



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra biomedicínské techniky

Realizace spirometrického vyšetření pomocí
EIT

Realization of spirometric examination using
the EIT

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský inženýr

Autor diplomové práce: Bc. Anna Miltová

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Matějka

Kladno 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Anna Miltová**
Studijní obor: Biomedicínský inženýr
Téma: **Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT**
Téma anglicky: Realization of spirometric examination using the EIT

Zásady pro vypracování:

Analýzujte možnosti provedení spirometrického vyšetření pomocí elektrické impedanční tomografie. Navrhněte algoritmus pro výpočet parametrů z impedanční křivky, které by měly odpovídat parametrům ze standardního spirometrického vyšetření. Navrhněte vhodný experimentální protokol pro srovnání výsledků ze standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného elektrickou impedanční tomografií. Pomocí navrženého algoritmu a experimentálního protokolu proveďte klinickou studii pro ověření realizovatelnosti spirometrického vyšetření elektrickou impedanční tomografií. Výsledky klinické studie vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] I. Frerichs, et. al., Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDy group, Thorax, ročník 72, číslo 1, 2016
- [2] A. Aliverti, A. Pedotti, Mechanics of Breathing New Insights from New Technologies, ed. Second, Springer, 2014, ISBN 978-88-470-5646-6
- [3] William V. Wojciechowski, Respiratory Care Sciences: An Integrated Approach, ed. Fifth, Delmar Cengage Learning, 2014, ISBN 978-1-133-59477-2

Vedoucí: **Ing. Jan Matějka**
Konzultant: doc. Ing. Martin Rožánek, Ph.D.

Zadání platné do: 20.09.2019


vedoucí katedry / pracoviště


děkan

V Kladně dne 19.02.2018

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne

Bc. Anna Miltová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu své práce, panu Ing. Janu Matějkovi, za jeho ochotnou pomoc, trpělivost a díkuze při vypracování této diplomové práce a péči projevenou v průběhu celého studia. Poděkování patří také panu doc. Ing. Martinu Rožánkovi, Ph.D. za ochotnou pomoc během experimentálního měření, panu prof. Ing. Karlu Roubíkovi, Ph.D. za odborné rady z oblasti elektrické impedanční tomografie a Ing. Jakubu Ráflovi, Ph.D. za jeho čas věnovaný konzultacím ke statistickému zpracování dat. Děkuji také všem probandům, kteří se zúčastnili experimentálního měření, bez nichž by práce nemohla vzniknout.

Práce byla podpořena granty SGS16/258/OHK4/3T/17 a SGS17/203/OHK4/3T/17 ČVUT v Praze.

ABSTRAKT

Název diplomové práce: Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT

Elektrická impedanční tomografie (EIT) je neinvazivní diagnostická metoda, která poskytuje pomocí relativních změn bioimpedance informace o regionální i globální ventilaci. Na základě změny elektrické bioimpedance uvnitř hrudníku v průběhu dechového cyklu by mělo být možné realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT, které by odstranilo negativní vlastnosti standardního spirometrického vyšetření.

Cílem práce bylo realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT systému PulmoVista 500 (Dräger, Lübeck, Německo) s kalibrací pomocí klidového dechového objemu získaného ze simultánního měření spirometrem. Na základě kalibrace porovnat spirometrické parametry získané z oddělených měření pomocí EIT a standardní spirometrie pomocí pneumotachografu. Dílčím cílem bylo navrhnout vhodný experimentální protokol a algoritmus pro srovnání standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného elektrickou impedanční tomografií.

Prospektivní intervenční studie byla provedena na 22 zdravých dobrovolnících (13 mužů a 9 žen). V rámci experimentu bylo pro každého probanda provedeno šest měření pro výpočet spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a Tiffeneauova indexu (TI) FEV₁/FVC. Měření byla provedena v randomizovaném pořadí: dvě standardní spirometrická vyšetření, dvě spirometrická vyšetření realizovaná pomocí EIT a dvě simultánní měření oběma metodami. Spirometrické vyšetření a výpočet jednotlivých parametrů byl proveden v souladu s ATS/ERS standardy z roku 2005 a jejich doplněním z roku 2017. Naměřené a vypočtené spirometrické parametry byly statisticky vyhodnoceny.

Výsledky z experimentální studie ukázaly, že při statistickém hodnocení simultánního měření EIT a standardní spirometrie nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi vypočtenými parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC z jednotlivých metod ($p > 0,05$). Hodnocení spirometrických parametrů získaných z oddělených měření bylo provedeno pro každého probanda zvlášť, na základě kalibrační konstanty získané během simultánního měření. Pro statistické hodnocení jednotlivých parametrů z oddělených měření bylo využito mediánů ze všech standardních spirometrických vyšetření a násobky mediánu absolutních odchylek od mediánu (MAD). Na základě výsledků nebyl statisticky potvrzen vliv EIT pásu na měřené hodnoty spirometrických parametrů ($p > 0,05$). Regresní analýzou byla zjištěna lineární závislost kalibrační konstanty na objemu FVC ($R^2 = 0,4974$, $p < 0,05$) i FEV₁ ($R^2 = 0,5013$, $p < 0,05$).

Z klinického hlediska výsledky prokázaly, že lze realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT na základě předchozí kalibrace simultánního měření EIT a standardní spirometrie.

Klíčová slova:

Elektrická impedanční tomografie, spirometrické vyšetření, biomedance, FVC, FEV₁, Tiffeneauův index

ABSTRACT

Masters's Thesis title: Realization of spirometric examination using the EIT

Electrical impedance tomography (EIT) is a non-invasive diagnostic method that provides information about regional and global ventilation based on relative changes of bioimpedance. Based on the change in electrical bioimpedance inside the chest during the breathnig cycle, it should be possible to execute spirometric examination using the EIT to remove the negative characteristics of the standard spirometric examination.

The aim of this thesis was to carry out spirometric examination using the PulmoVista 500 EIT system (Dräger, Lübeck, Germany) with a calibration using the breathing volume obtained from simultaneous spirometer measuring. Another goal was to compare, based on the calibration, the spirometric parameters obtained from separate measurements using EIT and standard spirometry using a pneumotachograph. A partial objective was to design a suitable experimental protocol and algorithm for comparing standard spirometry and spirometry examinations realized by electrical impedance tomography.

A prospective interventional study was performed on 22 healthy volunteers (13 men and 9 women). During the experiment, six measurements were performed for each examined individual to calculate the spirometric parameters of FVC, FEV₁ and Tiffenea's index (TI) FEV₁/FVC. Measurements were performed in a randomized sequence: two standard spirometric examinations, two spirometric examinations realized using the EIT and two simultaneous measurements by both methods. The spirometric examination and the calculation of the individual parameters were realized in accordance with the ATS / ERS standards of 2005 and their amendment from 2017. The measured and calculated spirometric parameters were statistically evaluated.

The results of the experimental study showed that no statistically significant difference between the calculated parameters of FVC, FEV₁ and FEV₁/FVC from the individual methods was demonstrated in the statistical evaluation of simulated EIT measurement and standard spirometry ($p > 0,05$). The evaluation of the spirometric parameters obtained from the separate measurements was performed for each subject separately, based on the calibration constant obtained during the simultaneous measurement. For statistical evaluation of particular parameters, medians were used from all standard spirometric examinations and median absolute median deviations from median (MAD). Based on the results, it was found out no statistically significant influence of the EIT belt on the measured spirometric parameters ($p > 0,05$).

The regression analysis showed a linear dependence of the calibration constant on the volume of FVC ($R^2 = 0,4974$, $p < 0,05$) and FEV_1 ($R^2 = 0,5013$, $p < 0,05$).

From the clinical point of view the results have shown spirometry can be realized using the EIT based on a previous calibration of simultaneous EIT measurement and standard spirometry

Keywords:

Electrical impedance tomography, spirometric examination, bioimpedance, FVC, FEV_1 , Tiffeneau's index

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	13
1 Úvod	14
1.1 Přehled současného stavu	14
1.2 Cíle práce	15
2 Spirometrické vyšetření a EIT	17
2.1 EIT systém PulmoVista 500	17
2.2 Spirometrické vyšetření	19
3 Metody	23
3.1 Návrh studie	23
3.2 Karta probanda	24
3.3 Popis zkoumané skupiny	25
3.4 Popis experimentu	25
3.5 Standardní spirometrické vyšetření	28
3.6 Spirometrické vyšetření realizované pomocí EIT	28
3.7 Spirometrické vyšetření realizované pomocí pneumotachografu a EIT	30
3.8 Ukončení měření	31
3.9 Zpracování dat z EIT	32
3.10 Statistická analýza zpracovaných dat	37
4 Výsledky	44
4.1 Vliv EIT pásu na výsledky ze standardního spirometrického vyšetření	45
4.2 Oddělené měření EIT a standardní spirometrie	48
4.3 Simultánní měření EIT a standardní spirometrie	50
4.4 Rozložení hodnoty $sens_{avg}$	58
5 Diskuze	61
5.1 Vliv EIT pásu na výsledky ze standardního spirometrického vyšetření	61
5.2 Oddělené měření EIT a standardní spirometrie	64
5.3 Simultánní měření EIT a standardní spirometrie	66
5.4 Rozložení hodnoty $sens_{avg}$	68
5.5 Limitace metod měření a vyhodnocení dat	68
5.6 Možnosti dalšího výzkumu	70
6 Závěr	72

Seznam použité literatury	73
A Žádost o projednání se souhlasem EK FBMI	81
B Sylabus výzkumného projektu	82
C Informovaný souhlas	84
D Protokol měření	88
E Karta probanda	98
F Tabulky naměřených a vypočtených hodnot	100
G Výsledky z odděleného EIT a spirometrického vyšetření	121
H Obsah příloženého CD	153

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
a	-	absolutní regresní koeficient
b	-	regresní koeficient, směrnice regresní přímky
BMI	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	index tělesné hmotnosti
f	Hz	frekvence
f_{sample}	Hz	vzorkovací frekvence
FEV_1	L	usilovně vydechnutý objem vzduchu za první sekundu výdechu
FEV_6	L	usilovně vydechnutý objem vzduchu vzduchu za šestou sekundu výdechu
FEV_1/FVC	-	Tiffeneauv index
F_{sig}	-	statistická významnost F-testu
FVC	L	usilovná vitální kapacita
I	A	elektrický proud
IVC	L	inspirační vitální kapacita
MEF_{25}	$\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	maximální průtok vzduchu v 25 % FVC
MEF_{50}	$\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	maximální průtok vzduchu v 50 % FVC
MEF_{75}	$\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$	maximální průtok vzduchu v 75 % FVC
p	-	hodnota statistické významnosti
$p_{diffFVC}$	-	p rozdílu FVC ze standardní spirometrie a spirom. vyšetřování pomocí EIT
$p_{diffFEV_1}$	-	p rozdílu FEV_1 ze standardní spirometrie a spirom. vyšetřování pomocí EIT
$p_{diffFEV_1/FVC}$	-	p rozdílu FEV_1/FVC ze standardní spirometrie a spirom. vyšetř. pomocí EIT
$p_{FEV_1vol,}$	-	p průměru FEV_1 ze simultánního měření
$p_{FVCvol,}$	-	p průměru FVC ze simultánního měření
$p_{FtestFVC}$	-	p F-testu FVC
$p_{FtestFEV_1}$	-	p F-testu FEV_1
$p_{sens_{avg}}$	-	p průměrné hodnoty sensitivity ze simul. měření

Symbol	Jednotka	Význam
$p_{sens_{avg1}}$	-	p sensitivity z prvního měření
$p_{sens_{avg2}}$	-	p sensitivity z druhého měření
$p_{spiro_{pás}}$	-	p standardní spirometrie s EIT pásem
p_{spiro}	-	p standardní spirometrie bez EIT pásu
p_{volume}	-	p spirometrického vyšetření pomocí EIT
PEF	$L \cdot s^{-1}$	maximální expirační průtok
Q_1	-	testovací kritérium pro Dixonův test odlehlých hodnot
Q_2	-	testovací kritérium pro Dixonův test odlehlých hodnot
Q_{krit}	-	kritická hodnota Dixonova testu odlehlých hodnot
q_V	$L \cdot s^{-1}$	objemový průtok
R	$cm \cdot H_2O \cdot L^{-1} \cdot s^{-1}$	průtočný odpor
R^2	-	determinační koeficient
R^2_{FVC}	-	determinační koeficient parametru FVC
$R^2_{FEV_1}$	-	determinační koeficient FEV_1
RV	L	reziduální objem
$sens$	$L \cdot AU^{-1}$	sensitivita
$sens_{avg}$	$L \cdot AU^{-1}$	průměrná hodnota sensitivity
SVC	L	klidová vitální kapacita
t	s	čas
TV	L	klidový dechový objem
U	V	elektrické napětí
V	L	objem
VC	L	vitální kapacita
VC_{max}	L	maximální vitální kapacita
Z	Ω	biimpedance
ΔZ	AU	regionální relativní změna biimpedance
ΔZ_{TV}	AU	relativní změna bioimpedance klidového dýchání
α	-	hladina statistické významnosti

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
ATPS	teplota a tlak okolí a vzduch nasycený vodními parami
ATS	Americká hrudní společnost
AU	arbitrary units
BTPS	teplota těla, atmosférický tlak a vzduch nasycený vodními parami
BTK	bezpečnostně technická kontrola
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
EIT	elektrická impedanční tomografie
ERS	Evropská respirační společnost
FBMI	Fakulta biomedicínského inženýrství
f-EIT	funkční EIT
MAD	medián absolutních odchylek od mediánu
PTF	funkční vyšetření plic
SD	směrodatná odchylka
ZIS	zdravotnická izolovaná soustava

1 Úvod

V klinické praxi se pro hodnocení stavu respirační soustavy nejčastěji využívá spirometrické vyšetření. Spirometrie je neinvazivní, objektivní a rychlá metoda pro určení přítomnosti či nepřítomnosti onemocnění plic a umožňuje případně vážnost onemocnění kvantifikovat. Lékař může na základě výsledků spirometrického vyšetření určit, zda se jedná o restriktivní či obstrukční onemocnění respirační soustavy a pacienta pak adekvátně léčit [1, 2].

Standarní spirometrické vyšetření je realizováno pomocí pneumotachografu, který využívá pro výpočet objemů odporový prvek. Z hygienických důvodů je do měřící soustavy přidán antibakteriální filtr. Pacient dýchá skrze soustavu spojenou z pneumotachografu a antibakteriálního filtru dle předem definovaných dechových manévrů [3, 4].

Pro vážně nemocné nebo pediatrické pacienty může být obtížné provést konvenční spirometrické vyšetření, protože přidání pneumotachografu a antibakteriálního filtru před respirační soustavou může vést ke zvýšení mrtvého prostoru, průtočného odporu a může dojít k ovlivnění dechového vzoru. Všechny tyto negativní vlastnosti a snížená spolupráce pacienta mohou vést k ovlivnění naměřených výsledků a jejich špatné interpretaci [1,4–9].

Mimo pneumotachografu je možné realizovat spirometrické vyšetření pomocí rentgenového záření, výpočetní tomografie či magnetické rezonance. Nevýhodou těchto metod je nutnost použít ionizující záření či kontrastní látky [10, 11]. Naopak elektrická impedanční tomografie (EIT) je bezpečná neinvazivní diagnostická metoda, která poskytuje na základě relativních změn elektrické bioimpedance informace o regionální i globální ventilaci. Hlavní výhodou EIT systému je diagnostika bez použití ionizujícího záření založená na rozdílné biimpedanci lidské tkáně [12]. Na základě změny elektrické bioimpedance uvnitř hrudníku v průběhu dechového cyklu by mělo být možné realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT.

