

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Fakulta tělesné výchovy a sportu



**Identifikace změn mechanických vlastností axiálního
systému člověka v důsledku zátěžového a
relaxačního režimu**

Autoreferát disertační práce

Studijní program: Biomechanika

Školící pracoviště: Katedra anatomie a biomechaniky FTVS UK

Školitel: Doc. PaedDr. Karel Jelen, CSc.

Zpracovala: Mgr. Kateřina van der Kamp

SOUHRN

Problém: V současné době je věnována velká pozornost bezpečnosti řízení a možnosti registrace únavy řidičů automobilu. Jízda v automobilu je monotónní statická a vibrační zátěž, která po nějaké době vyvolává změny v axiálním systému, dyskomfort a únavu.

Hypotéza: Prostřednictvím metodiky TVS je možné prokázat změnu mechanických vlastností axiálního systému. Použitím metody TVS před a po různém typu zátěže nebo před a po relaxaci je možné detekovat změny viskoelastických vlastností axiálního systému na základě změny přenosu vlnění axiálním systémem. Metodu TVS je možné využít i u těhotných subjektů.

Cíl: Ověřit využitelnost metodiky TVS pro registraci změn viskoelastických charakteristik axiálního systému.

Metoda: Metodou detekce byla TVS (transfer vibration through spine). Ta spočívá v aplikaci buzení γ pulzy o pološířce 5ms a posléze harmonického buzení plynule se měnícího od 5 Hz do 160 Hz na obratle C7 a L5. Toto vlnění se přenáší podél axiálního systému a akcelerometrickými snímači je snímáno zrychlení všech trnových výběžků obratlů, kterými se vlnění šíří mezi C7 až S1. Na základě naměřených dat (vstupního buzení a jeho snímané odezvy na trnových výběžcích obratlů) lze vyhodnotit změnu celkových viskoelastických parametrů páteře před a po monotónním nebo jiném zatížení páteře nebo před a po relaxaci.

Výsledky a závěry: Dosavadní výsledky potvrdily, že metoda TVS je vhodná pro detekci mechanických změn axiálního systému. Také bylo prokázáno, že se vlivem změn v důsledku monotónního nebo fyzického zatížení nebo naopak relaxace mění i přenos vlnění axiálním systémem sledovaného subjektu. Metodu je možné využít i u těhotných subjektů.

Klíčová slova: Vibrace, monotónní zátěž, axiální systém, mechanické vlastnosti, páteř, přenos vibrací, těhotenství

SUMMARY

Problem: A lot of attention is given to the safety of the driving and the possibility to register fatigue of the drivers. Driving cars is monotony and static. Vibration loading, which causes changes in the axial system. This causes discomfort and fatigue to drivers after some time of exposure to the loading.

Hypothesis: It is possible to prove the changes of mechanical characteristics (indicators) of the axial system using the TVS (transfer vibration through spine) method. By using TVS method before and after different types of loading or before and after relaxation it is possible to detect changes of the viscoelastic properties. This can be done by checking changes in the way of waves transfer through the axial system of the observed participants.

Objective: Verify the possibility of use of TVS method to register changes of the viscoelastic characteristics of the axial system.

Method: The TVS was chosen as a detection method. The method is based on the use of five-msec semi-bandwidth γ pulse stimuli and consequent application of continuously changing harmonic stimuli which periodically differ between 5Hz and 160Hz to the vertebrae C7 and L5. This wave is carried through the axial system and its acceleration on the spinous processes between C7 and S1 is scanned with the help of accelerometric sensors. According to the measured data (the input stimuli and its recorded responses measured on the spinous processes vertebrae) it is possible to identify changes of the viscoelastic properties of the human spine before and after applying vibration or another type of loading or relaxation.

Outcome and conclusions: The research results proved the fact that the TVS method is suitable for detection of the mechanical changes of axial system. It was also proved that changes caused by a monotonic or physical loads or relaxation influence the way of waves transfer through the axial system of the observed participants. Pregnant participants can also use this method.

Keywords: Vibrations, monotony load, axial system, mechanical characteristics, spine, vibrations transmission, pregnancy

ÚVOD

V současné době se věnuje velká pozornost zvýšení bezpečnosti při řízení automobilu a ukazatelům signalizujícím pokles pozornosti řidiče, které by spolehlivě odhalily přicházející mikrospánek řidiče. Mezi hlavní příčiny poklesu pozornosti patří dlouhá monotónní zátěž operátora, psychické a fyzické podmínky a další faktory. Původně jsme tedy hledali metodiku, která by objektivně zhodnotila reakci těla – tkání osového systému na vibrační a monotónní zatížení v automobilu. Jako měřenou skupinu jsme si vytyčili skupinu těhotných žen – řidiček, jejichž pohybový aparát je již od počátku zatížen tvarovými, tkáňovými a hmotnostními změnami v těhotenství, k čemuž se následně přičítají mechanické změny pohybového aparátu v důsledku dlouhodobějšího zatížení v automobilu. Jako metodiku měření jsme zvolili TVS (přenos vibračního buzení podél páteře). Metoda TVS aplikuje buzení γ pulzy a harmonické plynule se měnící buzení na obratel páteře, následně pak akcelerometry snímá odezvu na ostatních obratlích páteře. Původním tématem práce bylo určení změny přenosové funkce segmentů těla, která je odezvou na vibrační zatížení, vlivem tvarových a hmotnostních změn v těhotenství s využitím metody TVS.

