

# 11 Senzory akustických veličin

V této kapitole budou popsány senzory (mikrofony) snímající akustické veličiny v oblastech diagnostiky kardiovaskulárního systému a sluchového ústrojí (zde zejména náhrady poškozeného sluchového ústrojí). Ve své podstatě tyto senzory snímají mechanické vlnění (zvuk) a pomocí dalších obvodů převádí mechanické vlnění na elektrický signál, přičemž tyto obvody mohou být součástí vlastního senzoru.

## 11.1 Fyzikální podstata akustiky

Akustika je vědní obor fyziky, která se zejména zabývá vznikem a přenosem až po vnímání zvuku lidským sluchem. Akustika obsahuje celou řadu podoborů, např. fyziologická akustika, která se zabývá šířením a vnímáním zvuku orgány člověka, a psychoakustika, která se zaměřuje na vnímání zvuku v mozku.

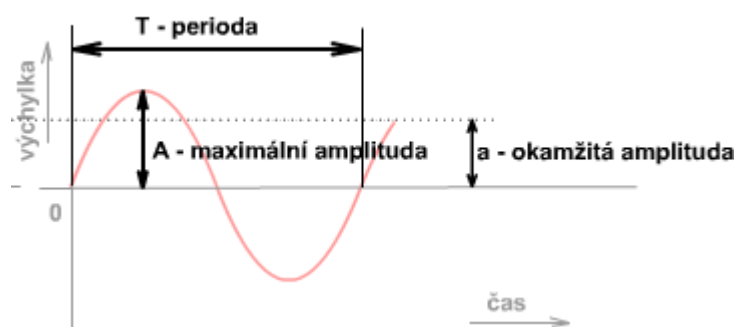
Zvukem se rozumí určitá forma akustického vlnění. Toto vlnění je charakterizováno pohybem částic pružného prostředí, nebo vlnovými pohyby částic zvukového pole. Slyšitelný zvuk představuje část zvukového signálu ve frekvenčním rozmezí: 16Hz – 20kHz. Tato část zvuku vyvolává zvukový vjem. Výše uvedené frekvenční pásmo je pouze orientační. Jen málokdo je schopen zaznamenat celý frekvenční rozsah. Pásmo zvuku pod slyšitelnou hranicí se označuje infrazvuk. Naopak zvuky nad slyšitelnou hranicí se označují jako ultrazvuk.

Zvukový signál vzniká rozkmitáním bodových soustav. Kmitáním se rozumí periodický děj, u něhož se pravidelně v závislosti na čase mění charakter studované veličiny – např. rozměr, tlak, intenzita, poloha atd.

V teorii akustiky se často místo termínu **perioda** používá počet period za jednotku času – tento termín se označuje jako **frekvence**. Jednotkou frekvence je jeden Hertz, který je definován jako počet kmitů za jednu sekundu.

Největší vzdálenost, o kterou se soustava vychýlí z rovnovážného stavu, se nazývá **maximální výchylka**.

Vzdálenost soustavy v časovém okamžiku  $t$  se **nazývá okamžitá amplituda**.

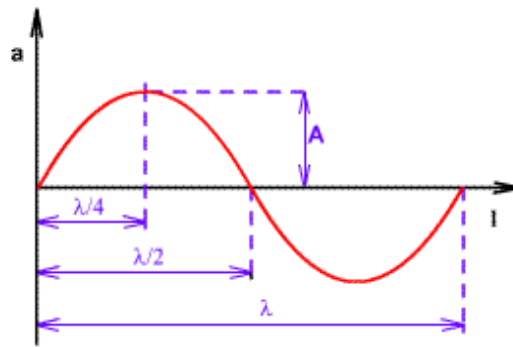


Obr.11.1 Průběh kmitavého pohybu soustavy částic

Pomocí výše uvedených veličin lze kmitavý pohyb popsat následujícím matematickým vyjádřením:

$$a = A \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) = A \sin(2\pi f t) \quad (11.1)$$

Zvuk se v prostředí šíří prostřednictvím zvukových vln. Rozlišujeme postupné a podélné vlnění. V případě harmonického pohybu hovoříme o harmonické vlně. Každá harmonická vlna je dána charakterickými parametry:



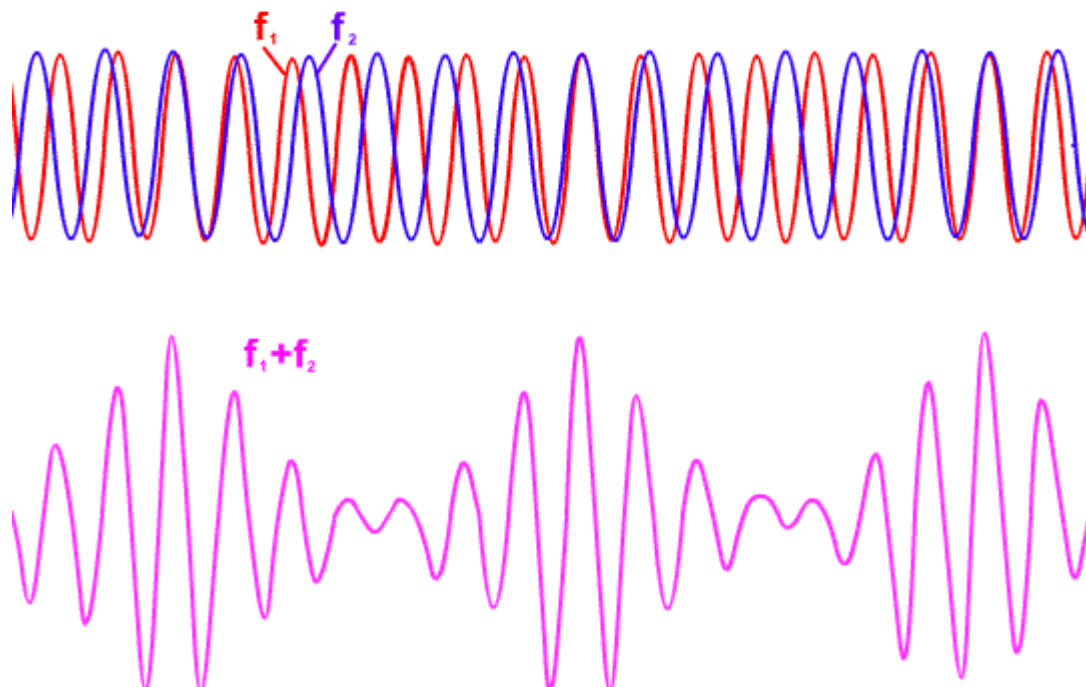
**Obr.11.2 Průběh harmonického pohybu**

Každá zvuková vlna je charakterizována tzv. vlnovou délkou  $\lambda$ . Vlnová délka je veličina, která charakterizuje vzdálenost nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází a amplitudou.

V případě interakce zvukové vlny s překážkou dochází k odrazu zvukové vlny. Průběh vzniklé odražené vlny závisí na fyzikálních vlastnostech překážky.