1.1 Přehled současného stavu

Možností realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT bylo zkoumáno několika studiemi [13–23], ve kterých byla simultánně snímána EIT se spirometrií.

V minulosti byla zjišťována hlavně lineární závislost mezi změnou relativní bioimpedance a objemem získaným ze spirometru [13–16]. Snahou kvantitativně hodnotit EIT

měření přepočítáváním bioimpedance pomocí různých modelů či antropometrických údajů se zabývaly studie [16–18]. Další možnosti hodnocení EIT měření byly zjišťovány v rámci studií [19, 20], konkrétně pomocí indexu globální nehomogenity či hodnocení pixelů z výsledných EIT snímků. Studie [19] realizovaná v roce 2012 byla první, která zkoumala možnost použití EIT jako alternativní možnost standardního spirometrického vyšetření na přístroji PulmoVista 500.

Přirovnáním maximálního počtu pixelů z EIT snímků ku usilovné vitální kapacitě (FVC) a úměrně tomu dopočítávat ostatní spirometrické parametry se věnovala studie [21]. Stejný princip použila studie [22], ale místo snímků použila jako první pro výpočet spirometrických parametrů průběh relativní bioimpedance. Tato studie byla provedena pouze na dětech s věkovým průměrem $10,82 \pm 4,19$ let, proto není jisté, zda je tato metoda přepočtu vhodná pro dospělé pacienty s vyššími dechovými objemy a vyššími průtokovými rychlostmi [22].

Nejnovější studie z roku 2017 [23] také využívala pro přepočet průběh změny relativní bioimpedance a její linearitu se změnou dechového objemu. Pro výpočet objemů z impedanční křivky byl využit předpis kalibrační rovnice získaný pomocí klidového dýchání. Tato lineární závislost musela být přepočítávána pro pacienta znovu pro každé měření [23]. Studie [19, 22, 23] realizovaly měření elektrické impedanční tomografie pomocí přístroje PulmoVista 500.

Všechny doposud realizované studie využívající kalibrační rovnice pro výpočet objemů z impedanční křivky prováděly kalibraci pro celý průběh spirometrického vyšetření včetně forsírovaného dýchání. V žádné dostupné literatuře nebyl proveden výpočet spirometrických parametrů z impedanční křivky získané během spirometrického vyšetření realizovaného pouze pomocí EIT, která byla kalibrována pomocí standardního spirometru z předchozích měření. Nebyla provedena žádná studie na porovnání spirometrických parametrů z oddělených měření pomocí EIT a standardní spirometrie pomocí pneumotachografu.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce bylo realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT s kalibrací pomocí klidového dechového objemu získaného ze simultánního měření spirometrem. Na základě získané kalibrace porovnat spirometrické parametry získané z oddělených měření pomocí EIT a standardní spirometrie pomocí pneumotachografu.

Dílčím cílem této diplomové práce bylo analyzovat možnosti provedení spirometrického vyšetření pomocí EIT. Na základě analýzy navrhnout vhodný experimentální protokol a algoritmus pro srovnání spirometrického vyšetření ze standardního

spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného elektrickou impedanční tomografií. Dalším dílčím cílem bylo provést experiment pomocí navrženého algoritmu a experimentálního protokolu na zdravých probandech pro ověření realizovatelnosti spirometrického vyšetření elektrickou impedanční tomografií a výsledky následně statisticky vyhodnotit.

2 Spirometrické vyšetření a EIT

2.1 EIT systém PulmoVista 500

EIT je zobrazovací metoda využívající elektrické vodivosti biologické tkáně. Vodivost biologické tkáně je dána přítomností iontů, kdy různé biologické tkáně obsahují různé množství iontů a jsou tedy různě vodivé. Na základě odlišné vodivosti jednotlivých tkání je EIT schopna od sebe odlišit jednotlivé struktury a typy tkání. Vodivost tkání je popisována pomocí veličiny zvané bioimpedance. Tato veličina popisuje odpor, který tkáň klade střídavému elektrickému proudu [24–26].

V místech obsahujících velké množství iontů a s vysokým obsahem extracelulární tekutiny klesá hodnota bioimpedance. Krev je tvořena krevními elementy a má vysoký obsah iontů, proto je její hodnota bioimpedance nízká. Plicní tkáň je tvořena mimo jiné z pneumocytů, malých alveolárních buněk, mezi nimiž se nacházejí kapiláry. Plicní tkáň je proto dobře prokrvována a má malou hodnotu bioimpedance. Na rozdíl od plicní tkáně vzduch obsahuje pouze malé množství iontů a proto má vysokou hodnotu impedance. Hodnota bioimpedance plic se mění v závislosti na fázi dechového cyklu. Při inspiriu je v plicích větší objem vzduchu, čímž dojde ke zvětšení alveolárního prostoru. Elektrický proud prochází přes místa s nižší hodnotou bioimpedance a bude tedy snadněji téct plicní tkání než alveoly naplněnými vzduchem. Prodloužením proudové dráhy při inspiriu narůstá i hodnota bioimpedance. Naopak je tomu při expiriu, kdy je alveolární prostor snižován a tím dochází k snížení hodnoty bioimpedance. Změna bioimpedance v průběhu dechového cyklu je základem metody EIT [24–29].

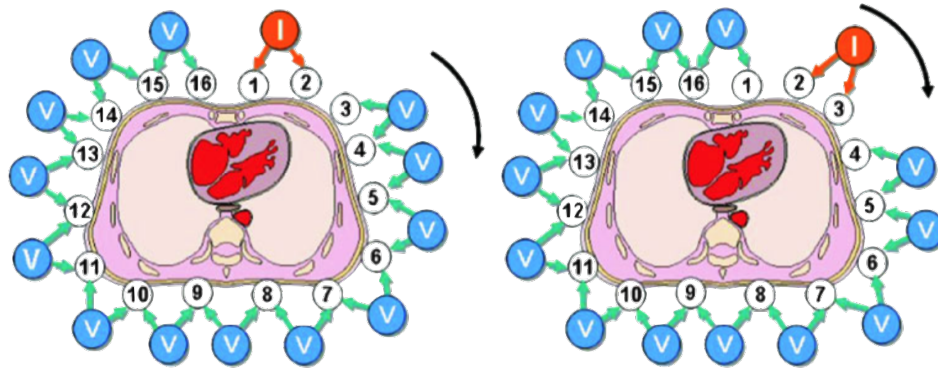
EIT systém PulmoVista 500 vyráběný firmou Dräger (Lübeck, Německo) byl navržen pro funkční monitoraci plic. V klinické praxi je využíván pro kontinuální generování snímků plic pomocí metody elektrické impedanční tomografie. PulmoVista 500 pro měření bioimpedance používá pás s 16 elektrodami, který je umístěn dle doporučení výrobce [12] do oblasti pátého mezižebří. Pro zajištění stejného potenciálu všech elektrod během měření je na břicho pacienta navíc umístěna elektroda referentní. Samotné měření napětí je realizováno metodou Neighboring. Její princip je znázorněn na Obrázku 2.1 [12, 31]. Jedním párem sousedících elektrod (na Obrázku 2.1 elektrody 1;2) je injektován střídavý proud, který se šíří skrz hrudník pacienta. Všechny ostatní elektrody jsou v tuto chvíli pasivní a slouží jako diferenční elektrody měřící napětí [24, 27, 30].

Z Ohmova zákona lze dopočítat bioimpedanci ze vztahu 2.1 dle [27]

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (2.1)$$

kde Z je bioimpedance, U napětí a I proud [27].

Po dokončení snímání napětí z pasivních elektrod je použita další dvojice sousedních elektrod (na Obrázku 2.1 elektrody 2;3) pro injektování proudu. Tento proces se opakuje dokud nebudou všechny elektrody využity jako zdroj proudu. Získání kompletních hodnot napětí po ukončení jedné celé rotace se nazývá cyklus a odpovídá jednomu snímku. Pro 16 elektrod je pro jeden cyklus potřeba získat 208 hodnot napětí [27, 30].



Obrázek 2.1: Princip měřící metody Neighboring s proudovými elektrodami 1;2 (vlevo) a proudovými elektrodami 2;3 (vpravo). Převzato z [27] a upraveno.

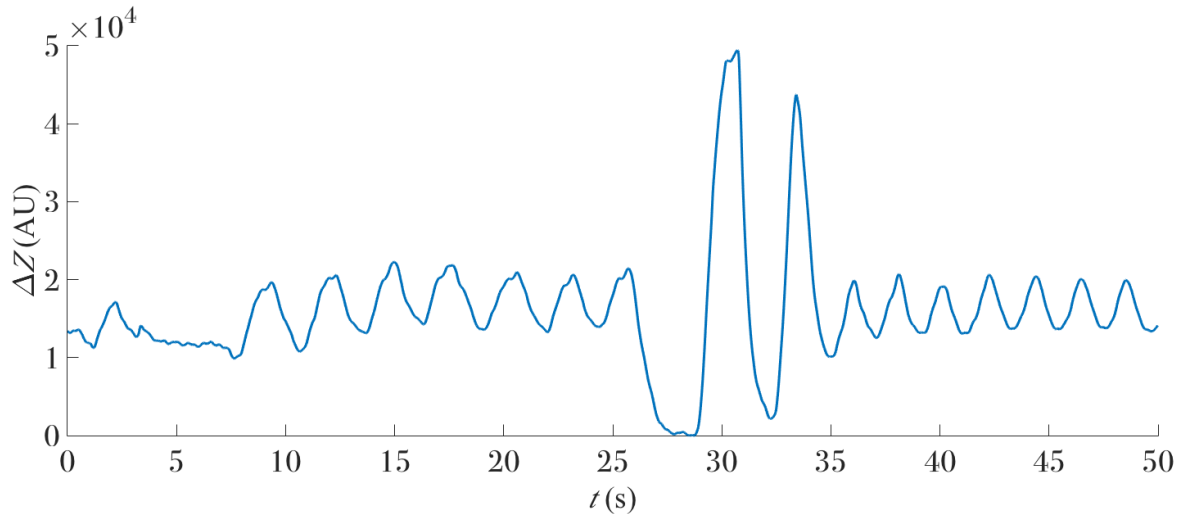
PulmoVista 500 využívá střídavý proud o velikosti nejčastěji 5 mA a frekvenci v rozsahu 80 až 130 kHz. Velikost konkrétní hodnoty výchozí frekvence je nastavována automaticky a výrobcem je deklarováno, že v tomto rozsahu nemá výběr frekvence vliv na přesnost měření [12].

EIT systém PulmoVista 500 patří mezi zástupce funkční EIT (f-EIT) a tudíž je uvažována pouze relativní změna bioimpedance ΔZ hrudníku, která má bezrozměrnou jednotku Arbitrary Units (AU). Hodnoty relativních změn bioimpedance ΔZ jsou získány normalizací hodnot absolutní bioimpedance Z . Pro 208 hodnot napětí je nalezen referenční snímek, tzv. baseline, který je reprezentován nejnižším součtem hodnot napětí. Jejich normalizací a následným použitím rekonstrukčního algoritmu založeném na metodě konečných prvků je získán snímek zobrazující regionální rozložení ΔZ v daném transversálním řezu. Právě uvažování relativní změny bioimpedance vede ke ztrátě fyzikálního rozměru, což může být nevýhoda f-EIT. Převažující výhodou této metody ale zůstává skutečnost, že nemusí být známý tvar hrudníku a přesné umístění všech

elektrod [12, 24, 27, 28].

Součtem relativních změn bioimpedance jednotlivých snímků vzniká globální křivka relativní změny bioimpedance, která bude vyhodnocována v rámci této práce [12].

Příklad průběhu globální křivky relativní změny bioimpedance ΔZ v závislosti na čase t je znázorněn na Obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Globální křivka relativní změny bioimpedance ΔZ (AU).

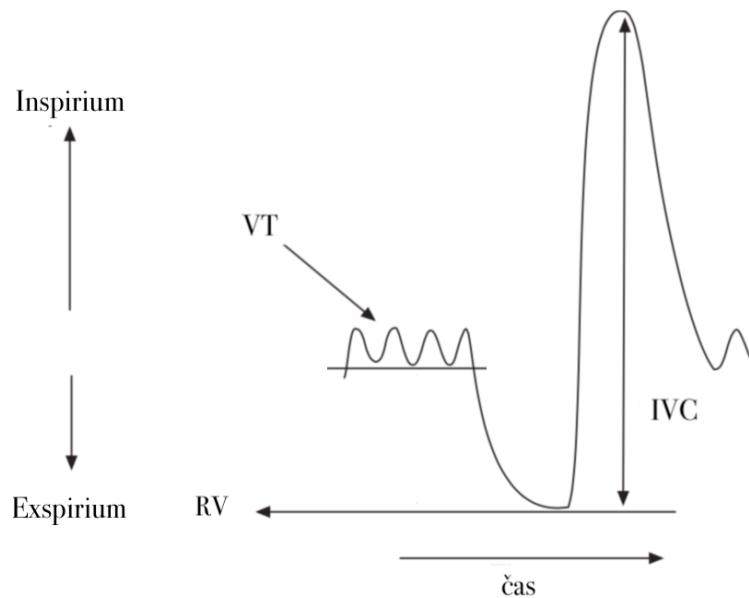
2.2 Spirometrické vyšetření

Během standardního spirometrického vyšetření jsou měřeny a vyšetřovány dva základní signály: objem a průtok. Spirometrické vyšetření umožňuje hodnotit statické i dynamické plicní objemy, plicní kapacity a průtokové rychlosti při jednotlivých fázích dechového cyklu. Požadavky na kvalitu provedení a interpretace základních funkčních vyšetření plic (PFT) jsou mezinárodně standardizovány Americkou hrudní společností (ATS-American Thoracic Society) a Evropskou respirační společností (ERS-European Respiratory Society). Tento doporučený postup přejímá i Česká pneumologická a fti-zeologická společnost a je proto závazná pro všechny laboratoře funkční diagnostiky v České republice.

Dle nejnovějších dostupných standardů ATS/ERS z roku 2005 jsou při standardním spirometrickém vyšetření vyhodnocovány následující parametry: inspirační vitální kapacita (IVC), usilovná vitální kapacita (FVC), vitální kapacita (VC), usilovně vydechnutý objem vzduchu za první sekundu (FEV_1), poměr FEV_1/FVC (tzv. Tiffeneauův index), maximální expirační průtok (PEF) a maximální průtoky vzduchu v různých úrovních usilovné vitální kapacity (MEF_{25} , MEF_{50} , MEF_{75}). Mezi statické parametry

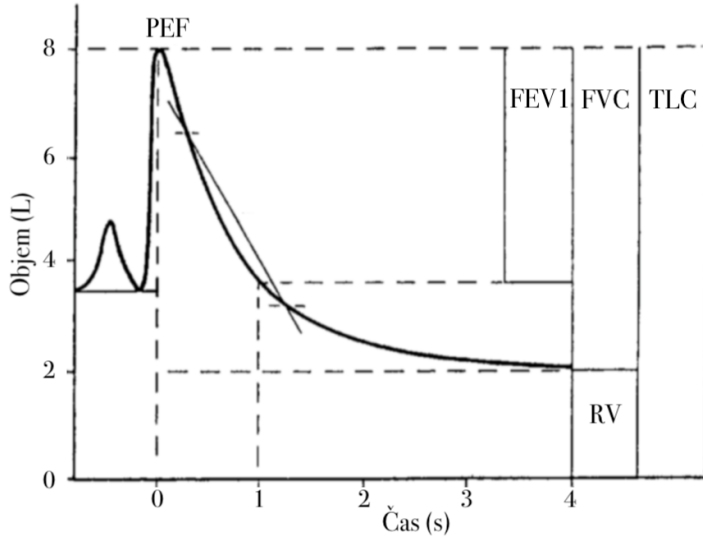
patří IVC, VC a klidový dechový objem (TV). Naopak FVC, FEV₁ a PEF patří mezi dynamické parametry plic [1, 2, 32].