V průběhu práce vyvstala potřeba ověřit metodiku měření TVS (transfer vibration through the spine) na výpočetním a posléze mechanickém modelu páteře. Další potřebou bylo zhodnotit, zda je vybraná metodika vhodná pro detekci změn mechanických vlastností páteře v důsledku vibračního a monotónního zatížení v automobilu jak u těhotných řidiček, tak u netěhotných řidičů. Obecně jsme ověřili, zda je možné využít metodiku TVS pro detekci změn mechanických vlastností a to nejen po zátěži vibrační, ale i po fyzické zátěži a naopak zda je možné detekovat metodou TVS změny v mechanických vlastnostech tkání po dlouhodobější relaxaci. Provedli jsme též měření metodou TVS u těhotné řidičky v různém stupni těhotenství.

Naše práce je pilotní studií ve využití metodiky přenosu vibrací podél páteře pro hodnocení mechanických vlastností osového systému. Další výsledky měření a nalezení závislostí mezi budícími a rezonančními frekvencemi jsou aplikovatelné na poli ergonomie a pracovního lékařství, fyzioterapie a na sportovním poli.

Cíle práce a přesné určení řešeného problému

Cílem práce je ověřit využitelnost neinvazivní metodiky měření přenosu vibrací podél páteře (dále jen TVS) pro registraci změn reologických vlastností páteře. Dále jsme chtěli ověřit využitelnost metody TVS pro prokázání mechanických změn vlastností páteře po působení různých typů zatížení (vibračním, monotónním

statickém a fyzickém zatížení) páteře nebo naopak po dlouhodobé relaxaci. Chtěli jsme posoudit využitelnost metody také u těhotné řidičky v různém stupni těhotenství. U těhotných jsme chtěli dále ověřit, zda má stupeň těhotenství vliv na přenos vibrací osovým systémem a zda lze registrovat mechanické změny tkání v průběhu těhotenství.

Pracovní hypotézy

- 1) Metodou TVS je možné detekovat změny mechanických vlastností páteře.
- 2) Fyzické, vibrační a statické zatížení subjektu ovlivňuje charakter přenosu vibrací podél páteře a tím i mechanické vlastnosti páteře, tyto změny jsou registrovatelné metodou TVS.
- 3) Metoda TVS je využitelná k registraci změn mechanických vlastností axiálního systému u těhotných žen.
- 4) Relaxace těla subjektu ovlivňuje charakter přenosu vibrací podél páteře.

METODOLOGIE

Experiment obsahoval 4 fáze:

1. anamnézu a kineziologický rozbor
2. měření metodou TVS (transfer vibrations through the spine)
3. zátěž (vibrační statickou v automobilu nebo fyzickou zátěž) nebo relaxaci (uvolněná poloha v lehu na břicho)
4. měření metodou TVS

První částí experimentu je odebrání anamnézy a kineziologický rozbor prováděný fyzioterapeutem před a po jízdě automobilem.

Stěžejní využitou metodikou experimentu je upravené neinvazivní měření přenosu vibrací mezi jednotlivými segmenty páteře in vivo rozpracované Zemanem (Zeman 2008), které se provádí před a po jízdě automobilem. Dále jsme měření využili před a po fyzické zátěži nebo jsme měřili před a po dlouhodobé relaxaci v poloze v lehu na lůžku.

Úvodní anamnéza a kineziologický rozbor jezdce

Před jízdou jsme s vyšetřovaným vyplnili tabulku obsahující základní údaje o jezdcovi (věk, výška, váha, procento tuku, šířka hrudníku, šířka pánve, anamnéza, bolest a změny citlivosti v důsledku poruch páteře a u žen užívání antikoncepce a těhotenství). Poté jsme provedli kineziologické vyšetření, zvláštní důraz je kladen na jednotlivé obratle hrudní a bederní páteře (jejich nadměrné vychýlení latero – laterálně a předozadně, palpační bolestivost trnů, dotazujeme se na chronickou bolest a bolest při statické a dynamické zátěži).

Do kineziologického vyšetření jsou dále zahrnuty zkoušky indikující schopnost rozvinutí páteře do flexe (Čepojův příznak, Ottův inklinací index, Schoberova a Stiborova distance, Thomayer) extenze (Ottův reklinací index) a lateroflexe (lateroflexe trupu doprava a doleva). Měření schopnosti rozvinutí páteře do jednotlivých směrů se standardně používá ve fyzioterapeutické praxi a vyučuje se jako vyšetřovací metodika (Špinar, 2008) pro posouzení „zdraví páteře“. V případě poruchy páteře (degenerativní či funkční poruchy), se páteř v tomto úseku nerozvíjí do daného směru a neprodlužuje se měřená vzdálenost.

Metodika neinvazivního měření přenosu vibrací

Neinvazivní měření přenosu vibrací mezi jednotlivými segmenty páteře in vivo bylo prováděno jednou před jízdou v automobilu, fyzickým zatížením nebo relaxací, následně po odebrání anamnézy a kineziologickém vyšetření. Znovu bylo prováděno opět po jízdě automobilem, fyzickém zatížení nebo relaxaci. Měřením jsme evidovali případnou změnu mechanických charakteristik osového systému v důsledku monotónního zatížení během jízdy autem, po fyzické zátěži nebo po dlouhodobé relaxaci na lůžku.

Metoda TVS spočívá v aplikaci buzení γ pulsy o pološířce 5ms, vybuzený systém začne kmitat na jedné nebo několika vlastních frekvencích, kmity se přenášejí podél páteře a rezonanční frekvence je dána především tuhostí vazeb obratle, na něž působíme γ pulzem. Čím větší je tuhost vazeb na sousední obratel, tím vyšší rezonanční frekvenci je třeba očekávat. Meziobratlová ploténka, která je při přenosu kmitů příčně deformována, je zde jako tlumič přenášených vibrací (Zeman,2008).

