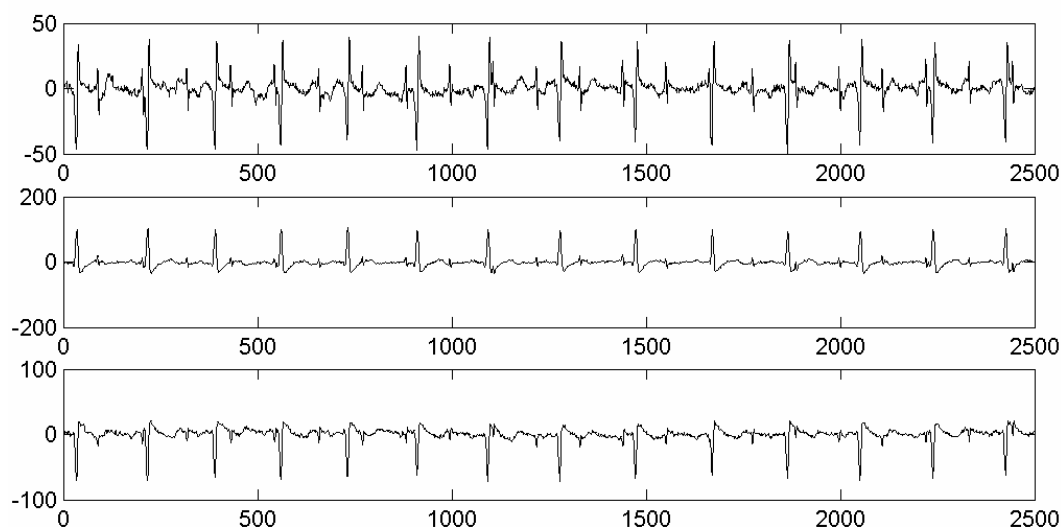


## 2.3. FETÁLNÍ ELEKTROKARDIOGRAM

Základním cílem fyziologických regulačních procesů je udržení stálosti vnitřního prostředí organismu, příp. udržení vhodných proporcí souvisejícího látkového a energetického toku. Hlavním homeostatickým mechanismem garantujícím odpovídající prostředí pro vývoj plodu je jeho krevní oběh. S ohledem na tuto skutečnost je základní biofyzikální diagnostika plodu založena zejména na analýze činnosti jeho srdce.

### 2.3.1. DEFINICE

*Fetální elektrokardiogram (FEKG)* je grafická reprezentace časové závislosti rozdílů elektrických potenciálů, snímaných zpravidla z povrchu břicha matky, které vznikají jako důsledek šíření elektrického vzruchu svalovou tkání srdečních síní a komor plodu. (srov. definici EKG<sup>1</sup>).



Obr.2-52 Fetální elektrokardiogram

První pokusy o záznam signálu EKG plodu provedl Cremer v roce 1906.

### 2.3.2. SNÍMÁNÍ FETÁLNÍHO EKG

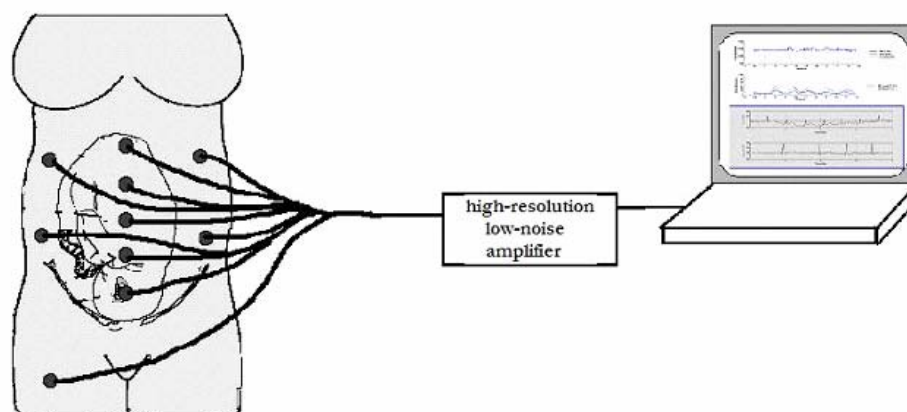
Techniky snímání fetálního elektrokardiogramu lze rozdělit do dvou základních skupin:

- *přímé metody* (DECG - Direct Electrocardiography) - používají elektroda umístěnou na hlavičce plodu.
- *nepřímé metody* (AECG - Abdominal Electrocardiography) - používají vnější elektrody umístěné na povrchu břicha matky.