Standardizované postupy ATS/ERS z roku 2005 definují VC jako objem vzduchu vyměněný respirační soustavou mezi maximálním inspiriem a maximálním expiriem. VC bývá zpravidla odvozeno z IVC, která je definována jako maximální objem inspirovaného vzduchu z maximálního expiria. TV je definován jako objem vzduchu inspirovaný nebo expirovaný během klidového dýchání. Objem vzduchu, který zůstává v plicích i po forsírovaném maximálním objemu, je nazýván reziduální objem (RV). Průběh měření dechových manévrů pro získání statických (klidových) parametrů plic IVC, VC a TV je zobrazen na Obrázku 2.3 [1, 33].

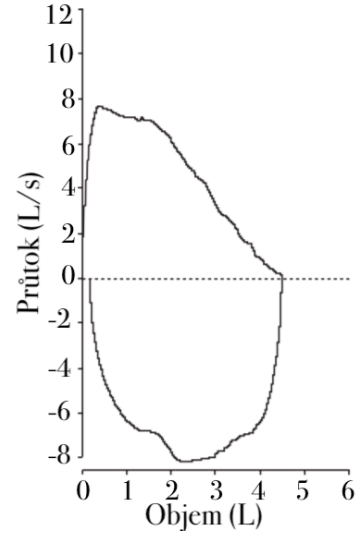


Obrázek 2.3: Průběh měření statických parametrů plic IVC, VC, TV a reziduální objem (RV) - převzato z [1] a upraveno.

Pro dynamické parametry plic FVC, FEV₁ a PEF jsou ve standardech uvedeny následující definice. FVC je maximální objem expirovaného vzduchu s maximálním úsilím po maximálním inspiriu. FEV₁ je definován jako maximální objem vzduchu expirovaného z maximálního inspira v první vteřině FVC. PEF je obvykle získáván z křivky závislosti průtok-objem a jedná se o maximální expirační průtok dosažený při maximálním forsírovaném expiriu. Průběh dechových manévrů vedoucích k těmto parametrům je zobrazen na Obrázku 2.4. Křivka závislosti průtok-objem využívaná pro výpočet PEF je zobrazena na Obrázku 2.5.



Obrázek 2.4: Průběh měření dynamických parametrů plic FVC, FEV_1 a PEF - převzato a upraveno z [34].



Obrázek 2.5: Křivka závislosti průtoku na objemu pro výpočet hodnoty PEF - převzato a upraveno z [1].

Už v roce 2010 vydala ATS/ERS dokument odpovídající na komentáře k doporučením z roku 2005. Došlo k upřesnění, zda vyhodnocovat získaná data podle FVC, VC či IVC. Dle doplnění ATS/ERS má být pro výpočet Tiffeneauova indexu použita nejvyšší hodnota z VC, IVC a FVC, protože u zdravých jedinců je rozdíl mezi těmito hodnotami minimální. Tato hodnota je označena jako VC_{max} [32, 35]. Literatura [2] dokonce uvádí pro FVC i VC naprosto totožnou definici.

V říjnu roku 2017 byl vydán nejnovější dokument [36] s rozsáhlými doporučeními jak standardizovat výsledky ze spirometrických vyšetření. Nejdůležitějším doporučením pro tuto práci je, že u standardního spirometrického vyšetření mají být vyhodnocovány pouze tři parametry: FVC, FEV_1 a Tiffeneauův index FEV_1/FVC . Tento poměr by měl být zobrazován jako desetinné číslo. Měření VC a výpočet poměru FEV_1/VC je doporučeno pouze u pacientů s podezřením na obstrukční onemocnění [36]. Například kniha [37] vydaná v roce 2014 i kniha [34] z roku 2011 už popisují vyhodnocování pouze pomocí těchto tří parametrů.

Pro spirometrická měření byly dříve používány spirometry, u kterých byl primárně měřenou veličinou objem V . Z důvodu nutnosti uzavřeného obvodu a dýchání stále stejné ventilační směsi jsou v současné době nahrazovány pneumotachografy. Pneumotachograf primárně měří objemový průtok q_V a následnou integrací je získán objem V . V klinické praxi je pro diagnostiku respiračního systému nejčastěji používán pneumo-

tachograf s diferenčním snímáním tlaku. Na základě měření difference tlaků před a za pneumatickou překážkou uvnitř duté trubice pneumotachografu je možné dopočítat objemový průtok. Mezi další možnosti jak snímat q_V patří např. ultrazvukový pneumotachograf či pneumotachograf s vyhřívaným anemometrem [37–39].

3 Metody

Tato práce je prospektivní intervenční studií, která byla schválena etickou komisí Fakulty biomedicínského inženýrství (FBMI) Českého vysokého učení technického (ČVUT) v Praze pod číslem C6/017. Na základě Žádosti o projednání výzkumného projektu v etické komisi s příloženým informovaným souhlasem a sylabem výzkumného projektu bylo obdrženo schválení (viz Přílohy A, B ,C).

3.1 Návrh studie

Před finálním návrhem studie bylo provedeno pilotní měření zahrnující tři zdravé probandy. Cílem pilotního měření bylo ověřit realizovatelnost spirometrického vyšetření pomocí EIT a naplánovat přesnou metodiku, ze které vzniknul protokol měření (viz Příloha D). Na základě dat z pilotního měření byl navržen algoritmus pro výpočet spirometrických hodnot z bioimpedanční křivky získané pomocí EIT systému PulmoVista 500.

Z důvodu účasti živých subjektů ve studii bylo nutné požádat o schválení projektu etickou komisí dokumentem Žádost o projednání výzkumného projektu v etické komisi FBMI ČVUT, které je uvedeno jako Příloha A. V rámci této žádosti byl stručně popsán cíl a průběh experimentu. Dalším dokumentem odevzdaným etické komisi byl Sylabus výzkumného projektu uvedený jako Příloha B. Zde byl blíže specifikován typ výzkumného projektu, jeho cíle a přínos do klinické praxe včetně jeho odlišností od standardního postupu. V tomto dokumentu byl též charakterizován soubor testovaných probandů a možná rizika, která jim hrozila.

Důležitým dokumentem odevzdaným etické komisi byl Informovaný souhlas, viz Příloha C. V tomto dokumentu byl proband seznámen s pracovištěm a řešitelem projektu. Dále byly popsány důvody vzniku výzkumného projektu, jeho cíle a stručné základní informace o metodě EIT. V rámci informovaného souhlasu byl proband seznámen se vstupním vyšetřením pro zjištění údajů potřebných pro spirometrii, průběhem spirometrického vyšetření a měření pomocí EIT.

Stěžejní částí Informovaného souhlasu bylo stanovení vylučovacích kritérií a zdravotních rizik pro probandy. Pro standardní spirometrické vyšetření nebyla stanovena žádná vylučovací kritéria, pro přístroj PulmoVista 500 byla uvažována vylučovací kritéria dle návodu k použití a doporučení výrobce [12, 40]. Osoba monitorovaná pomocí EIT nesměla mít kardiostimulátor, implantovaný kardioverter/defibrilátor a jiné elektricky aktivní implantáty. EIT přístroj nesměl být použit u probandů, jejichž pokožka byla v oblasti umístění elektrodového pásu jakkoliv poškozená (poraněná) nebo překrytá obvazovým materiálem. Studie se nesměli zúčastnit probandi s nekontrolovatelnými

pohyby těla a probandi s BMI větším než 50 [12, 40].

Proband byl seznámen se skutečností, že z naměřených dat nebudou vyvozovány jakékoliv závěry o jeho zdravotním stavu. V rámci dokumentu byl upozorněn, že jeho účast na experimentu byla zcela dobrovolná a bez nároku na jakoukoliv odměnu. Pokud by došlo k poškození či zhoršení zdravotního stavu probanda, náklady na odškodnění by neslo ČVUT FBMI, ale riziko bylo minimalizováno použitím nových zdravotnických přístrojů s platnou bezpečnostně technickou kontrolou (BTK) podle zákona 268/2014, které byly navíc provozovány v galvanicky izolované soustavě ZIS. Na závěr dokumentu proband podepsal prohlášení, že byl seznámen a porozuměl všemu výše uvedenému a souhlasil tím s účastí ve studii. Svým podpisem zároveň prohlásil, že nespĺňoval žádné uvedené kritérium, které by neumožňovalo jeho účast ve studii. Mimo jména a podpisu samotného probanda bylo zaznamenáno jeho datum narození a číslo, pod kterým byl proband do studie zařazen. Nesmělo chybět jméno a podpis odpovědného řešitele studie a datum podepsání jak probanda tak řešitele.

3.2 Karta probanda

Před začátkem samotného experimentu byla s každým probandem, který podepsal informovaný souhlas vyplněna karta probanda. Tento dokument je uveden jako Příloha E. Probandovi bylo přiřazeno identifikační číslo, pod kterým vystupoval v průběhu celé studie i během zpracování dat. Proband vyplnil první část dokumentu, ve které byly získány základní údaje, kterými byly jméno a příjmení, pohlaví, datum narození, místo bydliště, věk, kontakt a etnická skupina.

V další části byly do karty probanda zaznamenány antropometrické parametry, mezi které patřila váha, výška, BMI a obvod hrudníku. Kartou probanda byly zjišťovány i informace o zdravotním stavu měřeného subjektu. Pro potřeby studie byly zaznamenány informace o nemoci respirační soustavy a to jak aktuální, tak v minulosti prodělané. Proband byl tázán na další prodělaná onemocnění, která by mohla mít vliv na měřená data. V této části dokumentu proband vyplňoval, zda byl v aktuální době či dříve aktivním kuřákem a pokud byla odpověď pozitivní, byl dotázán na počet let kouření a počet cigaret za den. Z důvodu měření s přístrojem PulmoVista 500 byl zjišťován výskyt aktivních implantátů, které byly vylučovacím kritériem.

Mezi doplňující informace patřilo množství přijaté potravy za poslední dvě hodiny, čas posledního většího jídla a četnost a typ pravidelných sportovních aktivit, které proband v aktuální době provozoval. Posledním důležitým údajem byla otázka, zda proband podepsal Informovaný souhlas, bez kterého by nemohla začít realizace samotného experimentu.

3.3 Popis zkoumané skupiny

Studie byla provedena na probandech, kteří byly vybráni ze studentů FBMI ČVUT. Všichni probandi podepsali Informovaný souhlas a studie se účastnili zcela dobrovolně. Studie se zúčastnilo 22 probandů, z toho 13 mužů a 9 žen. Jeden proband mužského pohlaví a jeden ženského pohlaví uvedli, že se v době probíhání experimentu léčili s astmatem. Základní charakteristika probandů ze zkoumané skupiny je uvedena v Tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Základní charakteristika probandů.

Pohlaví	Počet probandů	Z toho kuřáků	Věk (roky)	Hmotnost (kg)	Výška (m)	BMI ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
Muži	13	3				
Ženy	9	3	23,5±1,2	70,5±12,4	174,6±9,5	23,0±2,8

Pozn.: Data jsou udávána jako průměr \pm směrodatná odchylka.

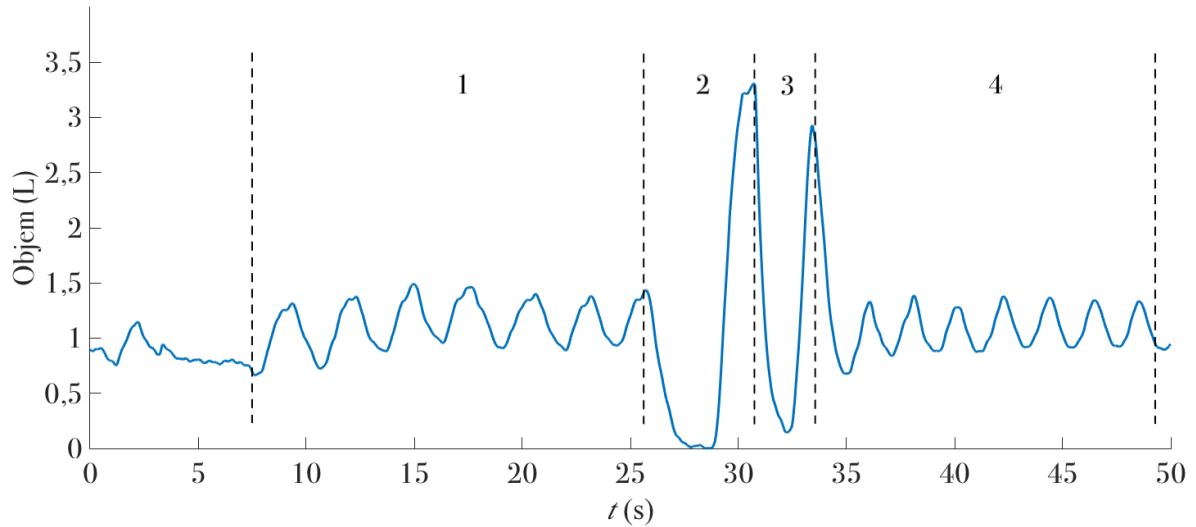
Jako současný kuřák byl určen každý proband, který během svého života vykouřil nejméně 100 cigaret, a který v době experimentu kouřil cigarety denně. Bývalý či příležitostný kuřák byl definován jako osoba, která za svůj život vykouřila nejméně 100 cigaret, ale v době experimentu denně nekouřila [41]. U mužů byl z celkového počtu tří kuřáků pouze jeden současný a zbylí dva příležitostní. U žen nebyla žádná současná kuřačka.

3.4 Popis experimentu

Experimentální měření byla realizována na FBMI ČVUT v Praze v laboratoři A108. Všechny experimenty probíhaly podle protokolu měření, které obsahovalo podrobný postup činností. Protokol měření je uveden v Příloze D.

Na základě pilotního experimentu bylo stanoveno, že se experiment bude skládat z šesti různých měření spirometrického vyšetření. Pro eliminaci rizika ovlivnění získaných výsledků probandem byla pořadí jednotlivých měření pro každého probanda randomizována. Pro každého probanda byla provedena dvě standardní spirometrická vyšetření, dvě spirometrická vyšetření realizovaná pouze pomocí EIT a dvě simultánní vyšetření s konvenčním spirometrem a EIT. Z důvodu možnosti ovlivnění dechového vzoru a následného chybného výpočtu spirometrických parametrů spirometrem bylo jedno ze standardních spirometrických vyšetření realizováno s nepřipojeným EIT pásem kolem probandova hrudníku. Mezi jednotlivými měřeními byly dodržovány pauzy minimálně pět minut, podle potřeby probanda déle.

Průběh spirometrického vyšetření byl synchronizován se standardy vydanými ATS a ERS v roce 2005 a jejich doplněním z roku 2017. V těchto dokumentech je definováno měření, výpočet a hodnocení statických a dynamických parametrů plic. Všichni probandi provedli stejné dechové manévry v následujícím pořadí: klidové spontánní dýchání, z klidového nádechu maximální výdech, maximální nádech a z něj co nejrychlejší forsírovaný maximální výdech, rychlý nádech. Na závěr probandi opět dýchali zcela spontánně. Pořadí a průběh dechových manévrů je zobrazen na Obrázku 3.1 [1, 32, 42].



Obrázek 3.1: Dechové manévry spirometrického vyšetření. 1-klidové spontánní dýchání, 2-klidný maximální výdech a maximální nádech, 3-forsírovaný maximální výdech a rychlý nádech, 4-spontánní dýchání.