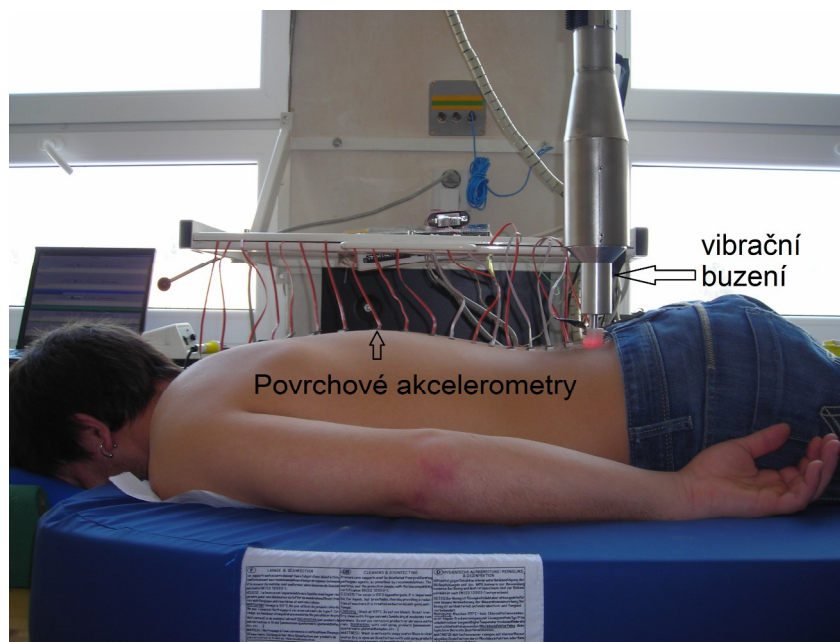
Po měření γ pulsy trvajících celkově 20s následuje harmonické buzení obratle plynule se periodicky měnící od 5 Hz do 160 Hz. Buzení působí na obratel C7 a přenáší se podél axiálního systému. Akcelerometrickými snímači je snímáno zrychlení na trnových výběžcích obratlů Th1 až S1. Dále je buzení aplikováno na obratel L5 a odpověď je snímána akcelerometry na trnových výběžcích obratlů S1 a L4 až C7.

Při detekci odpovědi páteře na vstupní buzení se předpokládá, že rychlost přenosu vlny i její útlum je spojen s parametry tkání, kterými se vlnění šíří. Z rychlosti šíření vln můžeme zpětně charakterizovat změny v mechanických vlastnostech tkání. Z teorie je jasné že pro přenos vibrací vyšších frekvencí se hodí jen materiály s vyšší tuhostí a malým útlumem. Dle Zemanové (2007) jsou již frekvence nad 15Hz dominantně přenášeny především samotnou páteří a jejím blízkým okolím, zatímco svalová okolní tkáň a žebra nemají primárně na přenos vibrací těchto frekvencí významný vliv – páteřní vibrace nejsou výrazně ovlivňovány. Mají tak vliv především sekundární, neboť udržují páteř ve stavu, který je pro daný přenos charakteristický.

Při experimentu bylo využito polohy v lehu na břiše na antidekubitní matraci (obr.1) s maximálně uvolněnými kosterními svaly, což je odlišná poloha než při jízdě automobilem nebo fyzickém a jiném zatížení, ale na druhé straně tím bylo eliminováno kmitání ostatních částí těla, zejména končetin a hlavy a v důsledku toho bylo minimalizováno znehodnocení měřeného signálu. Také se tím vyloučila odlišná poloha těla vyšetřovaných během měření, což by nastalo, pokud bychom vyšetřovali subjekty v sedu. Také jsme se vyhnuli nežádoucí aktivitě kosterních svalů, subjekty byly instruovány, aby během měření zcela relaxovaly.

Před začátkem měření přenosu vibrací jsou označeny trny jednotlivých obratlů od obratle C7 po S1. Obratle označujeme již při poloze vyšetřovaného v lehu na břiše, jelikož poloha trnů se proti kůži ve stoji a v lehu změní. Vyhledávání trnů je komplikované, pokud mají vyšetřovaní větší procento tuku a trny jsou překryty vyšší vrstvou měkkých tkání.

Po označení trnů jsme přilepili na každý trn akcelerometrický snímač. Buzení bylo realizováno elektromechanickým měničem – vibrátorem. Kontakt mezi vibrátorem a trnem buzeného obratle byl zajištěn dostatečným přitlakem vibrátoru, který byl snímán a pohyboval okolo 3,5N (350g).



Obr. 1 *Uspořádání experimentu, umístění akcelerometrických snímačů a budícího zařízení*

Měření metodou TVS na mechanickém modelu páteře

Mechanický model páteře byl vytvořen ze dřeva a silikonu (obr. 2). Obratle modelu mají tvar, rozměr a Youngův modul blízký lidskému obratli, jsou vyrobeny ze dřeva. Ploténky modelu mají tloušťku a Youngův modul blízký lidské meziobratlové ploténce. Na mechanickém modelu je možné testovat konzistentnost naměřených dat a podobnost výpočetního modelu páteře s reálným člověkem a jejím fyzickým modelem.