Metody první skupiny umožňují získat velice kvalitní záznam, vzhledem ke skutečnosti, že jedna elektroda je umístěna přímo u zdroje signálu. Na druhé straně, vzhledem k invazivnímu charakteru vyšetření vzniká možnost zavlečení nákazy do rodidel, a proto je tento způsob snímání především v době porodu. Případné umístění více vnitřních elektrod

---

<sup>1</sup> *Elektrokardiogram (EKG)* je grafická reprezentace časové závislosti rozdílů elektrických potenciálů, snímaných zpravidla z povrchu hrudníku, které vznikají jako důsledek šíření elektrického vzruchu svalovou tkání srdečních síní a komor.



Obr.2-53 Využití standardního elektrokardiografu ke snímání FEKG pomocí nepřímé metody

snižuje jakost zaznamenaného signálu díky malé možné vzdálenosti mezi elektrodami a z toho vyplývajícími malými rozdíly potenciálů na jednotlivých elektrodách.

### 2.3.3. VLASTNOSTI FETÁLNÍHO EKG A JEHO RUŠENÍ

Dosavadní nepopulárnost FEKG vyplývala a vyplývá z problémů spojených s pořízením čistého FEKG. Signál FEKG principiálně vždy obsahuje směs signálu EKG plodu spolu se signálem EKG matky (MEKG). Je-li snímán pomocí břišních elektrod dosahuje FEKG hodnot řádově  $10^2 \mu\text{V}$ , zatímco mateřské EKG hodnot řádově  $10^0 \text{mV}$ , je tedy přibližně desetkrát větší. Frekvenční spektrum signálu FEKG dosahuje ke 150 Hz, největší část neryje je v kmitočtovém pásmu do 80 Hz.

Mateřský signál je také nejvýraznější nežádoucí složkou surového FEKG a jakákoliv analýza FEKG je závislá právě na kvalitě jeho extrakce.

Kromě mateřského signálu se při snímání FEKG mohou v záznamu vyskytnout všechny formy rušivého signálu, jak jsou běžné v případě signálu EKG - kolísání izolínie, síťové rušení, myopotenciály matky, příp. jiné další formy rušení - impulsní, apod.

### 2.3.4. EXTRAKCE FEKG ZE ZÁZNAMU

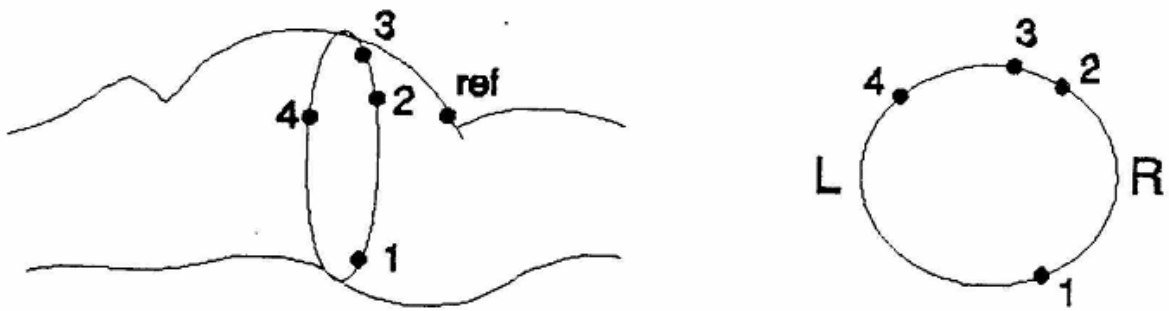
K extrakci FEKG ze změřeného surového signálu byla až dosud vyvinuta celá řada postupů založených na:

- korelačních metodách;
- zprůměrovacích metodách;
- rozkladu originálního signálu na dílčí složky na základě ortogonalit (PCA) nebo statistické nezávislosti (ICA);
- prostorové filtraci;
- adaptivní filtraci,
- paradigmatech neuronových sítí, apod.