Hodnota nula na svislé ose grafu na Obrázku 3.1 představuje hodnotu objemu vztáženou vůči RV. RV nelze standardním spirometrickým měřením zjistit, proto se při standardní spirometrii změřené hodnoty objemu vůči němu vztahují.

Standardní spirometrické vyšetření bylo měřeno pomocí spirometru Ergostik (Geratherm Respiratory GmbH, Německo) a spirometrické vyšetření realizované pomocí EIT bylo měřeno systémem PulmoVista 500. EIT systém PulmoVista 500 je zobrazen na Obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Přístroj PulmoVista 500. Převzato z [40].

Po zapnutí počítače byl spuštěn originální software pro spirometr Blue Cherry a po zahřátí spirometrické sondy byl spirometr připojen USB převodníkem k počítači. Zahřátí spirometrické sondy vyžadovalo alespoň 20 minut. Připojením modulu Ambistik (Geratherm Respiratory GmbH, Německo) si software Blue Cherry sám změřil hodnoty okolní teploty, tlaku a vlhkosti a zajistil jejich konverzi z podmínek okolního prostředí ATPS (teplota a tlak okolí, vzduch nasycený vodními parami) na hodnoty BTPS (teplota těla, atmosférický tlak a vzduch nasycený vodními parami). Kalibrační stříkačkou o objemu 3 L (Hans Rudolph, USA) bylo nutné provést objemovou kalibraci spirometru. Dle návodu k použití a vizuálních pokynů ze softwaru Blue Cherry byla provedena sada tahů pístem kalibrační stříkačky, nejprve tahy pomalé, pak středně rychlé a na závěr velmi rychlé [43, 44]. Na přístroji PulmoVista 500 bylo nutné provést automatickou kontrolu přístroje, tzv. Device Check [40].

Po příchodu probanda bylo důležité ujistění, že proband nejméně 1 hodinu před experimentem nekouřil, 4 hodiny nepil alkoholické nápoje a 2 hodiny nejedl větší jídlo [1]. Proband byl seznámen s průběhem experimentu a skutečností, že může kdykoliv experiment přerušit, a to i bez udání důvodu.

S probandem byla vyplněna karta probanda a do spirometrického softwaru Blue Cherry byl pomocí jména, příjmení a ID uložen jako nový pacient. Pro výpočet predikovaných spirometrických hodnot pomocí Blue Cherry bylo nutné zadat probandovo pohlaví, datum narození, výšku, váhu, etnickou skupinu a zda je/byl kuřák. Software si sám dopočítal BMI a dle matematických rovnic z antropometrických parametrů vypo-

čítal predikované hodnoty spirometrických parametrů, kterých by měl proband během měření dosáhnout [43, 44]. S probandem byl proveden nácvik spirometrického vyšetření, zvláště forsírovaných dechových manévrů. Po podepsání informovaného souhlasu mohlo začít samotné měření.

3.5 Standardní spirometrické vyšetření

Proband seznámený s průběhem vyšetření seděl ve vzpřímené klidové poloze na křesle s opěrkami a bez možnosti pohybu [4]. Na nos mu byl umístěn kolíček pro zabránění nežádoucího úniku vzduchu nosem a do úst mu byl vložen pneumotachograf s antibakteriálním filtrem. Pokud byl probandem odsouhlasen začátek experimentu, bylo v softwarovém prostředí Blue Cherry zvoleno vyšetření F/V dle průběhu na Obrázku 3.1.

V rámci standardního spirometrického vyšetření byly provedeny pro každého probanda dvě měření. Z důvodu možnosti ovlivnění dechového vzoru a následného chybného výpočtu spirometrických parametrů spirometrem bylo jedno ze standardních spirometrických vyšetření realizováno s nepřipojeným EIT pásem kolem probandova hrudníku.

Výstupem z měření byly hodnoty parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC. Společně s křivkou objem-čas byla získána i křivka průtok-objem. Měření bylo uloženo a vyexportováno jako soubor *.pdf.

Proband byl ke každé změně dechového manévru vyzván osobou provádějící měření. Tato osoba dávala instrukce na základě softwaru Blue Cherry, ve kterém byl zobrazen průběh aktuálního měření a manévry, které budou následovat. Z důvodu možného ovlivnění dechového vzoru nebylo umožněno probandovi sledovat průběh měření. Po ukončení měření byl proband do dalšího měření ponechán v klidu po dobu minimálně pěti minut.

3.6 Spirometrické vyšetření realizované pomocí EIT

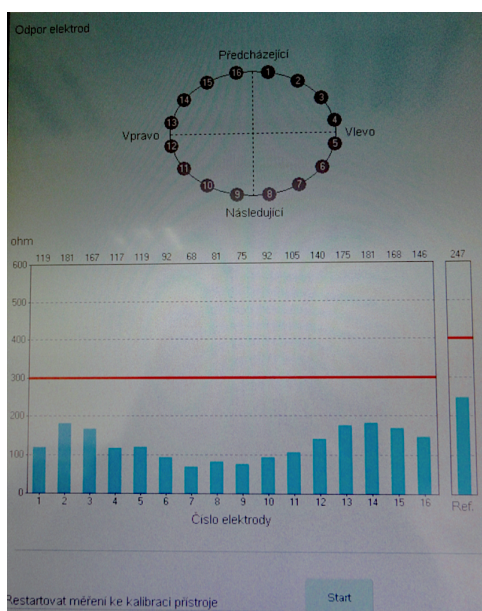
Před realizací spirometrického vyšetření pomocí EIT bylo nutné nasadit elektrodový pás kolem hrudníku probanda. Proband byl požádán o vysvěcení do půl těla a v oblasti pátého mezižebří byl změřen obvod hrudníku pomocí krejčovského metru. Na základě změřené hodnoty obvodu hrudníku byla pacientovi vybrána velikost elektrodového pásu dle Tabulky 3.2.

Tabulka 3.2: Výběr elektrodového pásu na základě změřené hodnoty obvodu hrudníku.

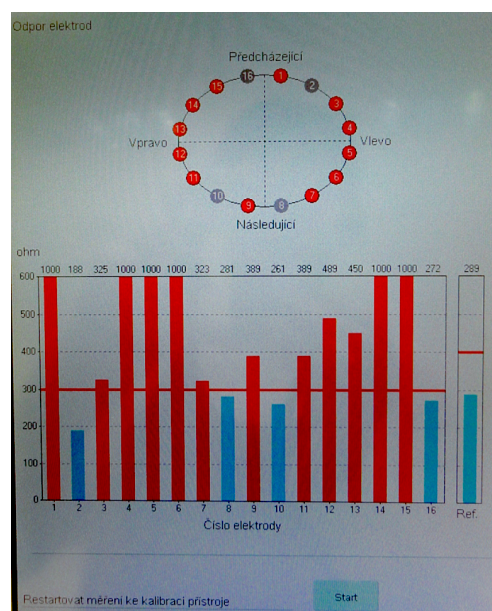
Obvod hrudníku (cm)	Barva	Velikost
70 až 85	Středně modrá	S
80 až 96	Tmavě modrá	M
92 až 110	Tmavě červená	L
106 až 127	Šedá	XL
124 až 150	Fialová	XXL

Vybraný pás byl umístěn do oblasti pátého mezižebří tak, aby obě zádové elektrody byly umístěny ve stejné vzdálenosti od páteře a výstupek na elektrodovém pásu ji kopíroval. Na břicho byla probandovi nalepena referenční elektroda.

Proband zaujal vzpřímenou polohu v sedě a byl připojen odpovídajícími kabely k přístroji PulmoVista 500. Po připojení všech elektrod byla zkontrolována kvalita signálu pásu. V případě špatného signálu z důvodu vysokého přechodového odporu mezi elektrodami byl mezi elektrodu a pokožku probanda aplikován EKG gel. Tato skutečnost byla zaznamenána do protokolu měření s údajem u jaké konkrétní elektrody se aplikace provedla. Po aplikaci EKG gelu byla kvalita signálu zkontrolována znovu. Ukázka kvalitního a nekvalitního signálu je na Obrázku 3.3 a 3.4.



Obrázek 3.3: Vyhodnocený kvalitní signál s dostatečným kontaktem.



Obrázek 3.4: Vyhodnocený nekvalitní signál s nedostatečným kontaktem.

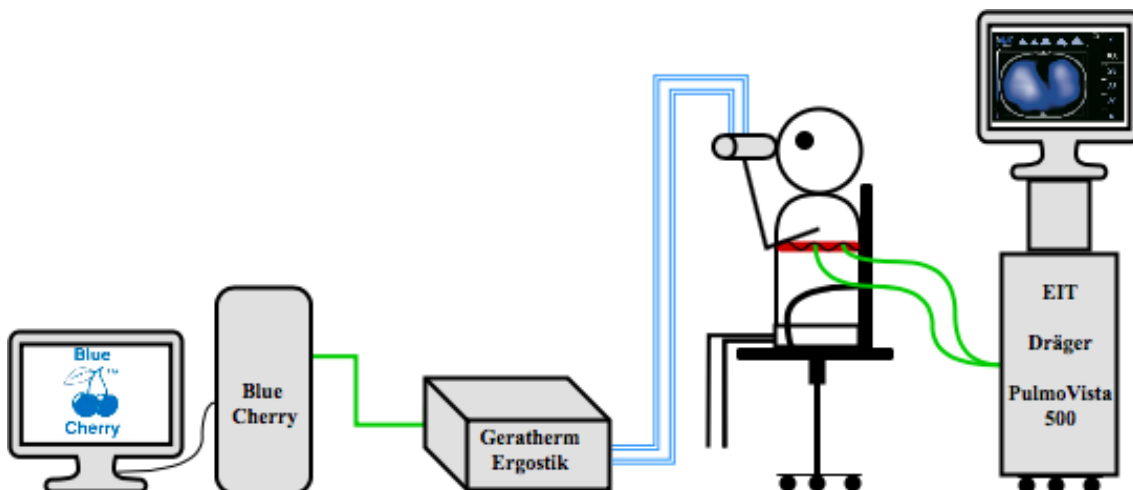
Před začátkem samotného měření byla provedena kalibrace dle pokynů výrobce [40]. Časová náročnost kalibrace byla přibližně 30 vteřin a během této doby bylo důležité, aby proband zůstal v klidu a eliminoval pohybové artefakty. Po úspěšné kalibraci byla na monitoru EIT zobrazena informace Vysoká kvalita signálu. Pokud byl proband připraven, byl mu dán kolíček na nos a začalo spirometrické vyšetření.

Na displeji EIT přístroje byla vybrána ikona Záznam a přístroj začal nahrávat měření. Pořadí jednotlivých dechových manévrů spirometrického vyšetření bylo totožné jako v případě standardního spirometrického vyšetření. Průběh vyšetření je zobrazen na Obrázku 3.1. Jedinou změnou pro probanda byla skutečnost, že dýchal bez pneumotachografu a antibakteriálního filtru, pouze s kolíčkem na nose. Po provedení definovaných dechových manévrů a vydýchání probanda bylo EIT měření pozastaveno volbou Ukončit záznam.

Výstupem měření byl EIT záznam ve formátu *.eit. Do protokolu měření bylo zaznamenáno číslo záznamu uvedené na monitoru přístroje PulmoVista 500. Po ukončení měření byl proband do dalšího měření ponechán v klidu po dobu minimálně pěti minut.

3.7 Spirometrické vyšetření realizované pomocí pneumotachografu a EIT

Před realizací simultánního měření spirometrického vyšetření pomocí pneumotachografu a EIT bylo nutné nasadit elektrodový pás kolem hrudníku probanda. Celý postup včetně výběru elektrodového pásu, jeho připojení a kontroly kvality signálu byl popsán v sekci 3.6. V případě, že se proband cítil na měření připraven, byla mu do úst vložena spirometrická sonda s antibakteriálním filtrem a na nos nasazen kolíček. Měření bylo zahájeno současným spuštěním záznamu dat ze spirometru a EIT. Uspořádání experimentu pro spirometrické vyšetření realizované kombinací pneumotachografu a EIT je zobrazeno na Obrázku 3.5



Obrázek 3.5: Uspořádání experimentu pro spirometrické vyšetření realizované simultánně se spirometrem Ergostik a EIT přístrojem PulmoVista 500 .

Během měření byly vykonávány identické dechové manévry jako v sekci 3.5 a 3.6. Vyšetřovaný proband byl instruován osobou provádějící měření o změně dechových manévry tak, aby neviděl na monitor počítače. Po ukončení měření byl na přístroji ukončen EIT záznam volbou Ukončit záznam. Spirometrické parametry získané ze standardní spirometrie byly uloženy a vyexportovány jako soubor *.pdf. Dále byla probandovi z úst vyndána spirometrická sonda a z nosu sundán kolíček. Před začátkem dalšího měření byl proband ponechán v klidu po dobu minimálně pěti minut.

3.8 Ukončení měření

Po závěrečném spirometrickém měření byla spirometrická sonda očištěna a vrácena na původní místo. Z probanda byl sejmут EIT pás, ze kterého byla odpojena soustava elektrod a samostatný pás byl očištěn a osušen. Spolu s elektrodami byl uklizen na původní místo.

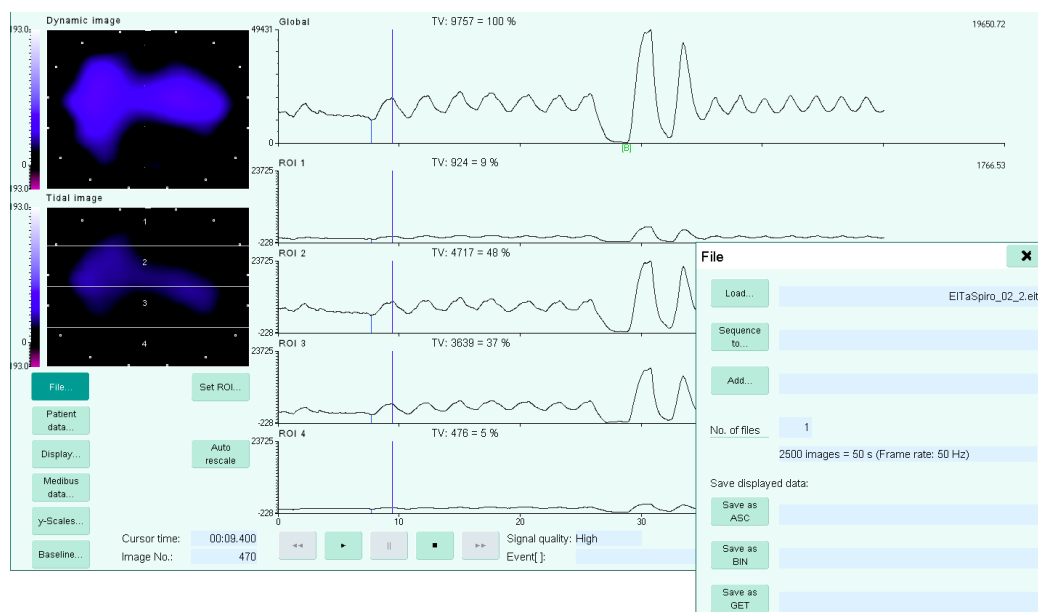
Na závěr experimentu byl proveden export a zálohování všech naměřených dat. Data ze spirometru Ergostik byla zálohována na Flash disk v uživatelském režimu. Data z EIT systému PulmoVista 500 byla zálohována na Flash disk v režimu Standby. Po vypnutí všech přístrojů, jejich uložení na příslušná místa a úklidem pracoviště do původního stavu byl experiment ukončen.