Analýzou dat získaných měřeními na mechanickém modelu došlo k ověření předpokladu, že nezáleží na směru buzení v páteři (jestli je buzení prováděno na C7 nebo L5). Model páteře umožňuje také měření metodou TVS bez šumu vznikajícího peristaltikou střev nebo srdeční akcí u reálného člověka. Mechanický model také

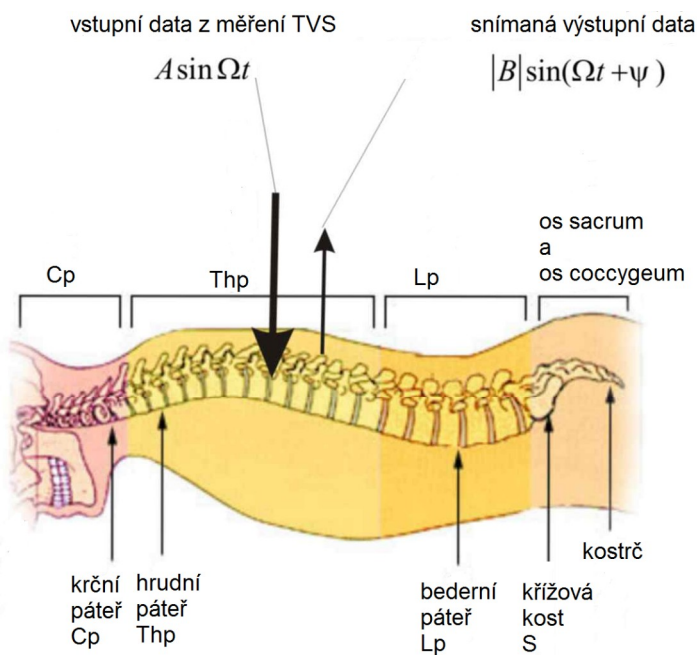
poskytuje možnost opakovat měření s nulovou změnou mechanických vlastností měřeného objektu v čase.



Obr. 2 Mechanický model páteře ze dřeva a silikonu.

Model páteře

Ve spolupráci s Ústavem termomechaniky AV ČR a MFF byl sestaven model páteře. Tento model sestavený na bázi základních charakteristik měřeného systému byl vytvořen k ověření dat naměřených metodou TVS. Model byl vytvořen, aby prokázal, že přenos vlnění a ztráta přenosu vlnění při průchodu daným systémem je závislá na vlastnostech systému, kterým vlnění prochází. Nebo naopak mechanické vlastnosti tkáně můžeme zpětně charakterizovat rychlostí přenosu vlnění daným systémem (obr. 3) (Maršík, 2010), (Machač, 2011).



Obr.3 Schéma měření metodou TVS : vlevo jsou vstupní data z měření, která známe a vpravo odpověď kterou snímáme akcelerometry, kde A – amplituda vstupní síly, Ω – okamžitá vstupní frekvence, B – amplituda odpovědi, ψ – fázový posun.

Metodu TVS lze formulovat jako řešení tlumeného harmonického oscilátoru vnější harmonickou silou.

$$M \ddot{\varphi} + \gamma \dot{\varphi} + K \varphi = \bar{A} \sin(\Omega t)$$

M – hmotnost segmentu,

γ – celková viskozita,

K – celková tuhost

Odezva obratle je dána vztahem:

$$|B| = \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4b^2 \Omega^2}}$$

pro $\text{tg} \psi = -\frac{2b\Omega}{\omega_0^2 - \Omega^2}$

ω_0 – vlastní rezonanční frekvence segmentu

Ω – budicí frekvence

b – dekrement útlumu reprezentující tlumení související s viskozitou

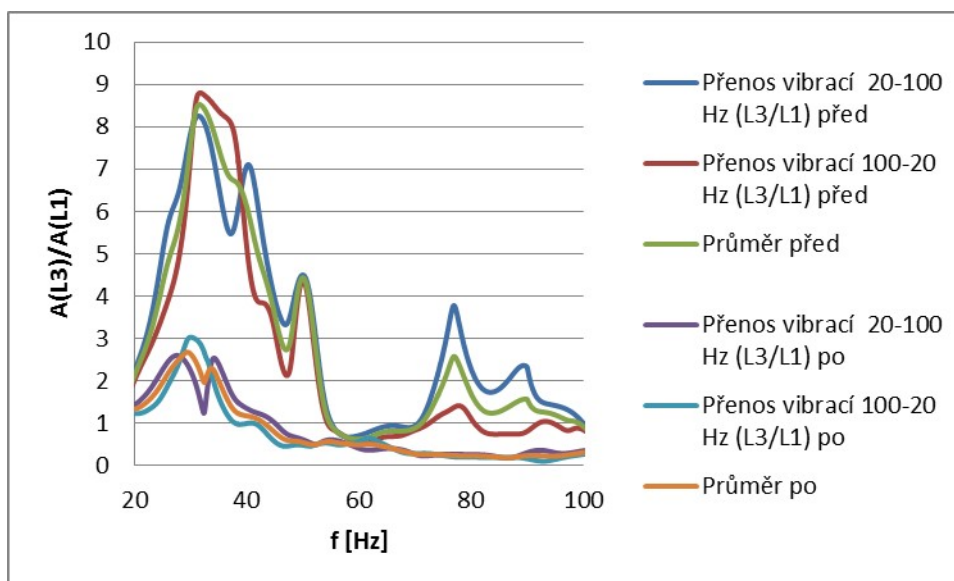
Podle naměřených dat (vstupního stimulu – A a zaznamenané amplitudy odpovědi – B, změřené na trnových výběžcích obratlů) a geometrických charakteristik lidské páteře, které se během měření nemění (výška – h, poloměr meziobratlové destičky – a) je možné určit změny ve viskoelastických vlastnostech lidské páteře před a po zatížením vibracemi, či po jiném druhu zátěže, či po relaxaci.