**Akustický tlak** – Tato veličina je charakterizována jako rozdíl mezi okamžitou velikostí celkového tlaku v daném bodě a statickou hodnotou atmosférického tlaku. Tento tlak představuje střídavou složku tlaku, která se superponuje k atmosférickému tlaku. V akustice je velmi důležitá hodnota hladiny akustického tlaku. Tato hodnota určuje diferenci mezi naměřenou hodnotou akustického tlaku a referenční (vztažnou) hodnotou.

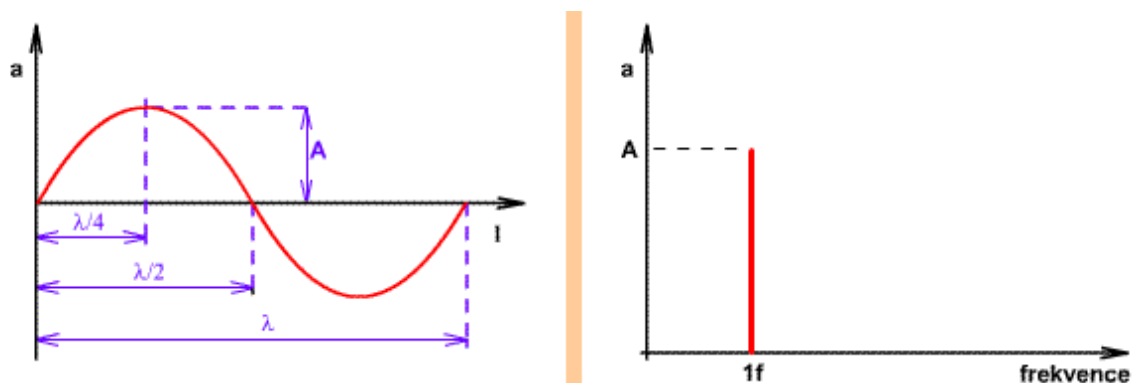
**Interference vlnění** – V případě výskytu více akustických vln dochází k jejich vzájemné interferenci (sčítání). Není možné rozlišit jednotlivé vlny samostatně. Je možné vnímat jejich součet.



**Obr.11.3 Interference dvou akustických vln**

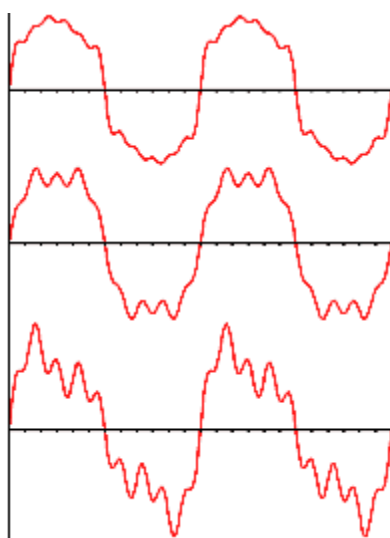
**Frekvenční spektrum akustického vlnění** – Akustické vlny jsou tvořeny harmonickými průběhy. Každý harmonický průběh lze posuzovat v časové a frekvenční oblasti. Průběh ve frekvenční oblasti nazýváme frekvenční spektrum. V případě jedné harmonické vlny

dostaneme diskretní frekvenční spektrum s jednou frekvenční čarou, jejíž délka koresponduje s amplitudou akustické vlny. Tato spektrální čára odpovídá frekvenci akustické vlny.



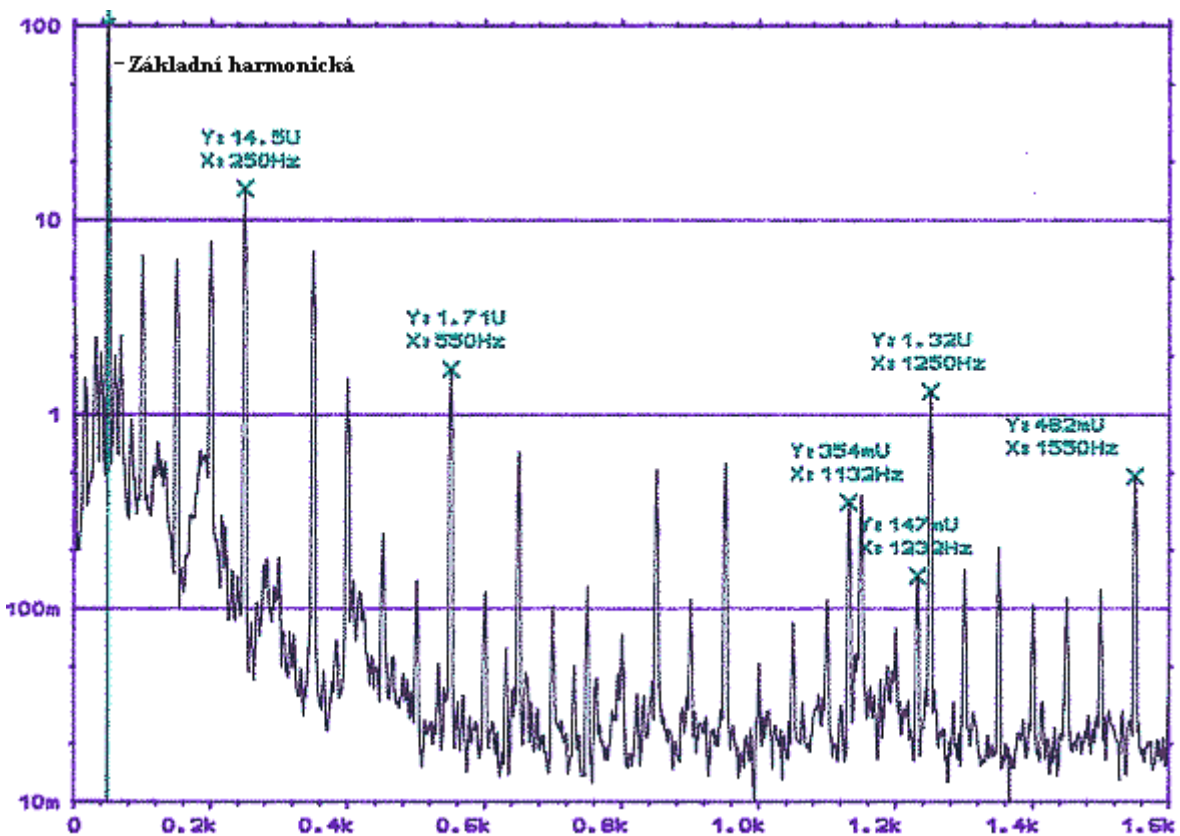
**Obr.11.4 Průběh akustické vlny v časové a frekvenční oblasti**

V akustické technice se běžně nesetkáme pouze s jednou čistou harmonickou vlnou. Reálný akustický signál bývá více či méně deformovaný. I přes tento nepříznivý fakt lze pomocí frekvenční analýzy signálu určit všechny harmonické složky. Výsledkem frekvenční analýzy je frekvenční spektrum. Z tohoto spektra lze zpětnou rekonstrukcí složit původní signál.