3.9 Zpracování dat z EIT

Pro každého probanda byly získány celkem čtyři EIT záznamy z nichž byly vypočítány parametry FVC, FEV₁ a Tiffeneanův index FEV₁/FVC. Tyto parametry byly vypočítány pro změřenou křivku relativní bioimpedance a pro objemovou křivku získanou z křivky bioimpedance pomocí kalibrace. Parametry byly počítány dle standardů ATS/ERS [1]. Pro každého probanda byly dále získány čtyři hodnoty parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC ze standardní spirometrie. Tyto hodnoty byly automaticky vypočítány diagnostickým softwarem Blue Cherry a nebylo třeba je nijak dále přepočítávat. Výsledky ze softwaru Blue Cherry byly po ukončení měření vyexportovány do formátu *.pdf.

Záznam z EIT systému PulmoVista 500 je možné analyzovat v softwaru Dräger Analysis Tool 6.1 (Dräger, Německo). Po nahrání měření pomocí možnosti Load byla pro všechna měření automaticky vybrána baseline s nejnižším součtem měřených napětí, tzn. i nejnižší hodnotou relativní bioimpedance v celém záznamu. Tato hodnota slouží pro normalizaci a výpočet hodnot relativní změny bioimpedance.

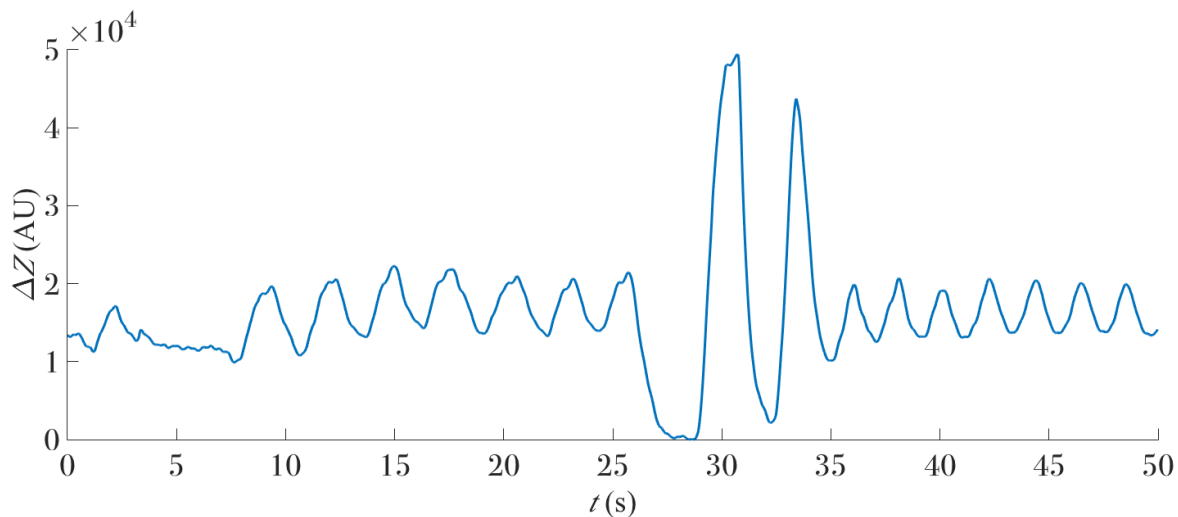
Softwarové prostředí Dräger Analysis Tool 6.1 s nahaným průběhem změny relativní bioimpedance je zobrazeno na Obrázku 3.6. Všechny záznamy byly v softwaru zkontrolovány a v případě zaznamenání výpadku signálu z důvodu špatného kontaktu elektrody s kůží probanda, bylo měření vyloučeno. Měření, která nebyla vyloučena, byla uložena do formátu *.asc.



Obrázek 3.6: Softwarové prostředí Dräger Analysis Tool 6.1 (Dräger, Německo).

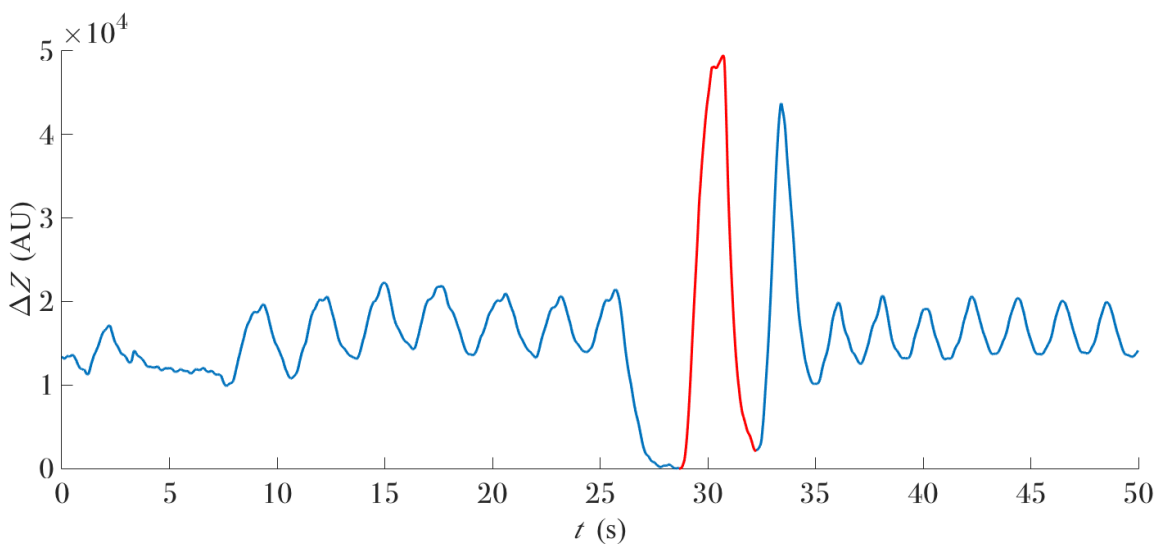
Data uložená ve formátu *.asc byla importována do programu MATLAB/Simulink (Mathworks, USA) pomocí nástroje Import data. Pro další zpracování byl vybrán pouze vektor relativní změny bioimpedance a času.

Získaná závislost relativní změny bioimpedance na čase je zobrazena na Obrázku 3.7.



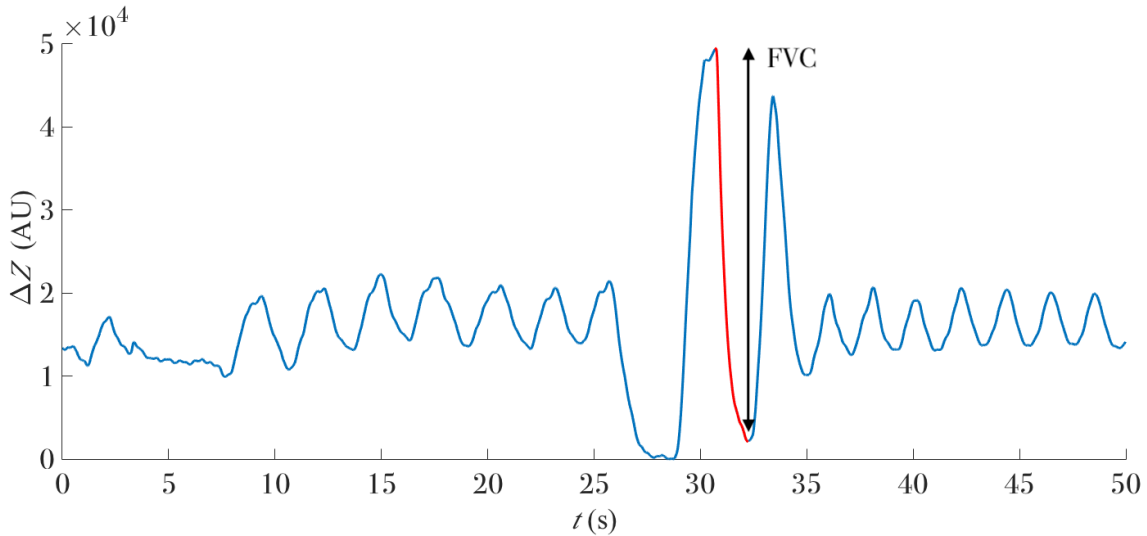
Obrázek 3.7: Závislost relativní bioimpedance ΔZ na čase t .

V souladu s definovaným průběhem spirometrického vyšetření byl dle [1, 32] vybrán pro výpočet spirometrických parametrů FVC a FEV_1 usilovný dechový manévr, jehož průběh je zobrazen na Obrázku 3.8. Vypočtené spirometrické parametry byly v jednotkách AU.



Obrázek 3.8: Dechový manévr pro výpočet spirometrických parametrů FVC a FEV_1 .

Hodnota FVC byla vypočítána jako rozdíl mezi lokálním maximem relativní změny bioimpedance během prvního maximálního nádechu a lokálním minimem relativní změny bioimpedance při prvním usilovném výdechu. Lokální maximum bylo nalezeno pomocí funkce `findpeaks`, která je standardní součástí knihovny funkcí softwaru MATLAB. Lokální minimum bylo nalezeno pomocí funkce `min`, která je také standardní součástí knihovny funkcí softwaru MATLAB. Funkce `min` byla aplikována na úsek průběhu relativní změny bioimpedance od lokálního maxima po hodnotu bioimpedance vzdálenou o 300 vzorků. Ze znalosti vzorkovací frekvence systému PulmoVista 500 $f_{sample} = 50$ Hz odpovídalo 300 vzorků šesti sekundám. Hodnota 300 vzorků byla vybrána dle [1]. Výsledek výpočtu je zobrazen na Obrázku 3.9.



Obrázek 3.9: Výpočet hodnoty FVC.

Hodnota FEV_1 byla vypočítána jako rozdíl mezi hodnotou relativní bioimpedance na začátku usilovného výdechu (na Obrázku 3.10 hodnota 1) a hodnotou relativní bioimpedance v první sekundě usilovného expiria (na Obrázku 3.10 hodnota 2). Ukázka výpočtu je zobrazena na Obrázku 3.10.

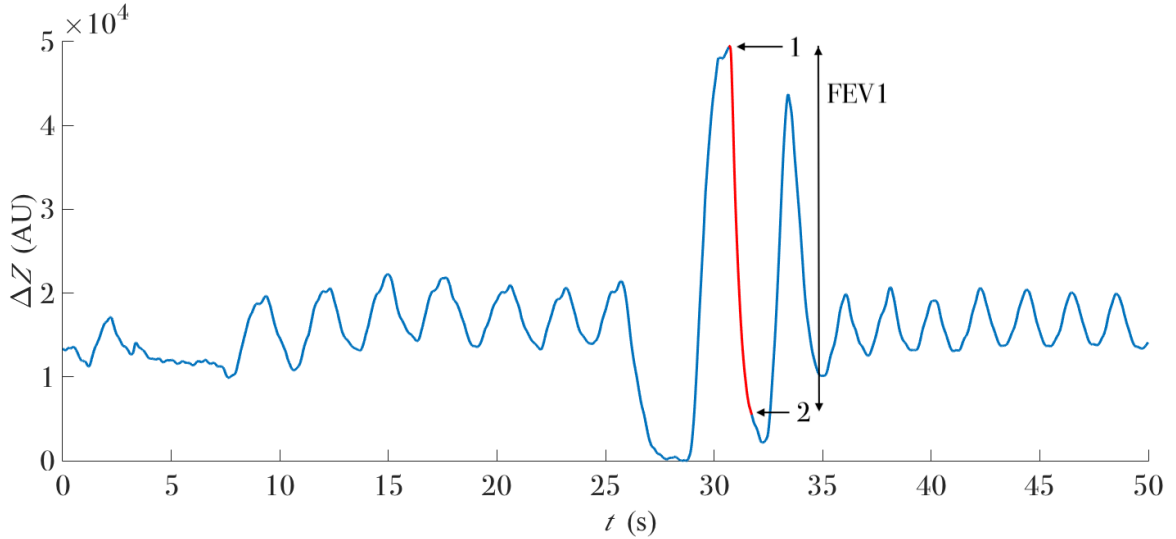
Začátek forsírovaného výdechu by měl odpovídat hodnotě lokálního maxima relativní změny bioimpedance během prvního maximálního nádechu. Z důvodu, že u některých probandů došlo ke zpoždění začátku maximálního usilovného výdechu, byla pro nalezení začátku forsírovaného výdechu použita druhá derivace relativní změny bioimpedance. Minimální hodnota druhé derivace relativní změny bioimpedance odpovídala začátku forsírovaného výdechu. Průběh relativní změny bioimpedance a její druhé derivace je zobrazen na Obrázku 3.11.

Hodnota relativní bioimpedance v první sekundě usilovného expiria byla zjištěna

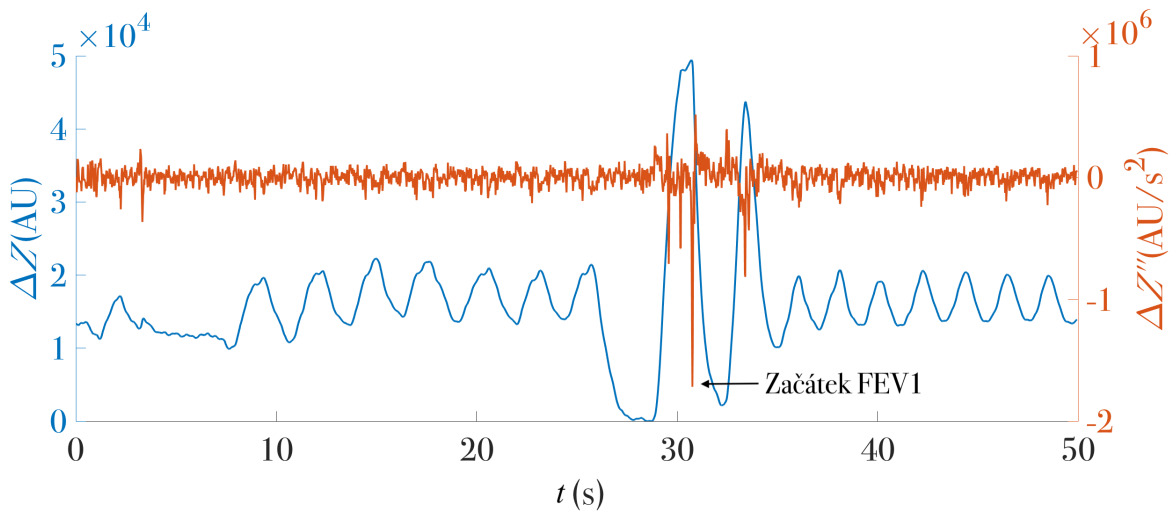
na základě definice FEV_1 [1] a vzorkovací frekvence systému PulmoVista 500. Jednalo se tedy o rozdíl hodnoty bioimpedance na začátku usilovného expira a hodnoty bioimpedance vzdálenou od začátku usilovného expira o 50 vzorků, tj. 1 sekunda.