Z detekované odezvy páteře byl nalezen vztah mezi celkovým elastickým modulem lidské páteře – E a viskozitou γ (poměr mezi budicí amplitudou a amplitudou konkrétního obratle) a fázovým posunem – ψ vstupního signálu (Maršík 2010).

$$\frac{\pi a^4 E}{\gamma h \Omega} = \pm \frac{\left(\frac{|B| \Omega^2}{A} \pm \cos \psi \right)}{\sin \psi}$$

VÝSLEDKY

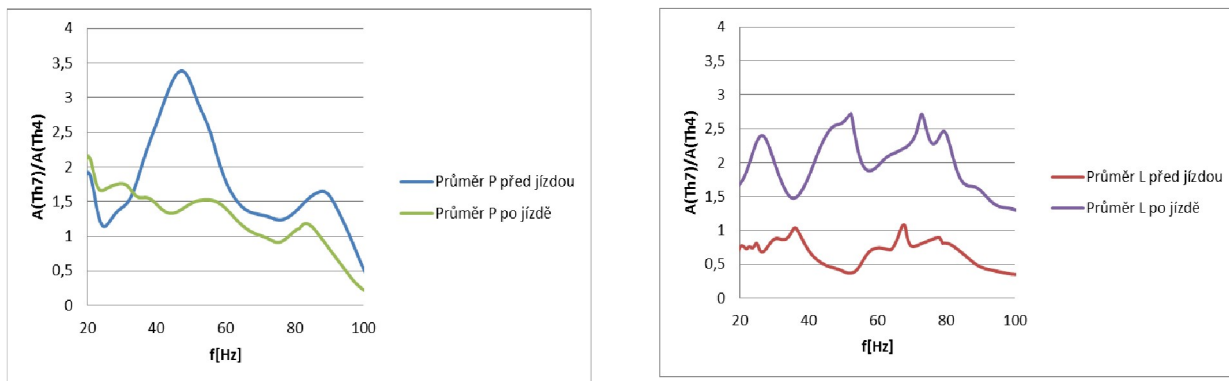
Celkově jsme provedli měření u 9 subjektů, u některých bylo měření provedeno opakovaně, celkem bylo provedeno 30 měření vždy před a po různém typu zátěže, před a po jízdě v automobilu nebo před a po relaxaci. Během měření jsme použili buzení rostoucími a klesajícími frekvencemi a zjistili jsme, že odpověď axiálního systému na buzení rostoucími a klesajícími frekvencemi je velmi podobná. Charakter grafů i rezonanční vrcholy si u buzení rostoucími a klesajícími frekvencemi odpovídají (obr. 4). Při hodnocení dalších měření jsme tedy používali průměr z buzení rostoucími a klesajícími frekvencemi před zátěží a po zátěži.



Obr.4 Buzení z obratle C7 rostoucími a klesajícími frekvencemi u stejného subjektu před zátěží a po zátěži a průměry z buzení rostoucími a klesajícími frekvencemi před a po zátěži u jednoho subjektu v úseku L3/L1.

Měli jsme možnost vytvořit poměry amplitud snímaných z jednotlivých obratlů při buzení z obratle C7 nebo z obratle L5. Z výsledků usuzujeme, že nejlépe je vidět přenos či tlumení a únavu v daném úseku na vzdálenějším konci od buzeného obratle, tj. na bederní oblasti při buzení z obratle C7 a na horní hrudní páteři při buzení z obratle L5, kdy v daném úseku vzniká složením přímého a odraženého vlnění stojaté vlnění. Pokud se shodne poměr kmitny ku uzlu je vidět vliv únavy.

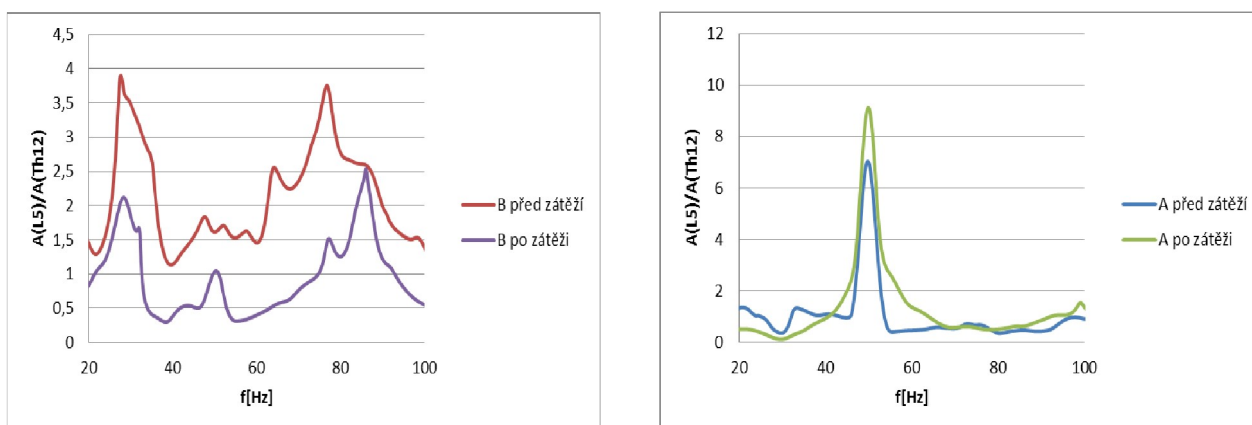
Vibrační zátěž při jízdě automobilem vyvolává u každého řidiče jinou reakci v daném úseku (obr. 5). Je ale také možná rozdílná reakce na vibrační nebo jinou zátěž u stejného jedince v různých úsecích páteře. Jeden úsek páteře může odpovídat vyšším tlumením a nižším přenosem vibrací a v dalším úseku opačnou reakcí.



Obr. 5 Rozdílná reakce dvou subjektů na zátěž v automobilu, subjekt P odpovídá po jízdě nižším přenosem a vyšším tlumením a subjekt L po jízdě v tomto úseku páteře méně tlumí a více přenáší vibrace. U obou bylo buzení prováděno z obratle C7 a snímán přenos/tlumení v úseku Th7/Th4.