**Obr.11.5 Ukázka deformovaných akustických vln**

Spektrum reálných akustických signálů má dosti složitý tvar. Jednotlivé harmonické složky mají obecně různou velikost. Obsah jednotlivých harmonických složek má podstatný vliv na zvukové zbarvení.



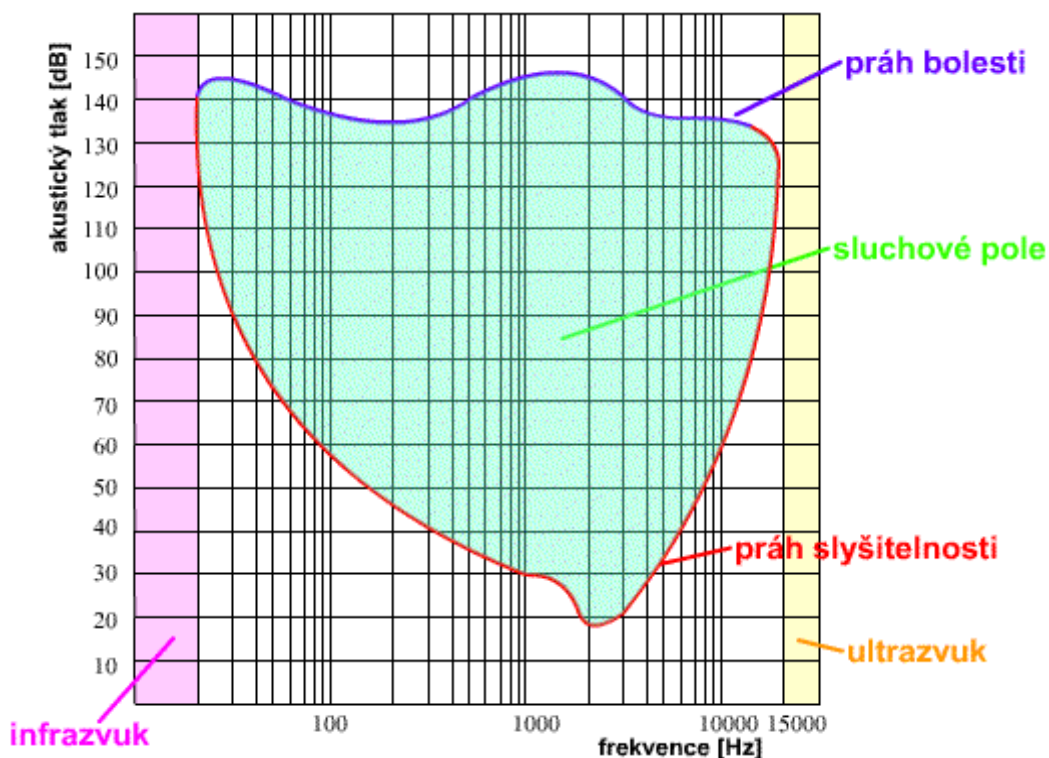
Obr.11.6 Ukázka frekvenčního spektra akustického signálu

## 11.2 Fyziologie akustiky

### Sluchový vjem zvukového signálu

Zvukový signál je přiveden na vnitřní ucho a prostřednictvím nervových signálů je přenášen do mozku pro další zpracování. Vjem zvukového signálu je dán souhrnem subjektivních veličin – **výška tónu**, **hlasiost** a **barva zvuku**. Tyto veličiny odrážejí fyzikální veličiny zvukové vlny (frekvence, amplituda, časový průběh zvukového signálu).

Výsledný zvukový vjem je závislý na faktu, jestli posloucháme zvuk o jediné frekvenci, či se jedná o složení více frekvenčních složek. Zvukové složky, které posluchač vnímá, tvoří tzv. zvukový vjem.



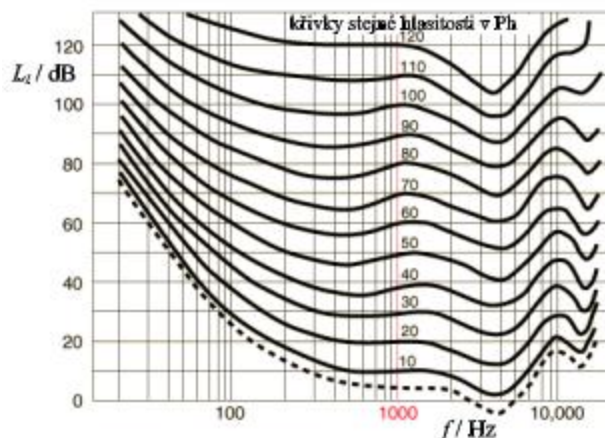
**Obr.11.7 Vymezení zvukového pole**

Nevýhodou sluchového vjemu je fakt, že přesně nekopíruje fyzikální vlastnosti akustického vlnění. Tento fakt se výrazně projevuje např. u hlasitosti. Jednotkou hlasitosti je fón [Ph]. Jeden fón odpovídá hodnotě intenzity při stanovené referenční frekvenci 1 kHz.

## Hladina hlasitosti

Hladina hlasitosti pro tón frekvence 1 kHz je rovna hladině akustického tlaku. Tónem o frekvenci 1 kHz je vymezena referenční zvuková úroveň. Pro ostatní kmitočty se hladina hlasitosti stanovuje porovnáním s tímto referenčním zvukem.

Barkhausenovy křivky hlasitosti popisují grafický vztah mezi hladinou intenzity zvuku a hladinou hlasitosti. Tyto křivky zároveň reprezentují citlivost lidského sluchového orgánu. Křivky, kde jsou vyšší hodnoty, určuje nižší citlivost lidského sluchového orgánu.



**Obr.11.8 Barkhausenovy křivky**

## Účinky zvuků na člověka

Obecně nežádoucí zvuk, který nepříznivě působí na člověka, se nazývá hluk. Nežádoucími zvuky nemusí být pouze intenzivní zvuky, ale také např. v případě spánku to mohou být zvuky relativně nízkých intenzit.

**Hluk** – Hlukem se obecně rozumí každý zvuk, který svou intenzitou nepříznivě ovlivňuje psychickou pohodu člověka. Hluk také působí negativně na kvalitu spánku. Při dlouhodobé expozici hluk vyvolává stres, únavu a nespavost. Například doprava způsobuje 85 – 90% hluku. Maximální hodnota hluku je v České republice regulována zákony. Jako hodnotící hladina se standardně používá ekvivalentní hladina akustického tlaku.

## Ekvivalentní a maximální hladina akustického tlaku

Pro reálné výpočty se hluk stanovuje za delší časové období. Pro tyto potřeby se zavádí ekvivalentní hladina akustického tlaku. Pro tento parametr platí následující integrální vyjádření:

$$L_{Aeq} = 10dB(A) \log \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1L(t)} dt \quad (11.2)$$

Kde  $t_1$  a  $t_2$  představují počáteční a koncový čas měření sledování hluku. Funkce  $L(t)$  je časově závislá hladina akustického tlaku. Tato funkce je frekvenčně korigována pomocí váhového filtru, čímž je zohledněno, že zvuk na různých kmitočtech je lidským sluchem vnímán s nestejnou citlivostí. Jednotka ekvivalentní hladiny akustického tlaku je dB(A), kde A označuje použitý váhový filtr.