Jedna z metod extrakce FEKG je založena na *principu prostorového zprůměrnění*. Při daném uspořádání předpokládá určité vlastnosti signálu EKG matky vyplývající z umístění snímacích elektrod (obr.2-54).

Předpokládejme, že signál snímáný z každé elektrody můžeme popsat vztahem

$$s_i(t) = m_i(t) + f_i(t) + n_i(t), \quad i = 1, \dots, \text{počet elektrod.} \quad (2.61)$$



Obr.2-54 Rozmístění elektrod pro nepřímé měření podle Bergvelda

kde  $m_i(t)$  je složka signálu odpovídající mateřskému EKG snímaná z  $i$ -té elektrody,  $f_i(t)$  je složka fetálního signálu a  $n_i(t)$  představuje obecně všechny ostatní šumové složky.

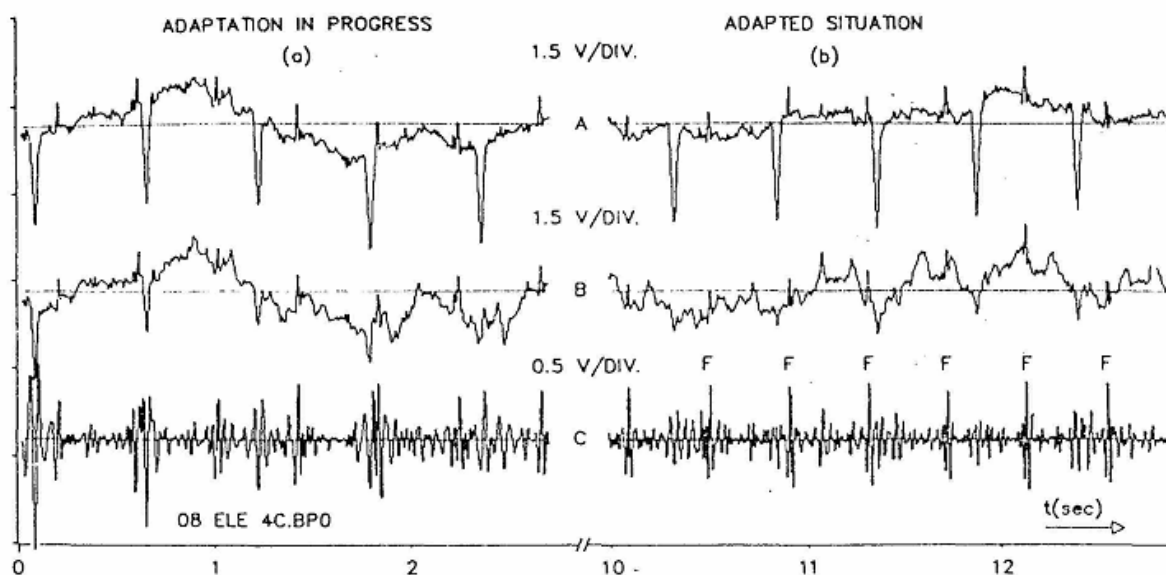
Signál, který vznikne váhovaným zprůměrněním signálů ze všech snímacích elektrod můžeme popsat vztahem

$$s(t) = \sum_i \gamma_i m_i(t) + \sum_i f_i(t) + \sum_i n_i(t), \quad i = 1, \dots, \text{počet elektrod}, \quad (2.62)$$

kde  $\gamma_i$  je váha signálu snímaného z  $i$ -té elektrody. Eliminace mateřského EKG je pak založena na předpokladu, že lze nalézt takové váhové koeficienty  $\gamma_i$ , že  $\sum_i \gamma_i m_i(t) = 0$  (nebo je při nejmenším minimální) a současně  $\sum_i \gamma_i f_i(t) \neq 0$ . Předpokládáme, že šum, tj.  $m(t)$  i  $n(t)$  není korelovaný s  $f(t)$ . Úloha se pak transformuje na optimalizační problém nalezení váhových koeficientů  $\gamma_i$  takových, aby pro danou lokalizaci elektrod platilo co nejvíce  $\sum_i \gamma_i m_i(t) = 0$ .