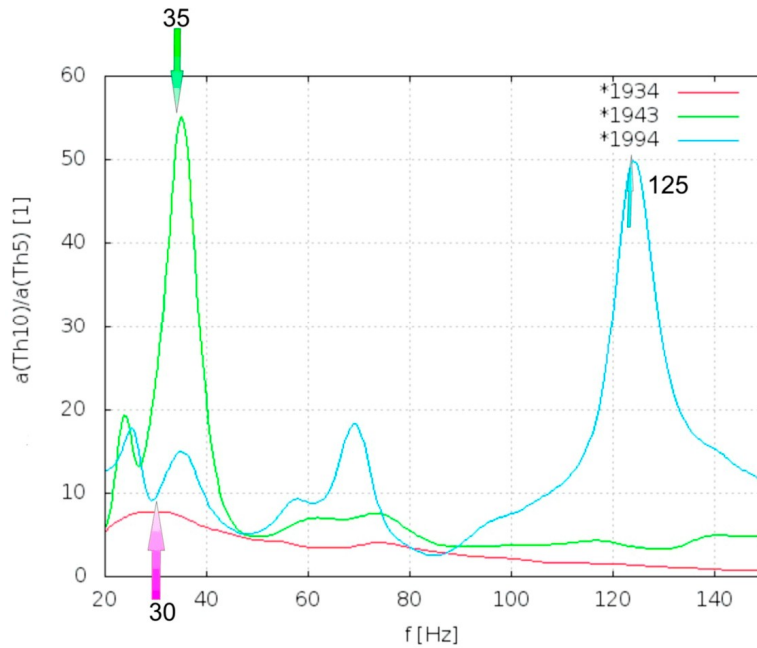
Z výsledků měření u různých subjektů je patrné, že u všech subjektů dochází po zátěži - ať už fyzické, či vibrační hypokineticke zátěži v automobilu – ke změně mechanických vlastností axiálního systému a tím i ke změně vibračního přenosu axiálním systémem. Stejně tak dochází ke změně mechanických vlastností axiálního systému a tím i vibračního přenosu po dlouhodobější relaxaci subjektu na lůžku. Reakce jednotlivých subjektů na zátěž se u některých subjektů liší i v odpovědi jednotlivých úseků páteře.

U trénovaného svalového korzetu a pravděpodobně i meziobratlového spojení se viskoelastické vlastnosti po zátěži téměř nemění a přenos a tlumení před a po zátěži se příliš neliší. U méně trénovaného jedince klesá vlivem zátěže svalová tuhost a ve svaly se zvyšují viskózní složky, takový svalový korzet nedisponuje koncentrací mechanického předpětí jako sval před zátěží nebo po relaxaci (obr. 6).



Obr. 6 Subjekty B a A odpovídají rozdílně na fyzickou zátěž, zatímco u subjektu B je patrná únava – rozdílná reakce před a po zátěži, u subjektu A se viskoelastické vlastnosti po zátěži příliš nemění.

S rozdílným věkem subjektů nacházíme rozdílný přenos vibračního buzení axiálním systémem. Zatímco u mladších subjektů reaguje axiální systém pružně - spojení na páteři jsou měkká a kmitají, vidíme velké rezonanční peaky. U starších subjektů páteř reaguje jako jeden celek, jedna tyč, spojení na páteři nejsou tolik pružná, nevidíme ostré rezonanční vrcholy (obr. 7) . Rezananční vrcholy se u mladších subjektů posouvají k vyšším frekvencím kolem 40 – 60 Hz i výše.



Obr. 7 Přenos v oblasti mezi obratli Th10 a Th5 u tří subjektů rozdílného věku (rok narození 1934, 1943 a 1994) (Panská a spol., 2012).

DISKUSE

Zabývali jsme se především tím, zda je možné metodou TVS detekovat změny mechanických a reologických vlastností axiálního systému a jestli tato metoda umožňuje registrovat změny mechanických vlastností axiálního systému způsobené zatížením nebo naopak relaxací.

V axiálním systému, v našem případě především v úseku páteře mezi obratli C7 a S1 jsou zastoupeny různé druhy tkání – především kostní tkáň, meziobratlové destičky, vazivo a svalová tkáň.

Při zatěžování kostní tkáně dochází k využití práce vnější zátěže, která se mění zejména na energii deformační. V oblasti elastických deformací tak dochází k akumulaci energie, v oblasti plastických deformací může dojít ke spotřebě energie a nevratné změně. Cyklickým namáháním mohou vznikat mikrodeformace. (<http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpbk/kompendium>)

Při mechanickém zatížení meziobratlového disku se deformuje jeho jádro a tekutina je vytlačována všemi směry. S věkem se zhoršují viskózní vlastnosti jádra, tj. snižuje se množství tekutiny v něm obsažené, snižuje se výška meziobratlového disku. (<http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpbk/kompendium>)

Vazivo má značné viskoelastické vlastnosti a má především schopnost odolávat zatížení v tahu.

U svalové tkáně jsou mechanické vlastnosti, jeho tuhost, závislá na stupni aktivity. Tuhost roste se stupněm aktivace svalu. U méně trénovaného svalového korzetu dochází dříve k únavě a tím k poklesu tuhosti svalu a zvýšení viskózní složky. Unavený svalový korzet nedisponuje zásobou – koncentrací – mechanické energie jako před zátěží, mechanické vlnění procházející svalem je lépe absorbováno než u svalu neunaveného. Únava způsobuje zvýšené tlumení příčných kmitů (svalovou ochablost) a nechá vyniknout 2. harmonickou frekvenci (když se sejde poměr kmitna / uzel) (Maršík, 2010).

Svalová tkáň je významný akumulátor energie vzhledem ke svým elastickým vlastnostem.