Tiffeneauv index (TI) by vypočítán jako poměr FEV_1 a FVC [1, 32, 36] dle vztahu 3.1:

$$TI = \frac{FEV_1}{FVC} \quad (3.1)$$

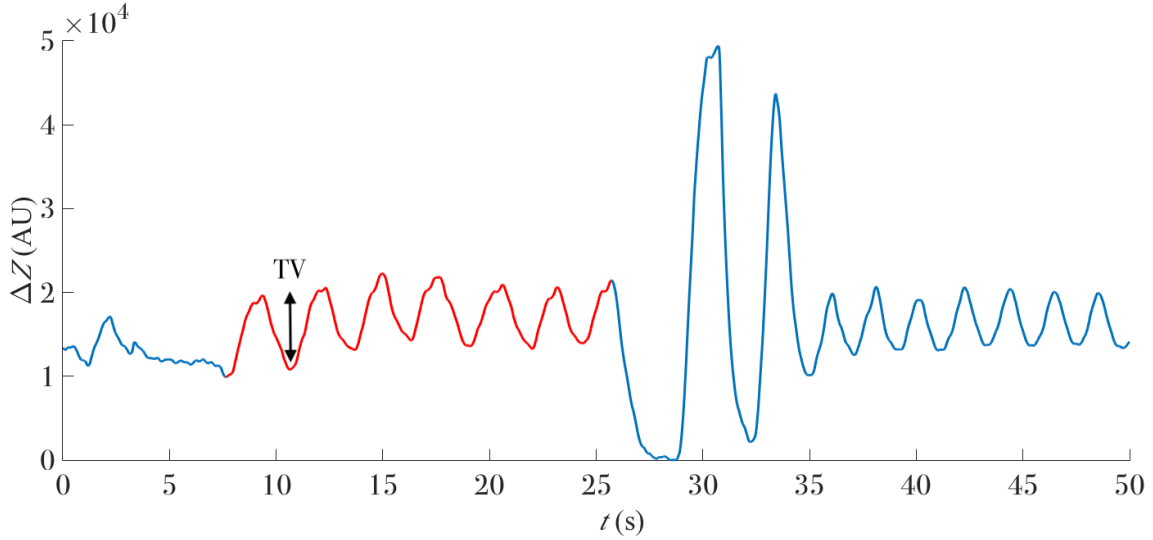


Obrázek 3.10: Výpočet hodnoty FEV_1



Obrázek 3.11: Průběh relativní změny bioimpedance (modrá barva) a její druhé derivace (oranžová barva) sloužící pro nalezení začátku usilovného expira.

Kalibrace pomocí spirometrického měření byla provedena na EIT záznamu simultánně měřeného se standardní spirometrií. Z průběhu relativní změny bioimpedance byl vybrán úsek klidového dýchání, ze kterého byla pro každý dechový cyklus vypočítána diference relativní změny bioimpedance ΔZ_{TV} určená nadechnutým objemem vzduchu. Hodnota ΔZ_{TV} byla vypočtena jako rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou relativní změny bioimpedance v daném dechovém cyklu. Výpočet je zobrazen na Obrázku 3.12.



Obrázek 3.12: Výpočet klidového dechového objemu ΔZ_{TV} .

Ze spirometru byly získány hodnoty dechových objemů TV pro jednotlivé klidové dechové cykly. Pro hodnoty TV a ΔZ_{TV} byla použitím následujícího vztahu 3.2 získána sensitivita v jednotkách L/AU. Tento výpočet byl aplikován pro všechny klidové dechové cykly:

$$sens = \frac{TV}{\Delta Z_{TV}}. \quad (3.2)$$

Pro každého probanda, byla uvažována průměrná hodnota sensitivity pro klidové dýchání $sens_{avg}$.

Hodnota $sens_{avg}$ byla použita pro přepočítání křivky relativní změny bioimpedance z jednotek AU na objem v L. To bylo provedeno podle vztahu 3.3

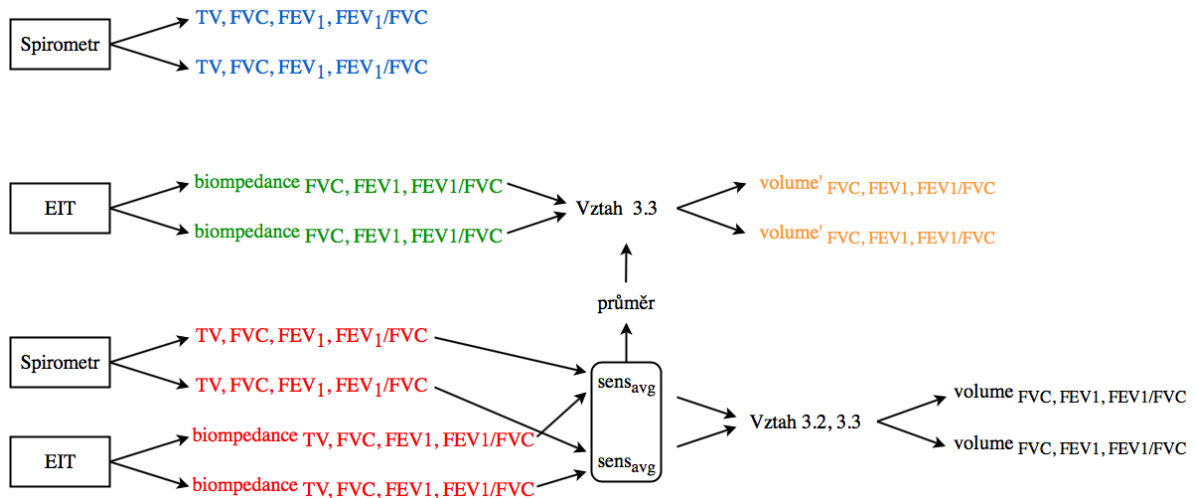
$$volume = bioimpedance \cdot sens_{avg}, \quad (3.3)$$

kde $volume$ je zpočítaný průběh změny objemu v L, $bioimpedance$ je změřený průběh

relativní změny bioimpedance v AU a $sens_{avg}$ je průměrná hodnota sensitivity v L/AU.

Pro průběh změny objemu vypočteného z bioimpedanční křivky byly vypočteny spirometrické parametry dle standardů ATS/ERS [1]. Výpočet parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC z průběhu změny objemu byl shodný s výpočtem daných parametrů z bioimpedanční křivky.

Shrnutí všech naměřených a vypočtených hodnot spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC se nachází na Obrázku 3.13, kde modrou barvou jsou označena dvě samostatná standardní spirometrická vyšetření, zelenou barvou dvě samostatná spirometrická vyšetření realizovaná pomocí EIT a červenou barvou dvě simultánní měření realizovaná oběma metodami. Oranžovou barvou jsou vyznačeny parametry ze samostatného EIT měření přepočítané pomocí $sens_{avg}$. Černou barvou jsou vyznačeny parametry vypočtené pomocí $sens_{avg}$ ze simultánního měření oběma metodami.



Obrázek 3.13: Shrnutí postupu pro statistickou analýzu dat. Modrá barva - standardní spirometrické vyšetření, zelená barva - spirometrické vyšetření realizované pomocí EIT, červená barva - simultánní měření oběma metodami, oranžová barva - vypočítané parametry ze samostatného EIT měření, černá barva - vypočítané parametry ze simultánního měření.

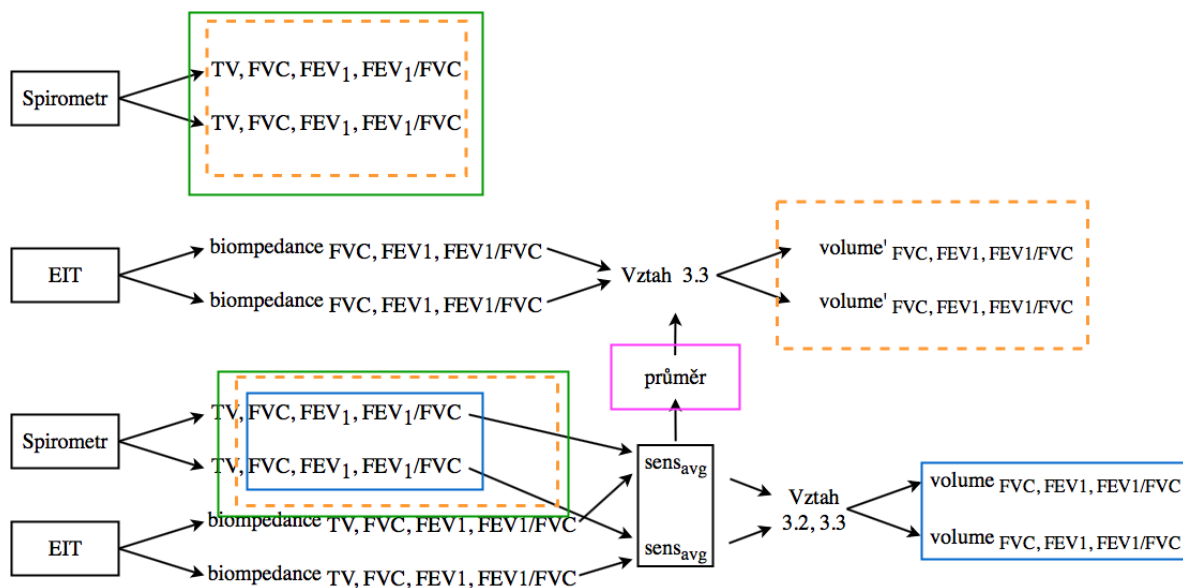
3.10 Statistická analýza zpracovaných dat

Statistická analýza dat byla provedena v programovém prostředí MATLAB. Hodnocení možnosti realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT bylo provedeno na základě porovnání spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získaných z *volume*, *bioimpedance* a ze standardního spirometrického vyšetření. Pro všechny použité statistické testy byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

Porovnávané parametry pro jednotlivá měření jsou zobrazeny na Obrázku 3.14.

Zelenou barvou je vyznačeno testování statisticky významných rozdílů mezi parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získanými ze standardního měření spirometrie s EIT pásem kolem hrudníku probanda a bez něj. Oranžovou barvou je vyznačeno testování statisticky významných rozdílů mezi parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získanými ze vzájemně oddělených měření standardní spirometrie a spirometrie realizované pomocí EIT. Modrou barvou je vyznačeno testování statisticky významných rozdílů mezi parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získanými ze simultánního měření standardní spirometrie a a spirometrie pomocí EIT. Černou barvou je vyznačeno testování statisticky významného rozdílu mezi hodnotami $sens_{avg}$ získanými při prvním a druhém simultánním měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT. Růžovou barvou je vyznačeno testování rozložení průměrné hodnoty $sens_{avg}$ pro jednotlivé probandy.

Plná čára na Obrázku 3.14 značí, že byl proveden jeden statistický test zahrnující celou skupinu probandů. V případě testování v rámci celé populace bylo možné porovnávat získané parametry mezi jednotlivými probandy. Přerušovaná čára na Obrázku 3.14 značí, že statistický test byl proveden pro každého probanda zvlášť. Testování pro každého probanda zvlášť bylo zvoleno z důvodu nemožného porovnání vypočtených parametrů v rámci celé populace.



Obrázek 3.14: Výběr získaných parametrů pro statistickou analýzu dat.

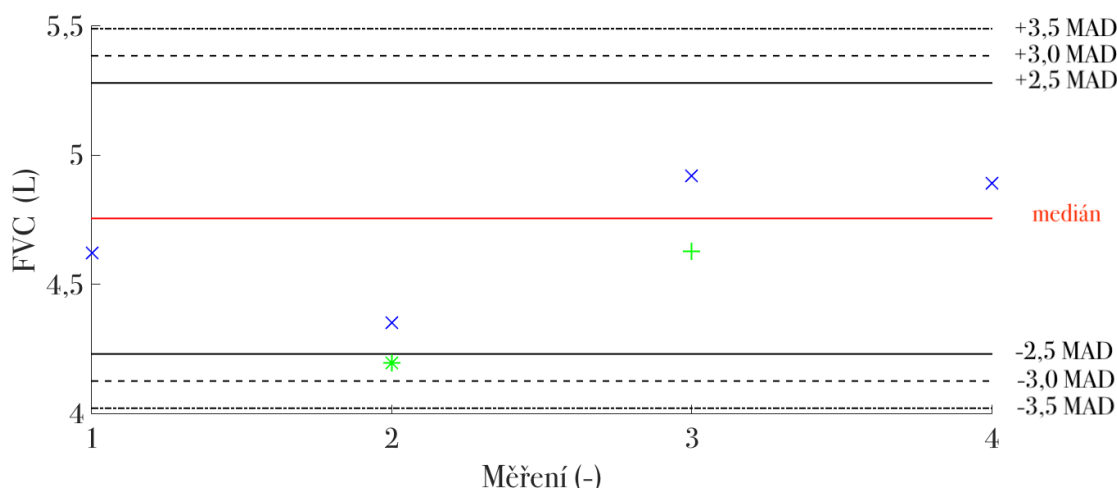
Statistické testování vlivu EIT pásu na změřené hodnoty parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC ze standardní spirometrie za přítomnosti a nepřítomnosti pásu kolem hrudníku probanda bylo provedeno na skupině všech probandů a v následujícím kroku zvlášť

pro ženy a muže. Testování bylo provedeno pomocí čtyř standardních spirometrických vyšetření (na Obrázku 3.14 označeno zelenou barvou). Pro každého probanda bylo provedeno jedno čisté standardní spirometrické vyšetření pouze s pneumotachografem a tři standardní spirometrická vyšetření s EIT pásem, z nichž jedno bylo s nepřipojeným EIT pásem a dvě byla simultánně měřena s EIT. Pro tři standardní spirometrická vyšetření s EIT pásem byl z důvodu nízkého počtu hodnot jednotlivých parametrů uvažován místo průměru medián. V případě testování všech probandů byly mediány parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC v rámci celé skupiny testovány Shapiro-Wilkovým testem normality a stejný test byl aplikován na spirometrické parametry získané ze spirometrického vyšetření bez EIT pásu. Pro testování dle pohlaví byl proveden Shapiro-Wilkův test normality zvláště pro hodnoty parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získaných od žen a od mužů. Na základě výsledků testování normality byly vybrány ve všech případech oboustranné párové t-testy. Přesný postup testování vlivu EIT pásu na naměřené hodnoty standardní spirometrie je součástí skriptu VlivPasu.m na příloženém CD.

Hodnoty statistické významnosti byly zobrazeny pomocí krabicových grafů. Medián v krabicovém grafu je označen jako červená horizontální čára a modré čáry ohraničující jednotlivé boxy značí dolní a horní kvartil (25. a 75. percentil). Svislé přerušované čáry vycházející ze střední části boxu kolmo nahoru a dolů značí hodnoty, které nejsou od horního nebo dolního kvartilu vzdáleny o více než 1,5násobek mezikvartilového rozpětí. Pokud jsou v grafu přítomny odlehlé hodnoty, nesplňující výše uvedenou podmínku, jsou označeny červenými křížky [45]. Přesné postupy pro tvorbu krabicového grafu jsou součástí skriptu boxploty.m na příloženém CD.