Výsledky potlačení mateřského EKG pomocí klasického schématu adaptivní filtrace jsou znázorněny na obr.2-55, jednak v počáteční fázi zpracování, jednak v ustáleném stavu.

Tři elektrody byly použity pro snímání FEKG a tři elektrody pro mateřské EKG, použité jako referenční signál.



Obr.2-55 Adaptivní potlačení mateřského EKG: A - vstupní signál; B - výsledek adaptivní filtrace; C - výstup filtrace pásmovou propustí 20 - 40 Hz

## 2.4. FONOKARDIOGRAM

### 2.4.1. DEFINICE

Fonokardiogram je záznam srdečních zvuků (ozev) a šelestů, které vznikají jako důsledek mechanického pohybu myokardu (zejména jeho chlopní) a turbulencí způsobených prouděním krve v srdečních komorách a velkých cévách.

Vznik ozev souvisí s různými fázemi srdeční činnosti.

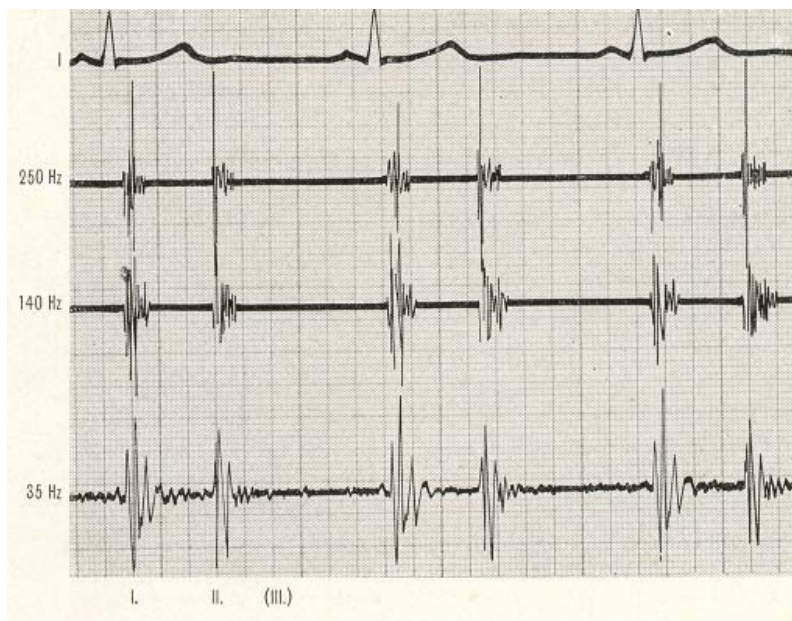
*První ozva* se vyskytuje v době komorové systoly a vzniká jako důsledek uzavření atrioventrikulárních chlopní a otevření semilunárních (poloměsíčitých) chlopní. Tato ozva je úvodním zvukem, slyšitelným během srdečního cyklu. Vyskytuje se v čase komplexu QRS.

*Druhá ozva* se objevuje během ventrikulární diastoly (relaxace srdečních stěn) a je způsobena uzavřením semilunárních chlopní a otevřením atrioventrikulárních chlopní. Tento zvuk je odezvou („ozvěnou“) první ozvy, kterou slyšíme během srdečního cyklu. Vyskytuje se na konci vlny T.

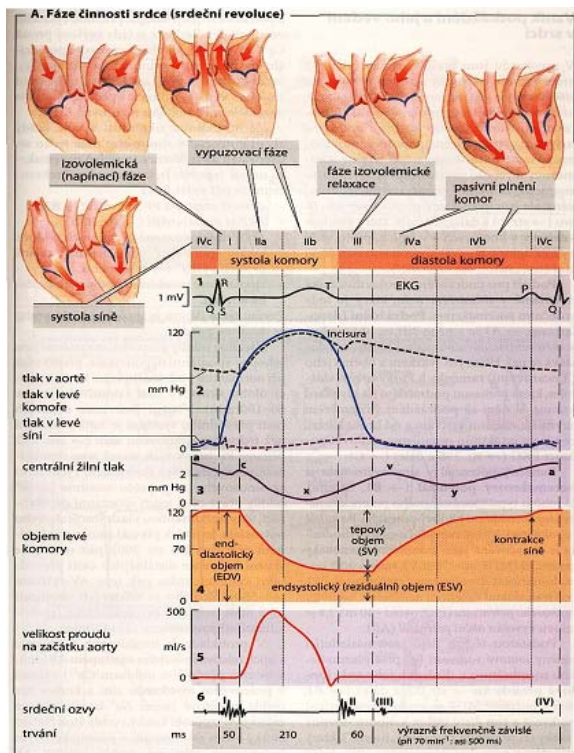
*Třetí ozva* je způsobena turbulencemi spojenými s rychlým plněním komor krátce po otevření atrioventrikulárních chlopní. Vyskytuje se v čase vlny U.