Páteř jako celek je schopna absorbovat určité množství deformační energie do svých jednotlivých složek např. při lokomoci či vibracích, pokud je množství deformační energie příliš vysoké může dojít k nevratným změnám tkání, kde dojde k výrazné spotřebě energie (Johnson, 1989).

Z našich experimentálních měření lze dovodit, že mladá, zdravá a ohebná páteř jako celek, kmitá jako elastická tyč. Čím vyšší je její elasticita, tím více mechanické energie je schopná při zátěži absorbovat, tím méně je znatelný vliv únavy v důsledku zatížení, spoje na páteři jsou ohebné a relaxované, dobře kmitají.

Pokud je páteř méně ohebná ukazuje se, že méně kmitá – méně reaguje na vibrační buzení, její spoje jsou méně relaxované a ohebné (Panská, 2012).

Elasticita určuje rezonanční frekvence a je určena hlavně obratli a jejich spojeními, viskozita je určena především svaly a vazy. Nejvíce určuje rezonanční frekvence smykový modul chrupavek, svalová složka závisí na frekvenci minimálně. Za útlum příčného vlnění tedy odpovídá viskozita (svaly, vazy) a za přenos elastický modul (obratle a jejich spojení na páteři) (Maršík, 2010).

V našich měřeních se ukazuje, že u zdravých a ohebných páteří nacházíme rezonanční frekvenci páteře mezi 40 – 60 Hz i více. Páteř reaguje na mechanické vlnění a kmitá na rozdíl od křivek subjektů narozených v r. 1934 a 1943. Páteř subjektu narozeného roku 1943 má rezonanční frekvenci nižší než 30 Hz a páteř subjektu narozeného roku 1934 nemá žádné výrazné rezonanční peaky, jeho spojení na páteři nejsou pružná a nekmitají.

Metoda TVS je schopná odhalit únavu jedince po zátěži. U unavených jedinců jsou svalová vlákna tužší – příčné vlnění generované metodou TVS je lépe absorbováno, únava se proto projevuje jako zvýšený útlum po zátěži nebo po jízdě automobilem. U subjektů, u kterých není tolik znatelná únava, se viskoelastické vlastnosti po zátěži téměř nemění a svaly tolik netlumí, naopak se po zátěži projevuje vyšší přenos příčného vlnění.

V našich experimentech jsme budili páteř ze dvou konců – z krčního obratle a naopak z lumbálního obratle. Poté jsme snímali odezvu na všech ostatních obratlových tělech v úseku mezi těmito buzenými obratli. Došli jsme k závěru, že nejlépe je odezva axiálního systému vidět na bederní oblasti pokud budíme z krčního obratle a naopak na horní hrudní páteři pokud budíme z bederní oblasti. Pravděpodobně se na opačném konci od buzeného obratle vygeneruje stojaté vlnění, které vzniká interferencí přímého a odraženého vlnění. Pokud se sejde poměr kmitna/uzel, můžeme na grafech vidět zřetelné maximum, které signalizuje vliv únavy.

Z výsledků vyplývá, že subjekty můžeme srovnávat spíše intarindividuálně – porovnání měření provedených u jednoho subjektu nebo měření před a po zátěži jednoho subjektu, než interindividuálně – srovnání jednotlivých subjektů mezi sebou. Z výsledků měření TVS vidíme, že se reakce na stejnou zátěž mezi jednotlivými subjekty liší. Ukazuje se také, že rozdílný přenos vibrací záleží na konstitučních vlastnostech a klidové tuhosti axiálního systému jednotlivých subjektů, která závisí na svalovém napětí, hypermobilitě, obsahu vody v meziobratlových destičkách apod. u daného subjektu (Fairley 1989).

U některých subjektů se liší také reakce v oblasti hrudní páteře a reakce v oblasti bederní páteře. Hrudní a bederní páteř je anatomicky odlišná, liší se velikost obratlů a stavba obratlů – na hrudní páteř jsou napojena žebra a hrudní koš, bederní obratle mají jen výběžky, *processi costarii*, které jsou zakrnělými žebry. Bederní a

hrudní páteř má jiné zakřivení a jiný rozsah pohyblivosti v závislosti na anatomii a uspořádání kloubních plošek. Hrudní úsek páteře je celkově o hodně delší než úsek bederní (Petrovický, 1995). Vlivem umístění plic v hrudním koši a dýchání, které zajišťují, se hrudní část axiálního systému mění s každým nádechem a výdechem. Naproti tomu před bederní páteří se nachází břišní dutina vyplněná břišními orgány. Tato fakta mohou přispět k tomu, že u některých subjektů může hrudní a bederní páteř odpovídat jinou reakcí na zatížení a vibrační buzení.

Měření, která jsme prováděli, byla hodnocena až od budící frekvence 20 Hz, pro nižší budící frekvence jsme neměli vybavení. Poznání reakcí organismu na nižší budící frekvence je velmi důležité, protože v oblasti do 10 Hz se nacházejí rezonanční frekvence pro jednotlivé orgány a segmenty těla a vystavení člověka těmto budícím frekvencím ve větší míře je pro lidský organismus nebezpečné (Pope 1998, Dupuis 1989, Fairley 1989, Sandover 1987, Vogt 1978) . Vibracím o nízké frekvenci jsou také vystaveni řidiči při jízdě v automobilu (Johnson 1989).

Přenos vibrací axiálním systémem jsme měřili v poloze v lehu na břiše na antidekubitní matraci, což nám umožnilo stejnou polohu u všech subjektů a ve značné míře zabránit přenosu jiných než námi buzených vibrací. Bylo by vhodné ale sledovat také přenos vibrací v sedu, protože v této poloze dochází k zatěžování páteře a přenosu vibrací v běžných podmínkách. Nevýhodou polohy v sedu je obtížnější technická proveditelnost experimentu a obtížněji nastavitelná standardní poloha při experimentu, ale také ne zcela totožná poloha u jednotlivých subjektů.