Pro hodnocení rozdílu parametrů získaných z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT, vyznačených na Obrázku 3.14 oranžovou přerušovanou čarou, bylo využito období Blandovy-Altmanovy analýzy, která bude popsána dále. Tu z důvodu nízkého počtu tří hodnot a nemožnosti předpokládat normální rozdělení dat nebylo možno použít. Bylo proto využito mediánu místo průměru a standardní směrodatné odchylky byly nahrazeny mediánem absolutních odchylek od mediánu (MAD) [45]. Medián a MAD byly vypočítány pomocí výsledků získaných ze všech čtyř měření standardní spirometrie. Pro hodnocení statistické významnosti rozdílů parametrů z oddělených měření bylo využito grafu, který má na svislé ose hodnotu testovaného parametru ze standardního spirometrického vyšetření (FVC, FEV₁ nebo FEV₁/FVC) v daných jednotkách. Tyto hodnoty byly označeny modrými křížky. Na vodorovné ose jsou pořadí měření standardní spirometrie. Do grafu byly vyneseny hodnoty jednotlivých parametrů vypočtených z *volume* dle vztahu 3.3 ze dvou samostatných EIT měření. Pro první samostatné EIT měření bylo využito ozna-

čení pomocí zeleného znaménka plus a pro druhé měření zelené hvězdičky. Červenou vodorovnou čarou byl označen medián ze čtyř standardních spirometrických vyšetření. Hodnocení rozdílu bylo provedeno na základě intervalu spolehlivosti s různými násobky MAD. Horizontálními černými plnými čarami byly označeny $\pm 2,5$ MAD [46], černými přerušovanými čarami $\pm 3,0$ MAD [46] a černými čerchovanými čarami $\pm 3,5$ MAD [47]. Hodnoty za intervalem spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD byly uvažovány dle [46, 47] jako odlehle hodnoty. Toto porovnání bylo provedeno pro všechny tři spirometrické parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC. Ze získaných grafů pro jednotlivé probandy bylo zjištěno, kolik bodů leží za hranicí intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD a následně kolik procent z celkového počtu bodů v rámci všech probandů leží uvnitř intervalu spolehlivosti s $\pm 3,5$ MAD. U probandů, jejichž hodnoty se nacházely uvnitř intervalu spolehlivosti s $\pm 3,5$ MAD, bylo uvažováno že mezi vzájemně oddělenými měřeními standardní spirometrie a spirometrie realizované pomocí EIT není statisticky významný rozdíl. Stejný postup byl zvolen pro hodnocení v rámci žen a mužů. Přesný postup pro tvorbu grafů s různými násobky MAD je součástí skriptu SensitivitaToVolume.m na přiloženém CD. Ukázka grafu získaného pro probanda 19 je zobrazena na Obrázku 3.15.



Obrázek 3.15: Ukázka grafu pro statistické hodnocení rozdílu parametrů získaných z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 19. Výsledky ze standardního spirometrického vyšetření jsou označeny modrými křížky, hodnota parametru vypočtená z prvního samostatného EIT měření zeleným znaménkem plus a druhého EIT měření zelenou hvězdičkou.

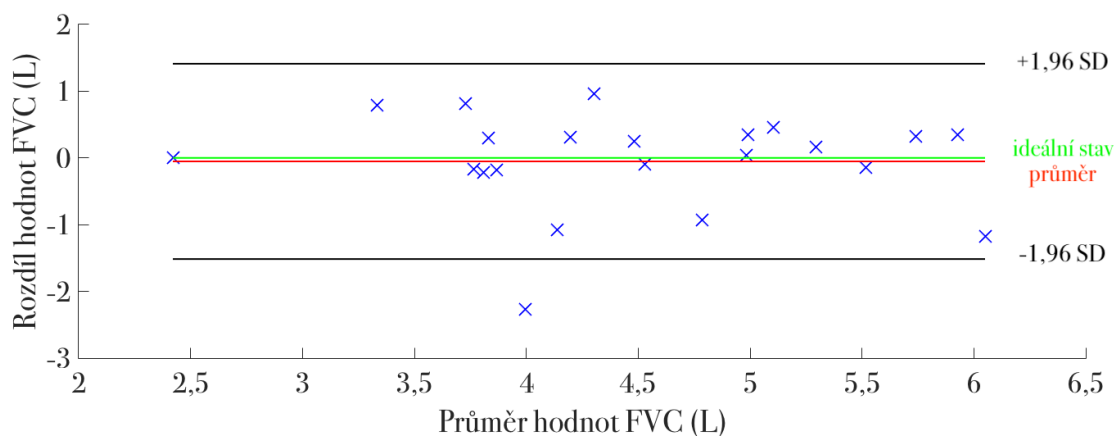
Před testováním statisticky významného rozdílu parametrů mezi výsledky ze simultánně měřeného standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření pomocí EIT (na Obrázku 3.14 označeno modrou barvou) byla provedena analýza

odlehklých hodnot. Pro získané parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC ze čtyř měření standardní spirometrie byl pro každého probanda proveden neparametrický Dixonův test odlehklých hodnot pro soubor dat s neznámým rozdělením. Hodnoty jednotlivých parametrů byly srovnány podle velikosti a pro minimální a maximální hodnotu byla vypočtena testovací kritéria Q_1 a Q_2 , která byla porovnána s kritickou hodnotou Q_{krit} na zvolené hladině významnosti $\alpha = 0,05$ [45]. Pokud byla na základě Dixonova testu vyloučena hodnota parametru simultánně měřená s EIT, byla automaticky vyloučena i odpovídající hodnota parametru vypočtená z *volume*. Přesný výpočet Dixonova testu odlehklých hodnot je součástí skriptu *volumeVSspiro.m* na přiloženém CD.

Po detekci odlehklých hodnot byly ze dvou simultánních měření EIT a standardní spirometrie vypočteny průměrné hodnoty parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získaných z *volume* a spirometru (na Obrázku 3.14 označené modrou čarou). Pro výběr statistického testu byly vypočtené průměrné hodnoty parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC testovány Shapiro-Wilkovým testem normality. Pro testování statisticky významného rozdílu mezi výsledky ze standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT, byl na základě výsledků testování normality pro parametry FVC a FEV₁ vybrán oboustranný párový t-test. Pro parametr FEV₁/FVC byl využit oboustranný Wilcoxonův test pro dva výběry. Hodnoty statistické významnosti byly zobrazeny pomocí krabicových grafů popsaných výše.

Statistická významnost rozdílu hodnot získaných ze simultánního měření standardní spirometrie a hodnot vypočtených z bioimpedanční křivky (na Obrázku 3.14 označené modrou čarou) v rámci všech probandů byla také hodnocena pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy a rozdílového grafu [48–51]. Tato analýza byla následně provedena i pro jednotlivá pohlaví. Wilcoxonův test testuje hypotézu, že data z párových měření pocházejí z rozdělení se stejným mediánem. Párový t-test testuje hypotézu, že rozdíl středních hodnot párových měření je nulový, nicméně bylo interpretováno, že nesignifikantní výsledek nemusí vždy znamenat shodu metod [48]. Důvodem může být ovlivnění průměru extrémními hodnotami či rozložení rozdílů mezi metodami [48]. Z toho důvodu, byla také pro jednotlivé parametry simultánního měření standardní spirometrie a EIT provedena analýza dle Blanda-Altmana. Podmínkou této analýzy je normální rozdělení rozdílů mezi průměrnými hodnotami měření oběma metodami [49]. Rozdíly mezi průměrnými hodnotami jednotlivých parametrů FVC, FEV₁ i FEV₁/FVC byly testovány Shapiro-Wilkovým testem normality s výsledkem o normálním rozdělení. Výsledkem této analýzy byl tzv. rozdílový graf, který má na svislé ose rozdíl mezi průměrnými hodnotami ze standardního spirometrického vyšetření a průměrnými hodnotami *volume* dopočítanými z bioimpedanční křivky. Na vodorovné ose jsou průměrné

hodnoty z obou metod měření. Do rozdílového grafu byla přidána vodorovná zelená čára, která odpovídala nulovému rozdílu, tzn. ideálnímu stavu. Pro lepší interpretaci výsledků byla do grafu přidána vodorovná červená čára průměrného rozdílu a hranice intervalu spolehlivosti. Hranice intervalu spolehlivosti byly zvoleny jako $\pm 1,96$ násobek směrodatné odchylky (SD) a byly vyznačeny jako černé čáry. Násobek $\pm 1,96$ SD platí pro normální rozdělení rozdílů a odpovídá tzv. limitu shody, konfidenčnímu intervalu jednotlivých rozdílů mezi oběma metodami. Pokud by byly metody rovnocenné, průměrný rozdíl hodnot získaný oběma metodami by byl nulový. Posuzována byla vzdálenost průměrné chyby od ideálního stavu, šířka pásma mezi limity shody a počet hodnot, které byly mimo limit shody. Pro normální rozdělení průměrů by mělo ležet více jak 95 % hodnot uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 1,96$ SD, což znamená že rozdíl mezi jednotlivými metodami je statisticky nevýznamný [48, 50, 51]. Příklad rozdílového grafu je zobrazen na Obrázku 3.16. Přesný postup pro tvorbu rozdílového grafu je součástí skriptu `volumeVSspiro.m` na přiloženém CD.



Obrázek 3.16: Rozdílový graf získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy.

Testování statisticky významného rozdílu mezi výsledky ze simultánního měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT bylo provedeno i pro jednotlivá pohlaví. Pro spirometrické parametry FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC pro oddělená pohlaví byl proveden Shapiro-Wilkův test normality a následně oboustranné párové t-testy. V rámci jednotlivých pohlaví byla provedena Blandova-Altmanova analýza pro spirometrické hodnoty FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC.

Testování statisticky významného rozdílu mezi hodnotami $sens_{avg}$ z prvního a druhého simultánního měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření pomocí EIT (na Obrázku 3.14 označené černou čarou) bylo provedeno na základě Shapiro-Wilkova testu normality a následného oboustranného párového t-testu.

Hodnoty $sens_{avg}$ ze souboru dat všech probandů, na Obrázku 3.14 růžově, byly uvedeny pomocí bodového grafu, který má na svislé ose hodnoty $sens_{avg}$ a jejich průměrné hodnoty. Na vodorovné ose byla postupně vynášena čísla označení jednotlivých probandů. Vypočtené hodnoty $sens_{avg}$ ze dvou simultánních měření spirometrie a EIT a jejich průměr byly pro každého probanda vyneseny do bodového grafu. Přesný postup tvorby bodového grafu je součástí skriptu `impVSspiroVSvolume.m` na příloženém CD.

Kalibrační konstanta $sens_{avg}$, získaná ze dvou simultánních měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT, byla dále použita pro přepočítání *bioimpedance* dle vztahu 3.3 na *volume*. Z důvodu uvažování $sens_{avg}$ byl testován vztah mezi touto konstantou a měřenými objemy. Vztah mezi FVC a FEV_1 a konstantou $sens_{avg}$ byl testován lineární regresní analýzou pomocí funkce `regstats` a `fitlm`, které jsou standardní součástí knihovny funkcí softwaru MATLAB. Parametr FEV_1/FVC je pouze lineární kombinací parametrů FEV_1 a FVC, proto pro něj nebyla provedena regresní analýza. Důvodem byla nemožnost následné interpretace výsledků. Ze dvou simultánních měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT byla pro každého probanda vypočtena průměrná hodnota $sens_{avg}$. Pro soubor dat průměrných hodnot $sens_{avg}$ v rámci všech probandů byl proveden Shapiro-Wilkův test normality. Stejným testem byla testována normalita parametrů FVC a FEV_1 . Pomocí metody nejmenších čtverců byl proveden bodový odhad regresních koeficientů a a b . Koeficient a je absolutní člen a slouží k odhadu závisle proměnné *bioimpedance* při nulové hodnotě parametru FVC a FEV_1 . Koeficient b určuje směrnici přímky. Vhodnost a verifikace odhadnutého lineárního modelu byla hodnocena na základě koeficientu determinace R^2 a hodnotě statistické významnosti celkového F -testu. F -test testuje hypotézu, zda hodnota závisle proměnné *bioimpedance* závisí lineárně na parametrech FVC a FEV_1 . Statistické testování bylo provedeno na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ [45, 52–54].

4 Výsledky

Během studie bylo vždy dvakrát provedeno experimentální měření standardní spirometrie, spirometrické vyšetření realizované pomocí EIT a simultánní měření oběma metodami na 22 probandech (13 mužů a 9 žen). Data ze všech měření byla zpracována a následně statisticky vyhodnocena. Z výsledků standardního spirometrického vyšetření nebyla vyloučena žádná data. V případě samostatného spirometrického vyšetření pomocí EIT bylo vyloučeno jedno měření u čtyř různých probandů. Při simultánním měření EIT se standardní spirometrií bylo u jednoho probanda vyloučeno jedno měření. U probandů, u kterých došlo k vyloučení měření, byla místo průměrné hodnoty ze dvou měření použita pouze hodnota z nevyloučeného měření. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty byly pro každého probanda vyneseny do tabulek. Ukázka naměřených a vypočtených hodnot pro probanda 01 je zobrazena v Tabulce 4.1. Tabulky pro zbylých 21 probandů je možné nalézt v Příloze F.

Tabulka 4.1: Naměřené a vypočítané hodnoty ze všech měření pro probanda 01.

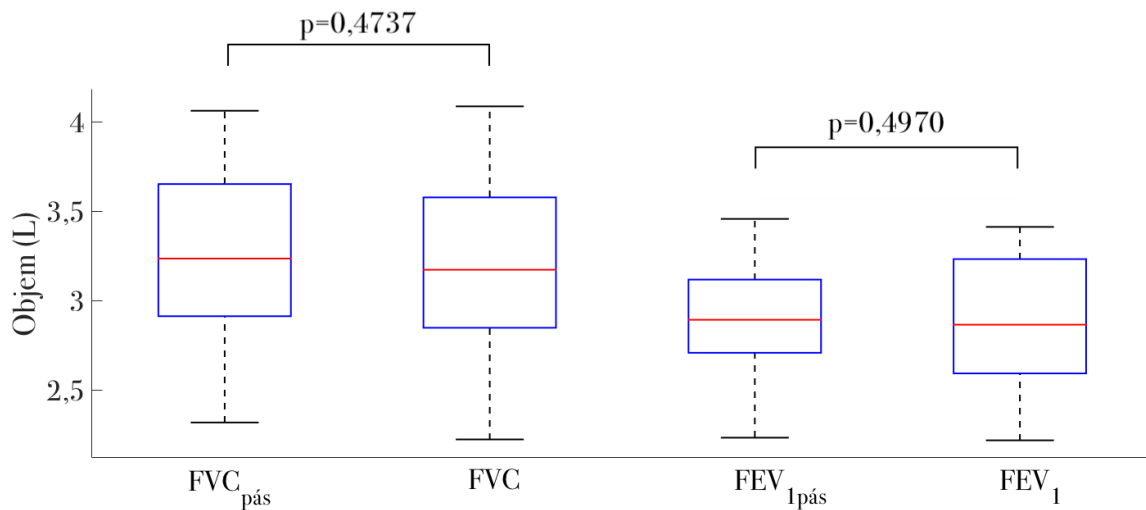
Proband 01	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,51
	FEV ₁	-	-	4,28
	TI	-	-	0,95
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,07
	FEV ₁	-	-	4,41
	TI	-	-	0,87
EIT	FVC	$4,47 \cdot 10^4$	3,81	-
	FEV ₁	$4,10 \cdot 10^4$	3,46	-
	TI	0,91	0,91	-
EIT	FVC	$4,51 \cdot 10^4$	3,85	-
	FEV ₁	$3,81 \cdot 10^4$	3,25	-
	TI	0,84	0,84	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,73 \cdot 10^4$	3,17	4,61
	FEV ₁	$4,39 \cdot 10^4$	2,94	4,16
	TI	0,93	0,93	0,90
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,32 \cdot 10^4$	4,47	4,96
	FEV ₁	$3,92 \cdot 10^4$	4,06	4,34
	TI	0,91	0,91	0,88
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$0,67 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,04 \cdot 10^{-4}$		

V následujících podkapitolách jsou shrnuty výsledky jednotlivých kroků, které vedly k zhodnocení možnosti realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT.