Druhou možností, jak vyhodnocovat hluk, je pomocí maximální hladiny akustického tlaku v daném období. Tato maximální hladina se označuje jako  $L_{Amax}$  a tento parametr představuje maximální hodnotu funkce  $L(t)$ .

## 11.3 Fonokardiografie

Fonokardiografie je metoda snímající srdeční ozvy, případně šelesty vznikající patologickými změnami u srdečních chlopní. Jedná se také o ozvy vznikající v okolních cévách. Výstupem této metody je tedy grafický záznam akustických signálů (např. srdeční ozvy při systole a diastole srdečního svalu).

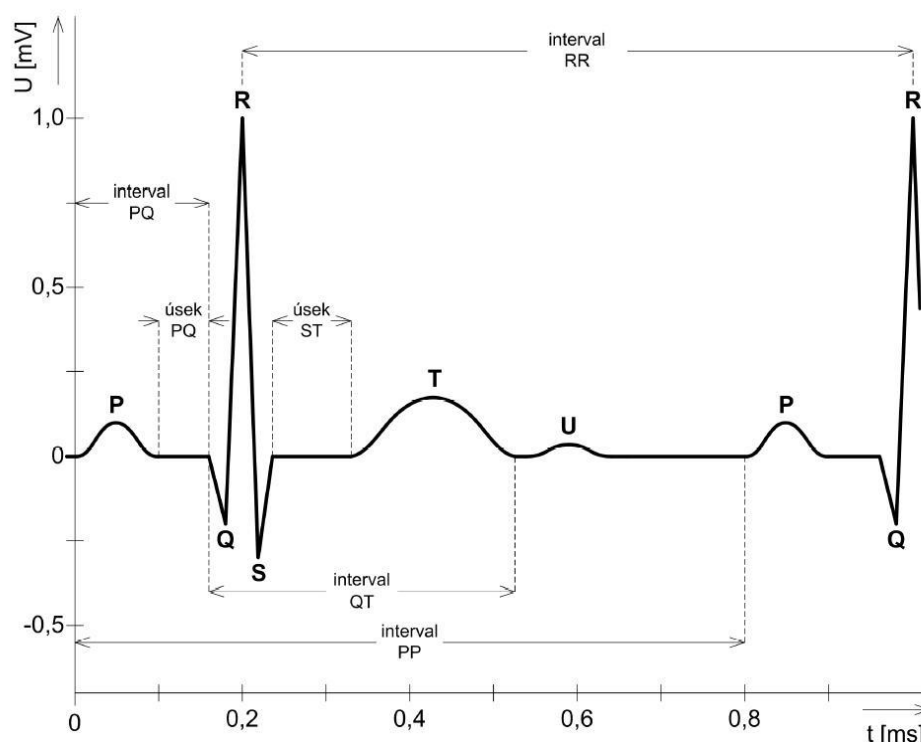
Fonokardiografie významně přispívá u rozpoznávání vrozených a získaných nemocí srdečních a patologických změn na cévách a je zvláště cenná při stanovení indikace pro operaci i při pooperačním sledování nemocného.

S fonokardiografem je současně snímám elektrokardiograf pro účely analýzy srdečních ozev. Naměřené akustické signály jsou digitálně přenášeny do počítače. Pomocí softwaru jsou tyto signály analyzovány a vyhodnoceny. Při auskultaci je možno rozeznat 2 ozvy. Jedna je na začátku systoly a druhá je na začátku diastoly. Záznam těchto ozev se nazývá fonokardiogram. Fonokardiogram také dokáže rozlišit jednotlivé akustické vlny, ze kterých se ozvy skládají.

## Srdeční ozvy

Srdeční ozvy jsou akustické signály, které vznikají v důsledku srdeční činnosti. Tyto ozvy způsobuje vibrace částic krve, chlopní a stěn komor. Celkem se ve fonokardiografii rozlišují čtyři srdeční ozvy. První dvě je možné poslouchat fonendoskopem při auskultaci. Zbývající dvě ozvy je možné zachytit pouze prostřednictvím fonokardiografie. Srdeční ozvy mohou odhalit řadu vrozených i získaných chorob. Srdeční ozvy u zdravých lidí se vyznačují jasností, čistostí a ohraničeností.

### 11.3.1 Základní pojmy ve fonokardiografii



**Obr.11.9** Elektrokardiogram a jeho části.

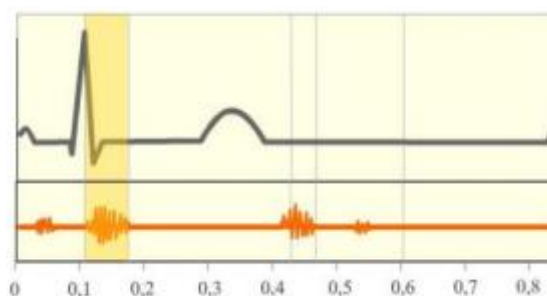
Detail záznamu elektrické aktivity srdce - elektrokardiogram je možno rozčlenit na jednotlivé části odrážející činnost srdečního svalu. Tato činnost se projevuje jak elektrickým, tak i zvukovým signálem - fonokardiogramem.

**Systolická srdeční ozva (první ozva)** – Projevuje se bezprostředně po začátku QRS komplexu nejprve na nižších frekvencích, potom se frekvence zvýší. Tato ozva je ukončena skupinou drobných zvukových vibrací, které vznikají distenzí kmene velkých cév krví vypuzenou z komor, a jejím vířením v těchto cévách.

Vibrace při této ozvě dosahují frekvence v rozmezí 25 – 45 Hz. Délka trvání první ozvy je 0,10 – 0,17 s. Tato ozva odpovídá časovému uzávěru mitrální, poté trikuspidální chlopně. Dle současných výzkumů je zdrojem první ozvy levá komora. První ozva se vysvětluje jako akustický fenomén, který vzniká vibracemi srdečního svalu, chlopní a obsahu komory krví. Hlavní příčinou první ozvy je pohyb krve v srdeční komoře.

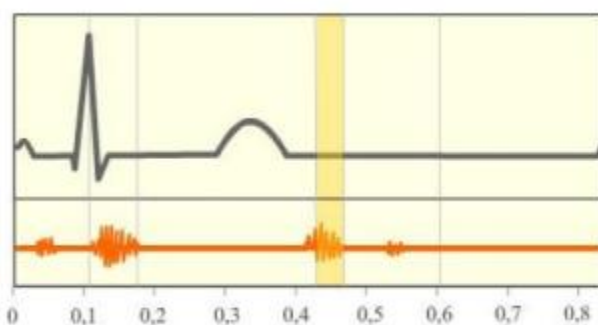
Na začátku ozvy se vyskytuje pomalá vlna o nízké amplitudě. Za touto vlnkou se objevuje několik vlnek s vyšší amplitudou. Tyto vlnky reprezentují vzestup nitrokomorového tlaku. Závěrečné vlnky této ozvy mají nižší amplitudu a korespondují s vypuzováním krve

ze srdeční komory.