Bylo ukázáno, že metoda TVS je vhodným nástrojem pro identifikaci změn mechanických vlastností axiálního systému člověka. Předpokládáme, že touto metodou je možné zjistit ohebnost páteře, popř. místa s menší flexibilitou a omezenou hybností. Metoda by pak byla využitelná pro diagnostiku změn páteře ve fyzioterapii a jiných oborech. Dále by mohla být využita zejména v ergonomii či sportovním lékařství k posouzení pozitivního či negativního vlivu monotónního, vibračního nebo fyzického zatížení na axiální systém člověka a návrhu vhodné kompenzace či režimových opatření.

ZÁVĚR

Ad hypotéza č.1

Metodou TVS je možné detekovat změny mechanických vlastností páteře.

Potvrzena. Model vytvořený na základě hlavních charakteristik měřeného systému prokázal, že lze najít vztah mezi celkovým elastickým modulem lidské páteře – E a viskozitou γ a fázovým posunem – ψ vstupního signálu. Model prokázal, že přenos vlny nebo ztráta přenosu vlny při průchodu daným systémem je závislá na vlastnostech systému, kterým vlnění prochází. Změna mechanických vlastností systému se odrazí v rychlosti průchodu vlny daným systémem.

Ad hypotéza č.2

Fyzické, vibrační a statické zatížení subjektu ovlivňuje charakter přenosu vibrací podél páteře a tím i mechanické vlastnosti páteře, tyto změny jsou registrovatelné metodou TVS.

Potvrzena. Z výsledků všech měřených subjektů jsme zjistili, že po všech druzích zátěže (fyzické zátěži i monotónním statickém zatížení v automobilu) dochází ke změně mechanických vlastností axiálního systému i ke změně vibračního přenosu daným systémem, kterou je možné detekovat metodou TVS.

Ad hypotéza č.3

Metoda TVS je využitelná k registraci změn mechanických vlastností axiálního systému u těhotných žen.

Potvrzena. Z výsledků opakovaných měření u těhotné ženy usuzujeme, že je možné metodu TVS využít k registraci změn mechanických vlastností axiálního systému u těhotných žen. Metodou TVS jsme zaznamenali změny mechanických vlastností po monotónním statickém zatížení při jízdě v automobilu. Tyto změny byly podobné jako u ostatních netěhotných subjektů.

Zatím jsme nenašli spojitost mezi vyšším resp. nižším stupněm těhotenství a vyšším či nižším přenosem či útlumem vibračního buzení. To přisuzujeme tomu, že experiment byl proveden pouze s jednou těhotnou několikrát během těhotenství před a po jízdě automobilem.

Ad hypotéza č.4

Relaxace těla subjektu ovlivňuje charakter přenosu vibrací podél páteře.

Potvrzena. Vlivem relaxace dochází u subjektů vždy ke změně mechanických vlastností systému oproti prvnímu měření nebo oproti měření po fyzické nebo statické vibrační zátěži v automobilu. Tato změna je registrovatelná metodou TVS.

LITERATURA

- DUPUIS, H.: Biodynamic behavior of the trunk and the abdomen during whole-body vibration. *Acta Anaesthesiol.Scand.*, 1989. Suppl.90: 34-38
- FAIRLEY, T.E., GRIFFIN, M.J.: The apparent mass of the seated human body: vertical vibration. *J.Biomechanics*, 1989. 22(2): 81-94
- JOHNSON, D.A., SAMIN, J.C., NEVE, M.: A new design of vehicle seat intended to alleviate lower back pain. *Journal of Biomechanical Engineering*, 1989. 111: 261-2
- MACHAČ, D.: Modeling of spinal chord under dynamical loading, [Modelování dynamicky zatěžované páteře], Czech Technical University in Prague, diplomová práce, 2011
- MARŠÍK, F., ZEMAN, J., JELEN, K.: Analysis of transmission of vibration trough the spine, measured by TVS method, [Analýza přenosů kmitů na páteři, měřených metodou TVS.], Faculty of Physical Education and Sport, Department of Anatomy and Biomechanics: Praha, 2010
- PANSKÁ, Š., KLOUČKOVÁ, K., ZEMAN, J., MAREŠOVSKÝ, L., JELEN, K.: Mechanické zatěžování a stárnutí axiálního systému člověka: Identifikace změn pojivových tkání metodou TVS, *Sborník příspěvků Stárnutí 2012*, s.16
- PETROVICKÝ a spol.: Systematická, topografická a klinická anatomie III., Vydavatelství Karolinum, 1995. ISBN 80-7184-108-0, ISBN 80-7184-111-0.
- POPE, M.H., MAGNUSSON, M., WILDER, D.G.: Low back pain and whole body vibration. *Clin Orthop Relat Res.*, 1998. 354: 241-8
- SANDOVER, J., DUPUIS, H.: A reanalysis of spinal motion during vibration. *Ergonomics*, 1987. 30(6): 975-985
- ŠPINAR, J.: Propedeutika a vyšetřovací metody vnitřních nemocí, Grada: Praha, 2008. ISBN 978-80-247-1749-4.
- VOGT, L., MERTENS, H.,KRAUSE, H.E.: Model of the supine human body and its reactions to external forces. *Aviation, Space and Enviromental Medicine*, 1978. 49(1):270-278
- ZEMAN, J.: Metody neinvazivního měření vibrační přenosové funkce lidské páteře in vivo v poloze na břiše, dizertační práce, 2008
- ZEMANOVÁ, P.: Identifikace reologických vlastností meziobratlové ploténky in vitro metodou volných oscilací, dizertační práce, 2007
- <http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium>