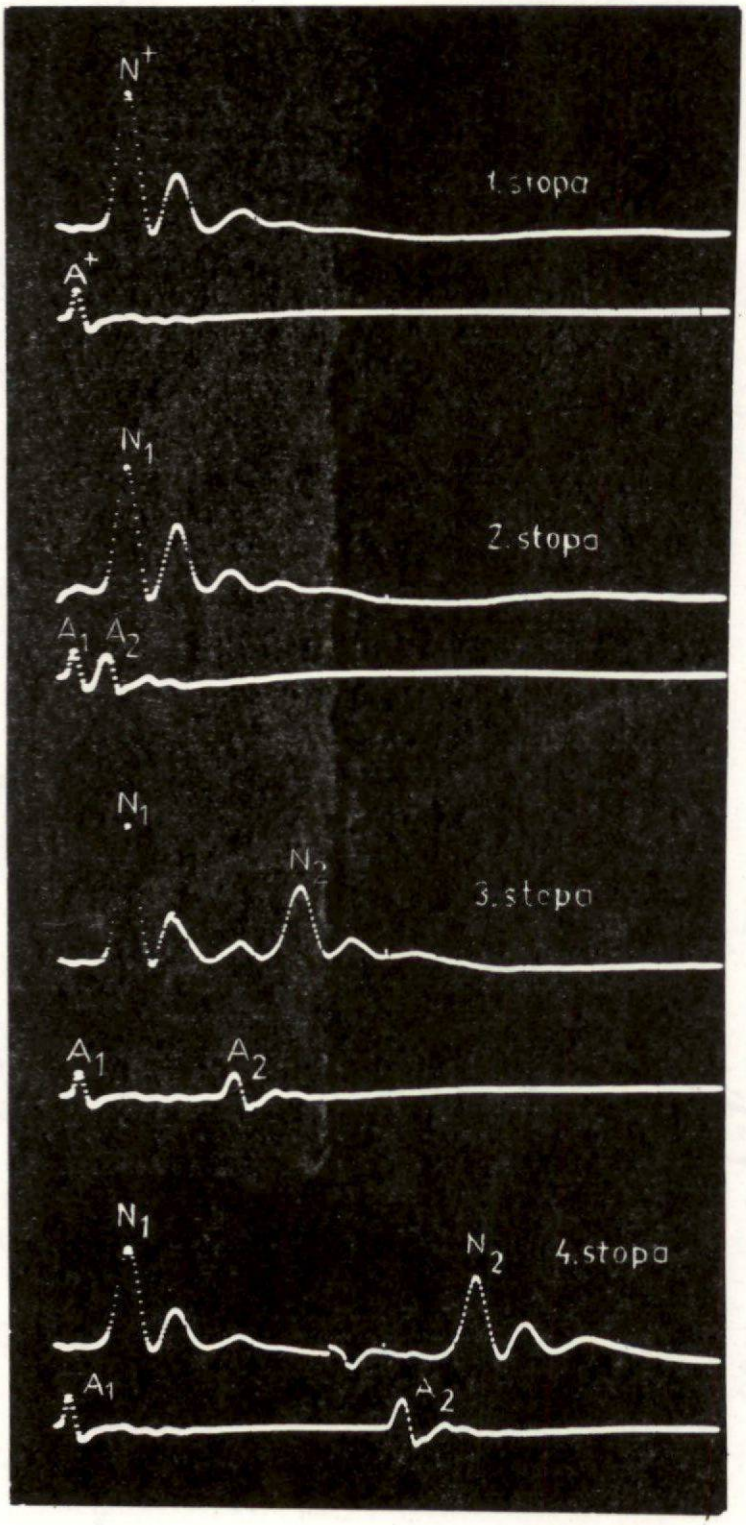



Obr. 2

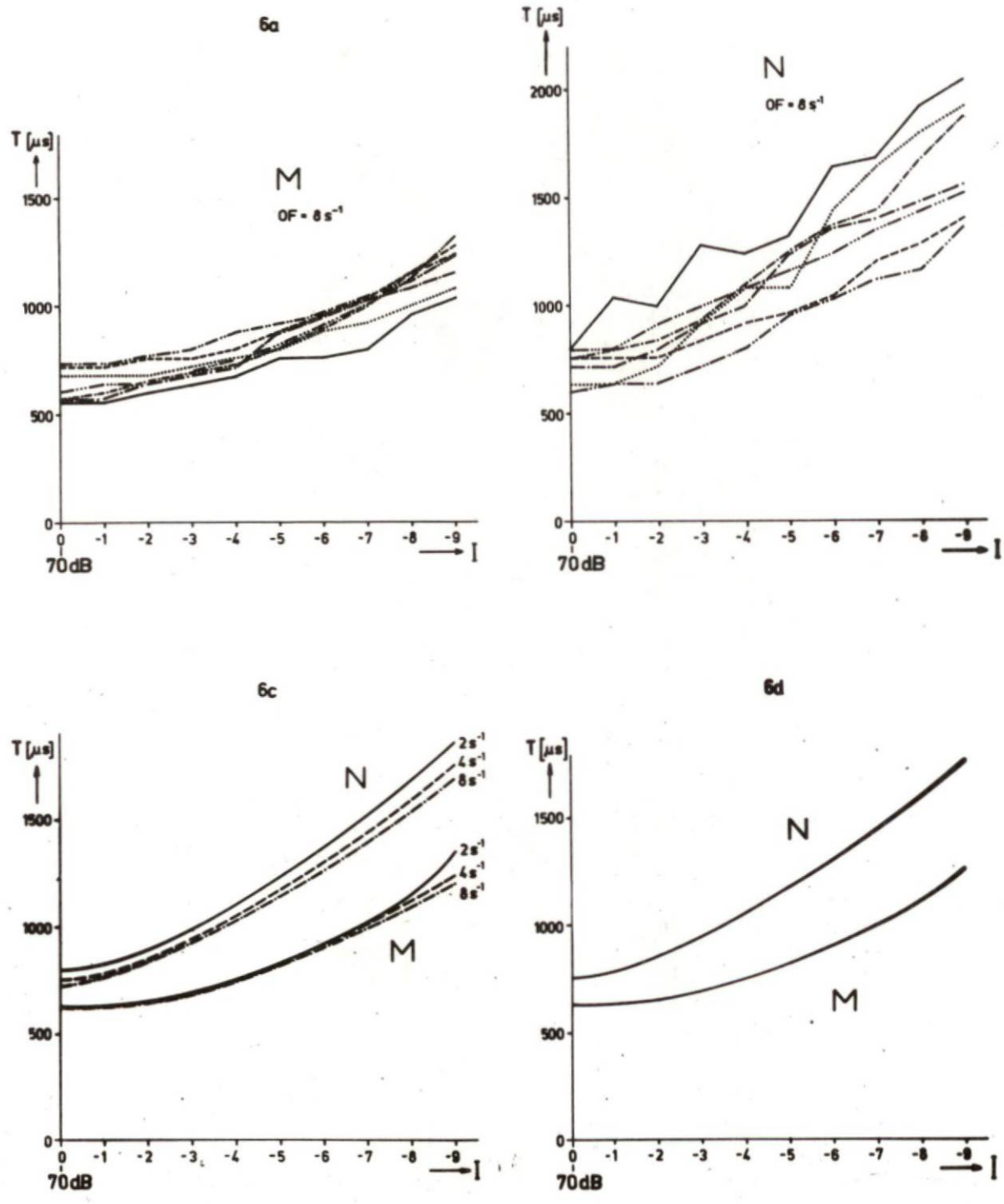

LATENCE ($N_1$)
1 F 27
LAT (CM)
$N_1$
CM
a
b
c
zvětšování akust. intenzity
$t_0$

Obr. 3


STIM.
DIDAC
Psací stroj
xy-zapisovač
Gen.1
Gen.2
R1
R2
M
Zvíře
Monitor




**Obr. 5**


6a
T [µs]
M
OF = 8 s⁻¹
1500
1000
500
0
0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9
70 dB
I
T [µs]
N
OF = 8 s⁻¹
2000
1500
1000
500
0
0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9
70 dB
I
6c
T [µs]
N
2 s⁻¹
4 s⁻¹
8 s⁻¹
M
2 s⁻¹
4 s⁻¹
8 s⁻¹
1500
1000
500
0
0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9
70 dB
I
6d
T [µs]
N
M
1500
1000
500
0
0 -1 -2 -3 -4 -5 -6 -7 -8 -9
70 dB
I

Obr. 6

Severografia, n. p., MOST

**Cena 2,40 Kčs**