*Čtvrtá ozva* je způsobena turbulencemi vyvolanými průtokem krve ze srdeční síně do komory během atriální systoly. Tento zvuk je možné slyšet (pokud vůbec) bezprostředně před začátkem kontrakce komorových stěn uzavírající atrioventrikulární chlopně.

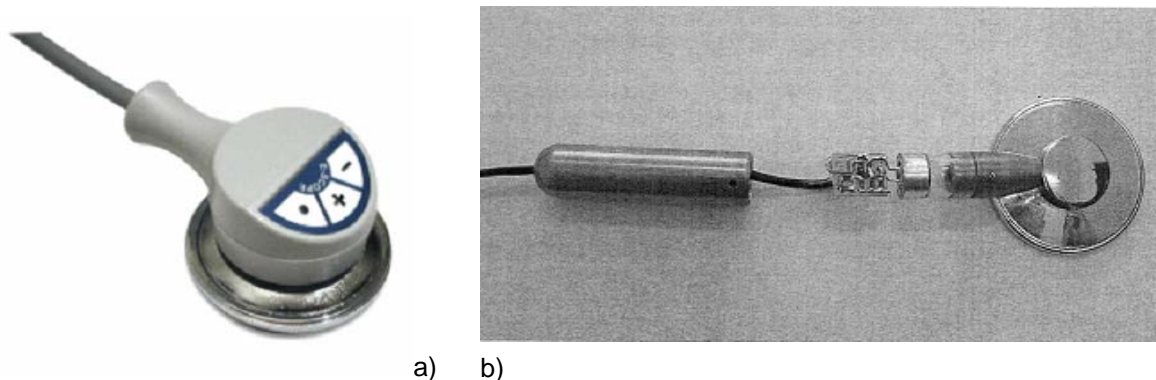
První a druhá ozva jsou jasné a ostré, snadno slyšitelné i netrévaným uchem. Třetí ozva těsně následuje druhou a je tišší (zatlušená), což způsobuje, že je rozeznatelná hůř. Čtvrtá ozva má zpravidla tak nízkou hlasitost, že ji nelze detekovat. Proto, hovoříme-li o detekci srdečních ozev, máme často na mysli pouze první dvě.



Obr.2-56 Simultánní záznam signálu EKG a fonokardiogramu filtrovaného horními propustmi s mezními frekvencemi 250 Hz, 140 Hz a 35 Hz



Obr.2-57 Fonokardiogram - souvislosti



Obr.2-58 Ukázky mikrofonů pro fonokardiografii - a) komerční mikrofon; b) experimentální mikrofon

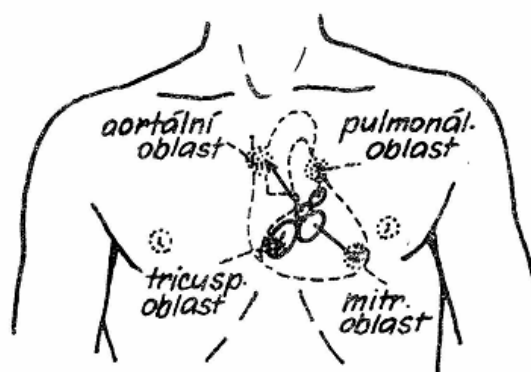
Šelesty jsou syčivé zvuky obsahující vyšší frekvenční složky, které vznikají jako důsledek víření krve ve velkých cévách při změně laminárního proudění na turbulentní. Ačkoliv mají nižší úroveň zvuku než ozvy, jsou dobře slyšitelné, protože ve frekvenčním pásmu, které zaujímají, je ucho nejcitlivější. Mohou mít původ jak fyziologický, tak patologický. Fyziologické šelesty mohou mít zdroj v kardiovaskulárním systému (zrychlení krevního toku u mladých osob) nebo mimo srdce a cévy (srdečně plicní, osrdečnickové - vznikají v plicích, ale jsou vyvolány pohybem krve, budí proto dojem šelestů srdečních). Patologické šelesty vznikají v důsledku chlopňových vad či jiných forem zúžení krevního řečiště - jejich charakter je jednotlivé patologie typický.