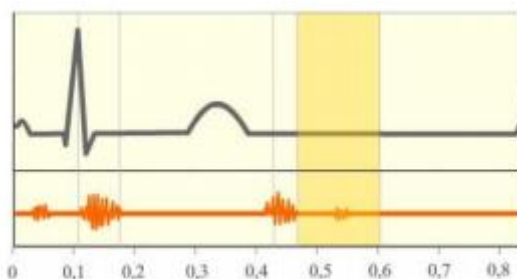
**Obr.11.10 Grafický záznam první ozvy**

**Diastolická srdeční ozva (druhá ozva)** - Tato ozva začíná většinou na konci vlny T elektrokardiogramu. Projevuje se důsledkem zavření semilunárních srdečních chlopní a otevřením atrioventrikulárních chlopní. Intenzita této ozvy je závislá na tlaku krve v cévách. Frekvence této ozvy se pohybuje okolo 50Hz. Tato ozva je dána dvěma komponenty. Tyto části většinou splývají. První komponenta vyjadřuje uzávěr aortální chlopně a druhá uzávěr plicní chlopně. Časový interval mezi těmito komponentami je cca 30ms. Pro tyto komponenty je charakteristické, že při inspiriu se komponenty oddalují a při výdechu se přibližují. Tato ozva je kratší než první ozva a dosahuje vyšší amplitudy než první ozva.



**Obr.11.11 Grafický záznam druhé ozvy**

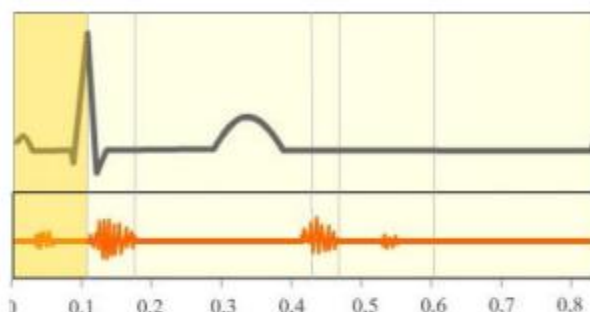
**Protodiastolická srdeční ozva (třetí ozva)** - Vzniká vibrací relaxovaného myokardu ve fázi rychlého plnění komor. Bývá proto nazývána ozvou rychlého plnění (rapid feeling sound). Již z principu jejího vzniku je zřejmé, že bude mít nízkou frekvenci. Třetí ozva má jeden až dva kmity a trvá 0,05s až 0,06s. Za fyziologického stavu je tato ozva slyšitelná u dětí a za patologického stavu u starších lidí. Tato ozva je slyšitelná na levém boku. Třetí ozva je registrovatelná na fonokardiogramu asi 0,10 – 0,12 s po skončení vlny T.



**Obr.11.12 Grafický záznam třetí ozvy**



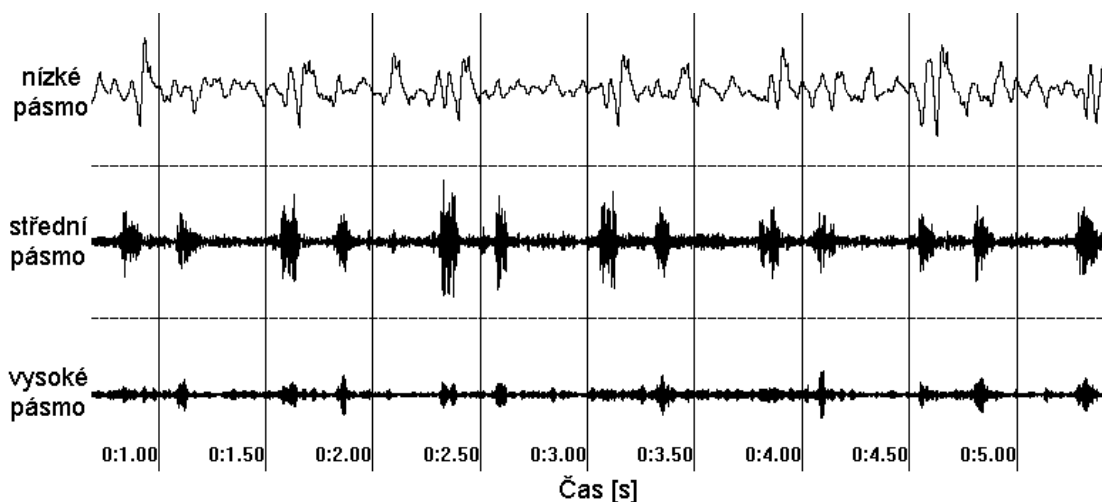
**Presystolická srdeční ozva (čtvrtá ozva)** - Vzniká vibrací komorové svaloviny po nárazu krevního proudu ve fázi aktivního rychlého plnění komor, na rozdíl od třetí ozvy, která vzniká ve fázi pasivního rychlého plnění. Tvoří obvykle několik malých kmitů o nízké frekvenci. Je někdy rozdělena na dvě části, z nichž první je při auskultaci nepostřehnutelná a vzniká při vlastní kontrakci síňové svaloviny. Z principu vyplývá, že musí být lokalizována po začátku vlny P elektrokardiogramu (většinou asi 0,018s až 0,075s po vrcholu vlny P) a před skupinou QRS. Někdy není oddělena od první ozvy.



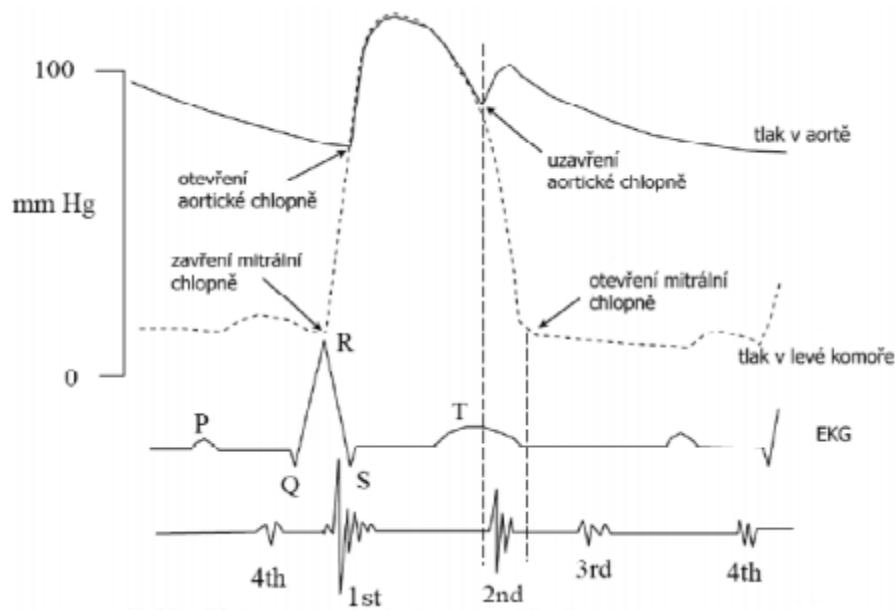
**Obr.11.13** Grtafický záznam čtvrté ozvy

## Intenzita ozvy

Intenzita ozvy je úměrná amplitudě kmitů. Vzhledem k tomu, že sluchový orgán člověka vnímá lépe vyšší frekvence než nižší, lze tedy říci, že zvuky (ozvy) s vyšší frekvencí mají větší intenzitu než zvuky s nižší frekvencí.