## 2.4.2. SNÍMÁNÍ FONOKARDIOGRAMU

Zvuky fonokardiogram v rozsahu 20 - 2000 Hz se snímají mikrofonem s malými rozměry (průměrem) a relativně velkou setrvačnou hmotou, která vytváří hmotovou a pohybovou indifferenci vůči hrudní stěně a tím usnadňuje záznam srdečních zvuků.

Fonokardiogram se snímá z pacientů v ležící poloze, přičemž v závislosti na požadovaném charakteru fonokardiogramu v následujících polohách (obr.2-59):

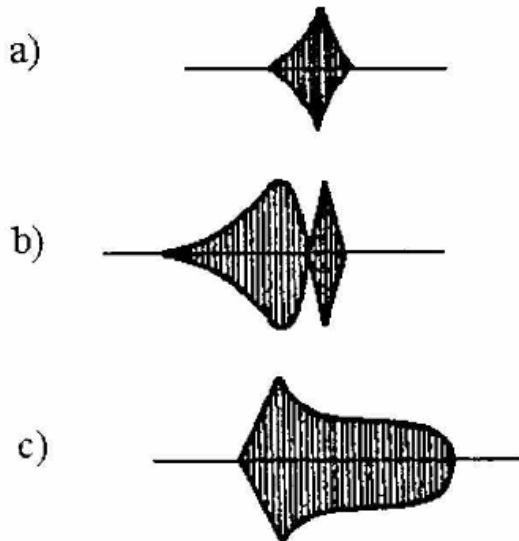
- ke snímání zejména I. a II. ozvy v oblasti středního prekordia ve 3. a 4. mezižebří mezi sternem a srdečním hrotem;
- ke snímání všech čtyř ozev v oblasti srdečního hrotu, za předpokladu, že pacient leží na levém boku;
- ke snímání II. ozvy v oblasti srdeční báze ve 2. mezižebří max. 3 cm symetricky od sternu;
- k zachycení aortálních šelestů nad aortou ve 2., resp.3. mezižebří parasternálně.



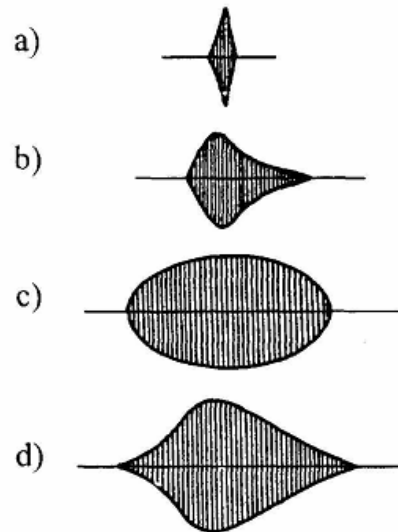
Obr.2-59 Pozice pro umístění mikrofonu pro snímání fonokardiogramu

## 2.4.3. VLASTNOSTI FONOKARDIOGRAMU

První ozva trvá 20 až 170 ms, její kmitočtové pásmo zasahuje přibližně od 15 do 800 Hz, frekvenčně je níže než ozva druhá. Má čtyři základní složky, které odpovídají - (a) kmitům cípatých chlopní při jejich uzavření na začátku systoly (s kmitočty přibližně 25 -



Obr.2-60 Příklady časových průběhů I. ozvy - (a) normální signál; (b) zúžení průchodu mezi levou síní a komorou; (c) nedomykavost mitrální chlopně



Obr.2-61 Příklady časových průběhů II. ozvy - (a) normální signál; (b) nedomykavost aortální chlopně (c) Botallova stenóza; (d) zúžení aortálního vyústění;

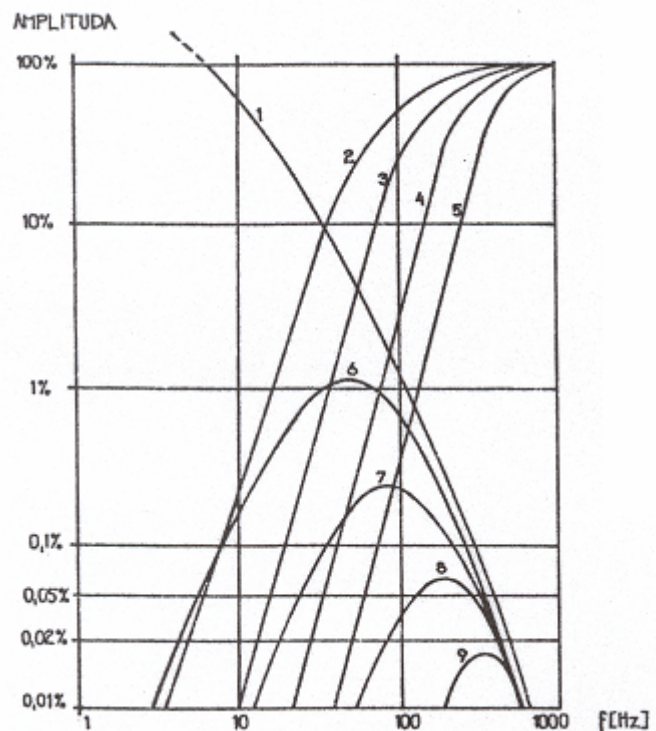
45 Hz); (b) kmitům stěn srdečních komor; (c) otevření semilunárních chlopní; (d) víření krve na začátku velkých tepen.

Druhá ozva trvá 50 - 140 ms, frekvenční složky má v pásmu 10 - 800 Hz, má vyšší zvuk než ozva první, za normálních podmínek má náhlý nástup, jasný zvuk. Má dvě složky - aortální a pulmonální.

Třetí a čtvrtá ozva mají významně nižší úroveň signálu i frekvenčně, mají základní frekvenci 10 - 40 (70) Hz. III. ozva se vyskytuje v čase vlny U, přibližně 150 ms po uzavěru aortální chlopně, doba trvání cca 40 - 80 ms. IV. ozva se nachází těsně před komplexem QRS, případně splývá s I. ozvou. Obě ozvy jsou zpravidla slyšitelné, registrovatelné jsou pouze fonokardiografem.

Frekvenční obsah šelestů se pohybuje v pásmu přibližně od 100 Hz do 1 kHz.

Ke snadnějšímu identifikování jednotlivých částí fonokardiogram se používá při snímání signálu filtrace horními propustmi s různou mezní frekvencí -typicky se používá rozdělení signálu na kmitočtová pásma: nízké s mezní frekvencí 35 Hz, střední I ~ 70Hz, střední II ~ 140Hz, vysoké I ~ 250Hz a vysoké II ~ 400Hz. Hmota hrudní stěny působí setrvačně (hrudník



Obr.2-62 Frekvenční charakteristiky vstupní části fonokardiografu - 1- frekvenční charakteristika hrudní stěny; 2-5 frekvenční charakteristiky horních propustí ve vstupním modulu fonokardiografu; 6-9 výsledné frekvenční charakteristiky

se z hlediska frekvenčních vlastností chová jako dolní propust), frekvenční spektrum srdečních zvuků je tedy průchodem hrudníkem ze shora omezeno. Spolu hrudníkem se vstupní horní propusti chovají jako pásmové propusti (obr.2-62).



Obr.2-63 Příklady fonokardiogram mitrální stenózy - záznamy s různým časovým měřítkem

## ODPOVĚZTE

Jaké jsou příznaky pozitivního nálezu při zátěžové elektrokardiografii?

Jaké druhy rušení ovlivňují signál EKG snímaný při zátěži?

Jaké jsou rozdíly mezi signálem EKG člověka a koně?

Jaké jsou základní problémy při analýze fetálního EKG?

Co je to fonokardiogram?

Co fonokardiogram obsahuje?

Jak se snímá fetální elektrokardiogram a jaké mají jednotlivé způsoby výhody a nevýhody?