**Obr.11.14** Typický průběh fonokardiogramu.



Obr.11.15 Srdeční ozvy

### 11.3.2 Senzory pro fonokardiografii

Fonokardiografický senzor - Mikrofon slouží k přeměně zvukového signálu na signál elektrický, který se potom dále zesiluje, filtruje a přivádí k zapisovacímu nebo zobrazovacímu zařízení.

Drtivá většina mikrofonů obsahuje membránu, kterou tvoří tenká vrstva, která se pohybuje v závislosti na působícím tlaku. Tento tlak je vyvolán působící akustickou vlnou. Pohybem membrány dochází ke konverzi akustického vlnění na elektrický proud, který je dále vyhodnocován. Mikrofony lze rozdělit dle způsobu přeměny akustické energie na elektrický proud:

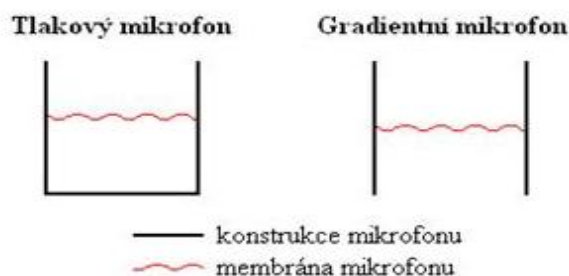
- Odporové (uhlíkové) mikrofony
- Elektrodynamické mikrofony
- Elektromagnetické mikrofony
- Krystalové mikrofony
- Elektrostatické mikrofony
- Tepelné mikrofony

Dle veličiny, které způsobují přeměnu akustické energie na energii elektrickou, lze mikrofony dělit na tlakové a gradientní.

**Tlakové mikrofony** – Mechanická síla, která je vyvolána akustickým tlakem, působí na jednu stranu membrány mikrofonu. Amplituda kmitů membrány není směrově závislá na zdroji zvuku, ani na vzdálenosti zdroje od mikrofonu. Závisí pouze na akustickém tlaku. Tyto mikrofony jsou všesměrové.

**Gradientní mikrofony** – Na rozdíl od tlakových mikrofonů je zvukový signál přiveden na obě strany membrány mikrofonu. Výchylka membrány není závislá na absolutní hodnotě akustického tlaku. Výchylka membrány závisí na diferenci akustického tlaku před a za membránou. Čím je tento rozdíl větší, tím je větší i výchylka. Matematicky vyjádřeno je výstupní napětí úměrné n-té derivaci akustického tlaku podle souřadnice ve směru šíření akustické vlny. V případě, že je výchylka membrány úměrná první derivaci tlaku, se tyto mikrofony nazývají gradientní mikrofony 1. řádu neboli rychlostní mikrofony.

Výstupní napětí gradientního mikrofonu je závislé na poloměru zakřivení akustické vlnoplochy. Čím je větší zakřivení, tím je větší výstupní napětí.



**Obr.11.16 Rozdíl mezi gradientním a tlakovým mikrofonem**

Oblast ze které je mikrofon schopen přijímat zvuk, je vymezena směrovou charakteristikou. Tlakové mikrofony se vyznačují pevnou konstrukcí, k níž je připevněna membrána. Tento mikrofon je schopen zaznamenávat zvuk ze kteréhokoliv místa – akustický tlak se vždy přenese na membránu a tlaková síla způsobí její deformaci.

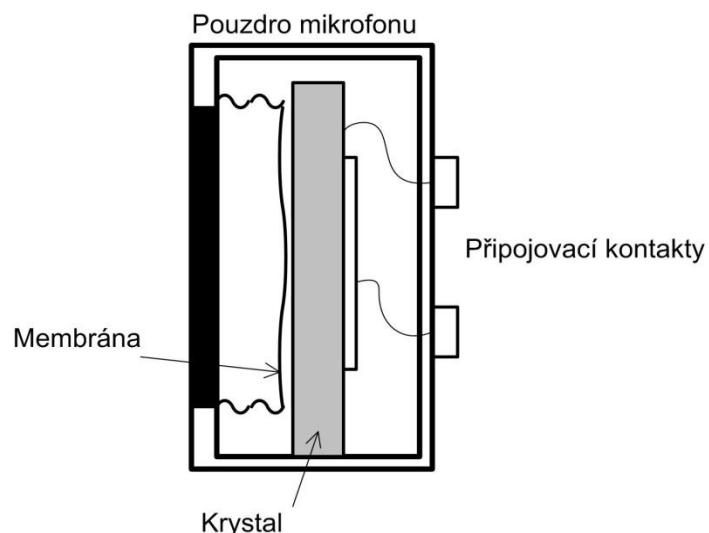
Gradientní mikrofon je mikrofon směrový. Dobře zaznamenává zvuky, které na něj přicházejí zepředu a zezadu. Zvuky, které dopadají z boku, jsou rozděleny a dopadají na obě strany membrány.

Ve fonokardiografii se nejvíce používají mikrofony krystalové a elektrodynamické.

## Krystalový mikrofon

Tento typ mikrofonu využívá piezoelektrického jevu. Základem jeho konstrukce je tenká destička vyrobená z krystalu Siegetovy soli, která je opatřena po obou stranách vodivými polepy. Pokud bychom přivedli na polepy napájecí napětí, dojde k deformaci destičky (bude se smršťovat nebo roztahovat podle polarit napájecího napětí). Celá konstrukce mikrofonu zahrnuje dvojici krystalových destiček spojenou se středem membrány, přičemž jedna se bude smršťovat a druhá roztahovat.

Při dopadu zvuku na membránu se přenáší mechanické chvění na krystal, na jehož elektrodách vzniká střídavé napětí o hodnotě několika milivoltů. Toto napětí je potom úměrné amplitudě tlaku zvukové vlny. Vnitřní odpor je u těchto typů mikrofonů vysoký (řádově  $M\Omega$ ), z toho důvodu i vstupní odpor zesilovače akustických signálů musí být vysoký. Výhodou krystalových mikrofonů je velká odolnost proti rušení. Pro zvýšení stability se pro výrobu krystalových destiček používají jiné materiály, například keramika nebo fosfátové soli.

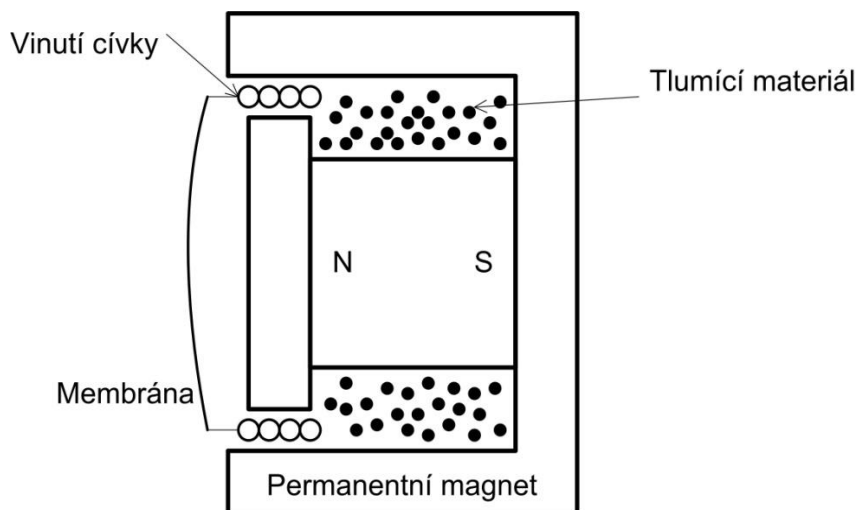


**Obr.11.17 Řez krystalovým mikrofonem.**

## Dynamický mikrofon

Dynamické mikrofony pracují na principu elektromagnetické indukce, to znamená, že zvukové vlny rozkmitávají membránu spojenou s cívkou umístěnou v magnetickém poli, které je tvořeno permanentním magnetem. Rozkmitem membrány dochází ke změnám intenzity magnetického pole v okolí cívky a tím ke vzniku indukovaného elektrického napětí.

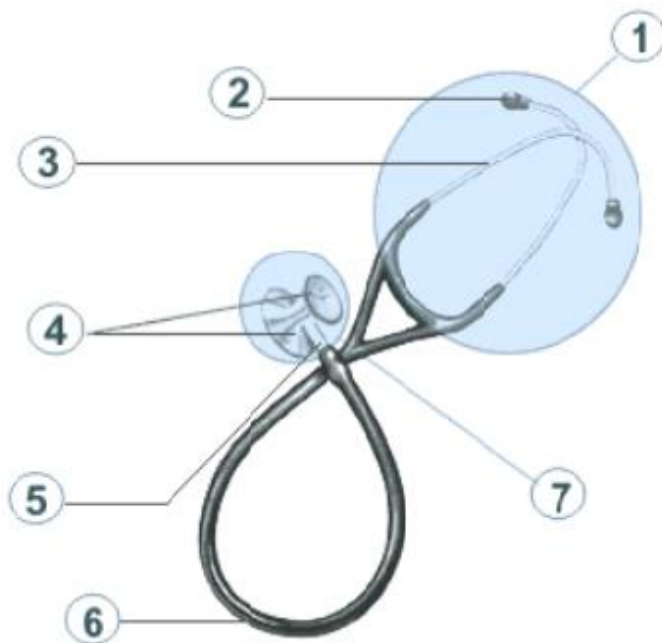
Na rozdíl od krystalového mikrofonu má dynamický mikrofon nízký vnitřní odpor v řádech několika  $\Omega$ .



**Obr.11.18 Struktura dynamického mikrofonu.**

## Fonendoskop

Fonendoskop, někdy také nazývaný stetoskop, je nejjednodušší přístroj pro registraci akustických signálů, který se využívá ve zdravotnictví. Nejčtenější oblastí použití fonendoskopu je vyšetření srdce – detekce šelestů, vyšetření plic a pro měření krevního tlaku auskultační metodou. Zvukové signály jsou vedeny tělem fonendoskopu, je zvýšena jejich intenzita a zároveň redukován jejich šum. Fonendoskopy se dělí na **klasické a elektronické**. Výhodou elektronického fonendoskopu je možnost digitalizace zvukového záznamu a počítačové zpracování.



**Obr.11.19 Popis fonendoskopu**

### **1 – Hlavová sada**

Kovová část fonendoskopu. K této části jsou připojeny hadičky. V hlavové sadě jsou uloženy ušní trubice a ušní olivky.

### **2 – Ušní olivky**

Olivky jsou určeny pro zvětšení komfortu vyšetřujícího a zajišťují těsnost. Jejich povrchá úprava snižuje sočivost a přilnavost pro prach a nečistoty.

### **3 – Ušní trubice**

Jedná se o kovovou trubici, ke které jsou připojeny ušní olivky.

### **4 – Laditelná membrána**

Současné fonendoskopy využívají zvonu a membrány. Zvon lehce dosedá na kůži a zachycuje akustické signály o nízkých frekvencích. Membrána naopak zachycuje zvuky o vysokých frekvencích.

### **5 – Nožka**

Nožka fonendoskopu je spojovací člen pro připojení snímače fonendoskopu s hadičkou.

### **6 – Hadičky**

Současné stetoskopy využívají dvojité hadičky. Pro tyto hadičky se využívá polyvinylchloridu (PVC).

### 7 – Snímač

Snímač fonendoskopu je měřicí část tohoto přístroje, která se umísťuje na vyšetřované místo a slouží pro registraci akustických signálů z vyšetřovaného pacienta.



**Obr.11.20      Elektronický fonendoskop Littmann 3200**

### Parametry

- Zesiluje akustické signály až 24x.
- Redukuje okolní šum až o 85%.
- Zobrazuje srdeční frekvenci.
- Využívá technologii Bluetooth pro přenášení zvuků v reálném čase do PC.
- Délka hadiček 69 cm.

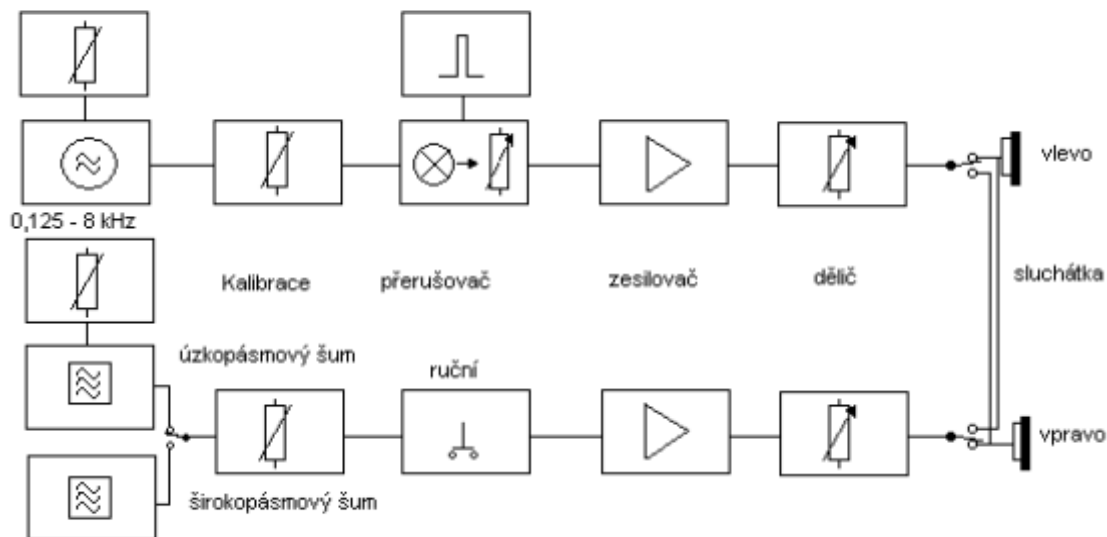


Obr.11.21 Vyhodnocovací software pro elektronický fonendoskop

## 11.4 Měření stupně poškození sluchu

Sluchový orgán je v podstatě senzor akustického signálu, který reaguje na tlak vzniklý vlivem mechanického vlnění. Tyto tlakové změny jsou dále zpracovávány pomocí ústrojí ve středním uchu skládajícího se z bubínku a středoušních kůstek (kladívko, kovádlínka a třmínek). Pro další fázi zpracování zvukového signálu jsou určeny orgány vnitřního ucha (kostěný a blanitý hlemýžď s Cortiho orgánem).

Jedna z nejpoužívanějších metod posuzování různých stupňů poškození sluchového ústrojí se nazývá audiometrie, jejíž podstatou je poslechová zkouška, při které se zjišťuje hranice mezi přímým ještě neslyšeným a právě již slyšeným zvukem. Výstupem vyšetřovací metody je audiogram, což je grafické znázornění úrovně vnímání zvuků při různých frekvencích (na vertikální ose jsou naměřené úrovně intenzity zvukového podnětu v jednotkách dB a na horizontální osu se vynáší kmitočtový rozsah, ve kterém se prověřuje citlivost sluchového ústrojí na zvukové podněty).



**Obr.11.22 Zjednodušené blokové schéma audiometru**

**Generátor zvuků (tónový generátor)** – Obsahuje kmitočtový volič a umožňuje korekci výstupního signálu pro nastavený měřící kmitočet s ohledem na různou citlivost ucha pro různé kmitočty. Přesnost generovaných kmitočtů dosahuje 3%. Kmitočty jsou generovány v mikroprocesorovém syntetizátoru.

**Širokopásmový šum** – Zdrojem tohoto šumu je generátor maskovacího zvuku s tzv. šumovou diodou. V signálové cestě jsou řazeny propusti pro vytvoření maskovacího šumu s definovanou šířkou pásma. Tak aby kmitočet byl ve středu tohoto pásma.

**Dělič** - Slouží pro nastavení akustického tlaku zvuku pro jednotlivé kmitočty. Rozdíl skutečných hodnot akustického tlaku při nastavení kterýchkoliv dvou poloh děliče musí souhlasit s rozdílem na čtecí stupnici. Udává se tolerance  $\pm 2\text{dB}$ . V základní poloze děliče, která odpovídá 0dB, je ze sluchátka generována hladina akustického tlaku, která odpovídá normálnímu prahu slyšení jednotlivých zvuků.

**Kalibrační obvody** - Slouží pro nastavení hladiny akustického tlaku. Toto nastavení se provádí v prostoru tzv. umělého ucha pro obě sluchátka vzdušného vedení. Umělé ucho reprezentuje akustické vlastnosti zevního zvukovodu a objem zevního zvukovodu.

**Elektrodynamická sluchátka** – Jedná se o sluchátka, která mají frekvenční charakteristiku v oblasti audiometrických kmitočtů. Vkládací audiometrická sluchátka slouží pro redukcii hluku pozadí a snížení hranice přeslechu.

**Přerušovač** – Slouží pro manuální, nebo automatické přerušení testovacího signálu. Zpravidla se jedná o optoelektronický vazební člen s požadovaným útlumem alespoň 60dB.

**Výkonové zesilovače** – Využívá se výkonových operačních zesilovačů s velmi malým zkreslením.

Pro měření v audiometrii se používají tyto typy zařízení:

## **Tónový audiometr**

Jedná se o nejjednodušší typ zařízení obsahující pouze zvukový generátor pro vysílání čistého



tónu s proměnnou regulací jeho kmitočtu. Kmitočet tónu může být měněn spojitě nebo po skocích a hlasitost tónu je možno nastavit jako konstantní nebo měnící se podle zvoleného programu. Vyšetřovaný pacient porovnává délku po sobě vysílaných impulzů a má za úkol rozhodnout, kdy jsou posloupnosti impulzů stejné délky.

## **Impedanční audiometr**

Samotný přístroj se skládá z následujících bloků:

- Generátor zvukové vlny – zvuková vlna se vysílá pomocí reproduktoru k bubínku, kde se zvuk částečně zpracuje sluchovým ústrojím a částečně odrazí od bubínku.
- Snímač zvukové vlny – má za úkol snímat zvukové vlny odražené od bubínku.
- Obvody nastavení tlaku vzduchu ve zvukovodu - obvykle je tlak nastavován mezi  $-400$  až  $+400$  mmH<sub>2</sub>O.
- Obvody dalšího zpracování signálu

U impedanční audiometrie se na základě dopadajícího a odraženého akustického signálu měří tzv. akustická impedance (případě jejich změny). Při této metodě se neprodyšně uzavře vnější zvukovod. Vlivem akustického podnětu dochází ke kontrakci třmínkového svalu a napínače bubínku, což vede prostřednictvím změny mechanického odporu systému bubínek - sluchové kůstky ke změně akustické impedance.

Pro klinickou praxi má význam relativní změna akustické impedance vůči klidové hodnotě při změně tlaku vzduchu ve zvukovodu při určité intenzitě dopadajícího zvuku, přičemž je možno na základě těchto výsledků posuzovat stupeň poškození bubínku a systému kladívko – kovádlínka – třmínek.

Vyšetření sluchu pomocí tónového a impedančního audiometru je doplněno ještě klasickou řečovou audiometrií, kdy je testována citlivost sluchu pomocí potichu vyslovovaných slov z reproduktoru nacházejícího se v určité vzdálenosti od pacienta.

### **11.4.1 Senzory pro audiometrii**

Jako senzory akustických veličin se i zde používají dynamické, krystalové a také kondenzátorové mikrofony. Kondenzátorové mikrofony pracují na principu změny kapacity kondenzátoru, který je tvořený velmi tenkou vodivou membránou (pokrytou nejčastěji zlatem) a statickou vodivou destičkou. Akustické vlny rozechvívají membránu, která svým pohybem způsobuje změnu kapacity membránou tvořeného kondenzátoru. Změny kapacity se potom v dalším kroku převedou na změny napětí, které se zesílí a dále zpracují podle potřeby v navazujících elektronických obvodech.

Všechny tyto typy mikrofonů je možno použít i v dalších oblastech ušního lékařství, konkrétně pro snímání zvuku v naslouchadlech pro náhradu částečně poškozeného sluchu, což jsou zařízení pro zesílení okolního zvuku pro pacienty trpící nedoslýchavostí.

## **Kontrolní otázky**

1. Vysvětlete podstatu fonokardiografie a její význam v medicíně.
2. Jaké typy senzorů se ve fonokardiografii používají?
3. Popište konstrukci krystalového mikrofonu.
4. Jmenujte metody pro měření poškození sluchu.
5. Vysvětlete princip impedanční audiometrie.

## **Literatura**

[BER02],[STR06],[LEJ94],[ZAK09],[PÁV04],[ČIH97],[ROZ06],[JAN09],[SOL10],[BLA10],[HAR13],[KOC11],[FYZ13],[HOM13],[RIP05]