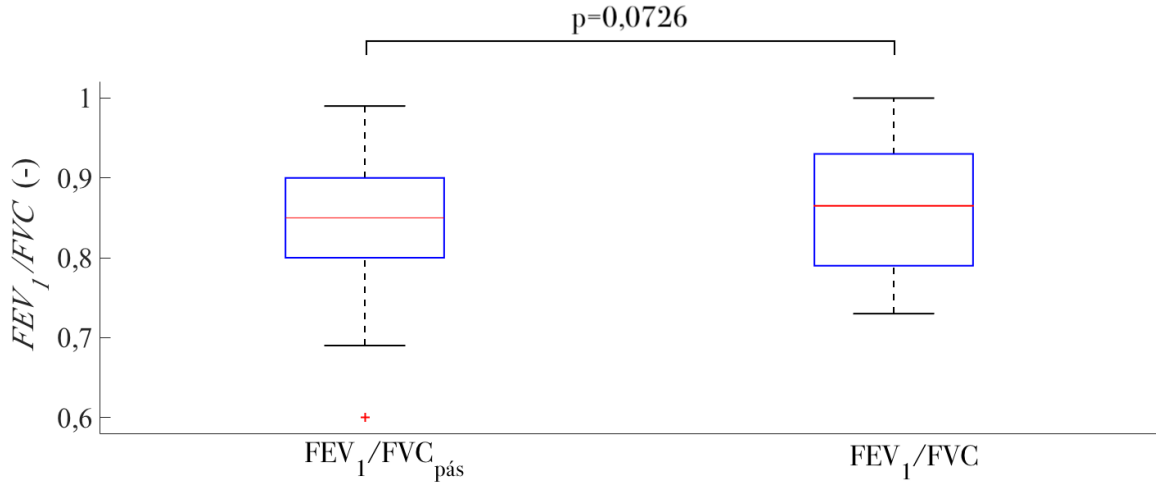
4.1 Vliv EIT pásu na výsledky ze standardního spirometrického vyšetření

Pro testování statisticky významného rozdílu mezi hodnotami parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC získaných ze standardního spirometrického vyšetření s přítomností a nepřítomností EIT pásu na hrudníku probanda (na Obrázku 3.14 vyznačeno zelenou barvou) byly na základě pozitivních výsledků testu normality parametru FVC ($p_{spiro_{pás}} = 0,8935$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,8658$), FEV₁ ($p_{spiro_{pás}} = 0,6926$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,2735$) i FEV₁/FVC ($p_{spiro_{pás}} = 0,2374$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,4829$) vybrány oboustranné párové t-testy.

Testováním spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC oboustranným párovým t-testem nebyl ani u jednoho parametru prokázán statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$). Hodnoty statistické významnosti FVC a FEV₁ jsou uvedeny na Obrázku 4.1 a FEV₁/FVC na Obrázku 4.2.

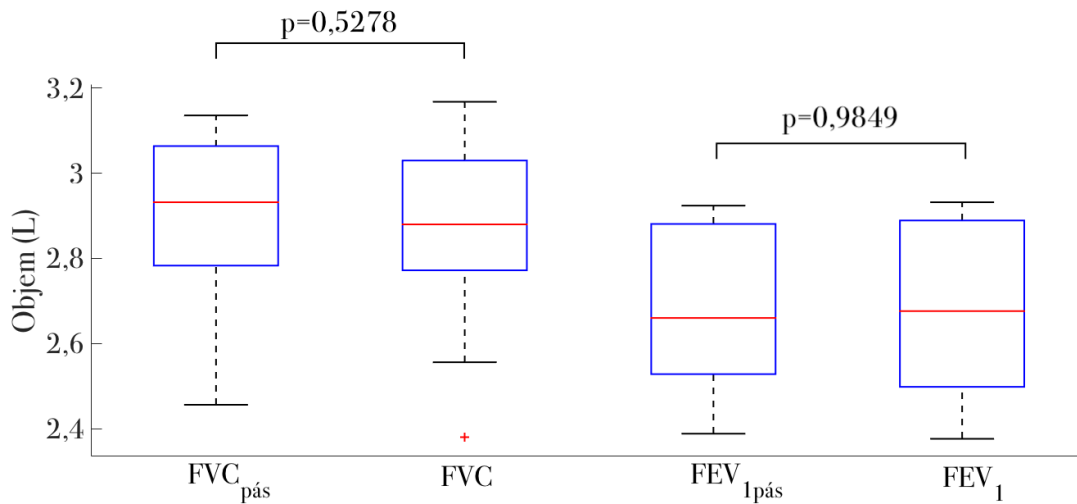


Obrázek 4.1: Porovnání parametrů FVC a FEV₁ získaných ze standardní spirometrie měřené s a bez EIT pásu.

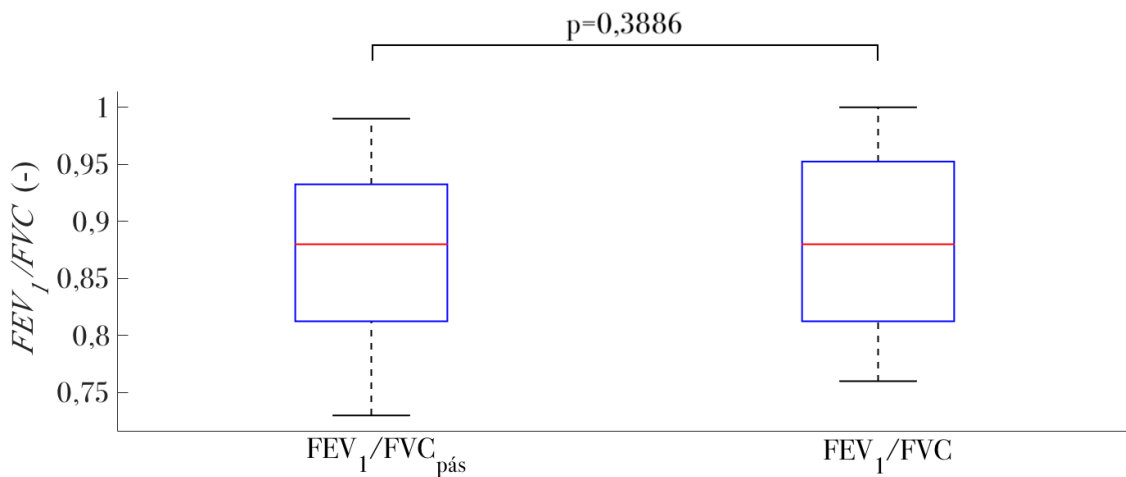


Obrázek 4.2: Porovnání parametru FEV_1/FVC získaného ze standardní spirometrie měřené s a bez EIT pásu.

Testování statisticky významného rozdílu mezi standardním spirometrickým vyšetřením za přítomnosti a nepřítomnosti EIT pásu bylo provedeno i pro jednotlivá pohlaví. Na základě Shapiro-Wilkova testu bylo u žen potvrzeno normální rozdělení parametru FVC ($p_{spiro_{pás}} = 0,1222$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,3046$), FEV_1 ($p_{spiro_{pás}} = 0,2721$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,1757$) i FEV_1/FVC ($p_{spiro_{pás}} = 0,9774$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,7293$). Pomocí oboustranného párového t-testu nebyl prokázán statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$) mezi hodnotami parametrů získaných ze standardního spirometrického vyšetření za přítomnosti a nepřítomnosti EIT pásu. Hodnoty statistické významnosti FVC a FEV_1 jsou zobrazeny na Obrázku 4.3 a FEV_1/FVC na Obrázku 4.4.

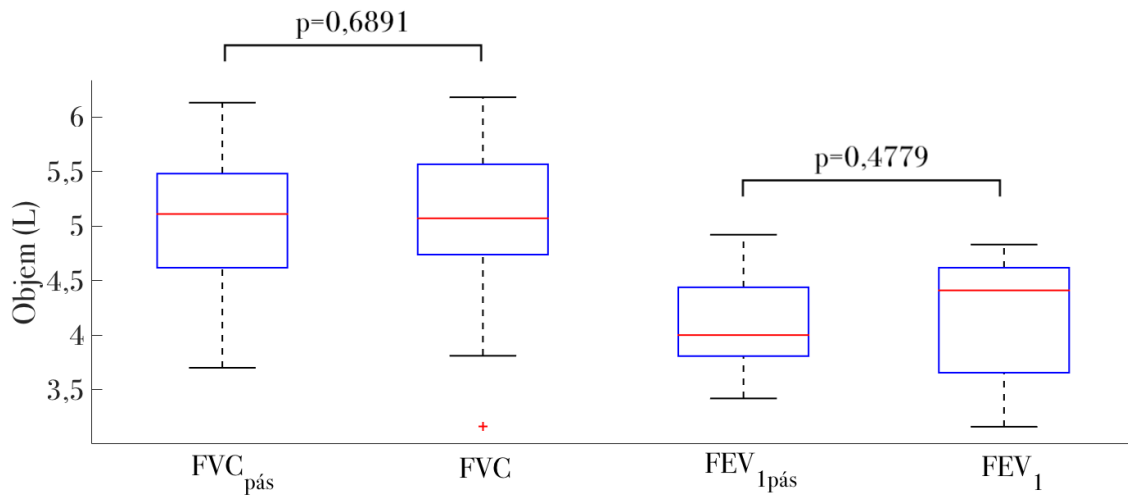


Obrázek 4.3: Porovnání parametrů FVC a FEV₁ získaných ze standardní spirometrie měřené s a bez EIT pásu u probandů ženského pohlaví.

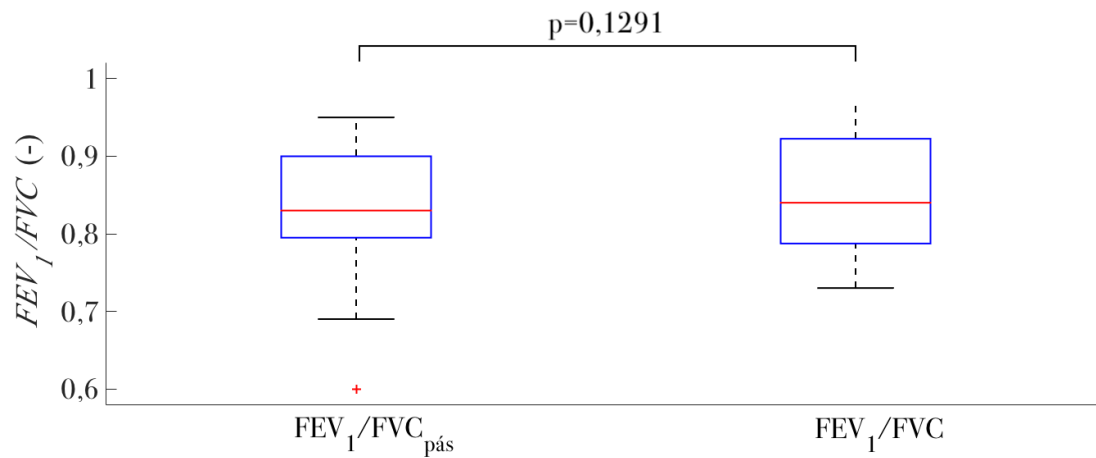


Obrázek 4.4: Porovnání parametr FEV₁ /FVC získaného ze standardní spirometrie měřené s a bez EIT pásu u probandů ženského pohlaví.

U probandů mužského pohlaví byly získány hodnoty statistické významnosti pro parametr FVC ($p_{spiro_{pás}} = 0,9568$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,2912$), FEV₁ ($p_{spiro_{pás}} = 0,8041$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,1159$) a FEV₁/FVC ($p_{spiro_{pás}} = 0,1969$ a $p_{spiro_{bez}} = 0,9228$). Pomocí oboustranného párového t-testu nebyl prokázán statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$) mezi hodnotami parametrů získaných ze standardního spirometrického vyšetření za přítomnosti a nepřítomnosti EIT pásu. Hodnoty statistické významnosti FVC a FEV₁ jsou zobrazeny na Obrázku 4.5 a FEV₁/FVC na Obrázku 4.6.



Obrázek 4.5: Porovnání parametrů FVC a FEV₁ získaných ze standardní spirometrie měřené s a bez EIT pásu u probandů mužského pohlaví.

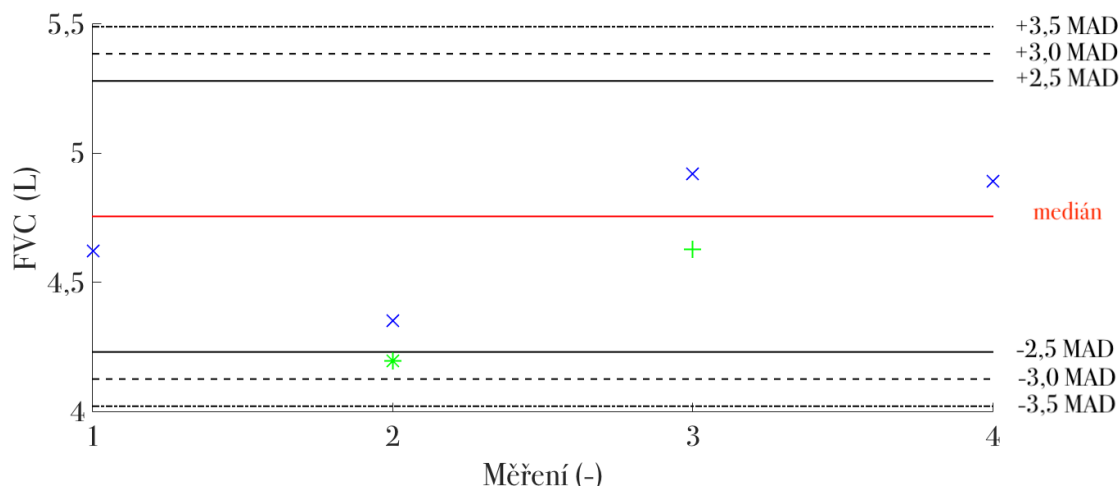


Obrázek 4.6: Porovnání parametr FEV₁ /FVC získaného ze standardní spirometrie měřené s a bez EIT pásu u probandů mužského pohlaví.

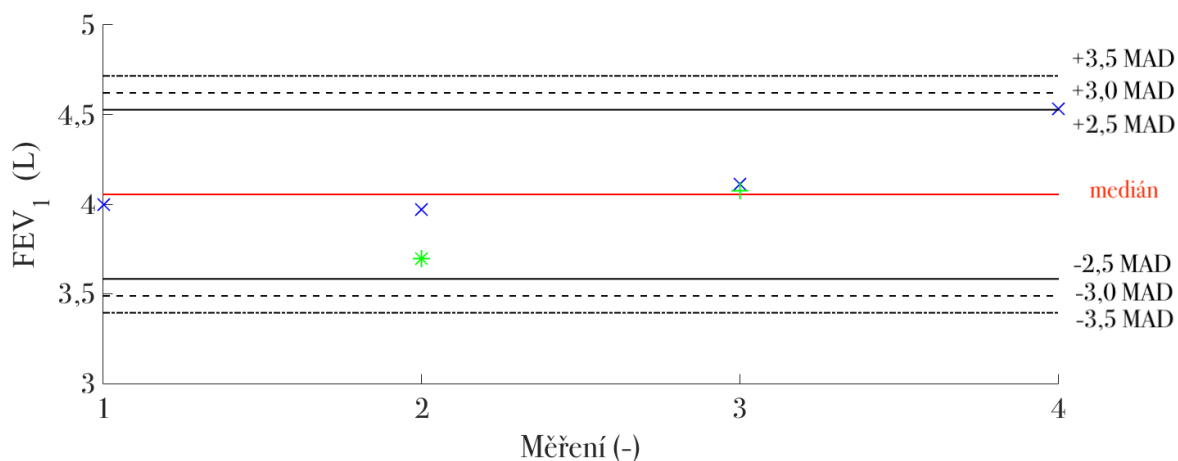
4.2 Oddělené měření EIT a standardní spirometrie

Hodnocení spirometrických parametrů získaných z oddělených měření EIT a standardní spirometrie bylo provedeno pro každého probanda zvlášť, na základě kalibrační konstanty $sens_{avg}$ získané během simultánního měření. Pro statistické hodnocení jednotlivých parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC pro každého probanda bylo využito mediánů ze všech standardních spirometrických vyšetření a násobky MAD. Příklad výsledného

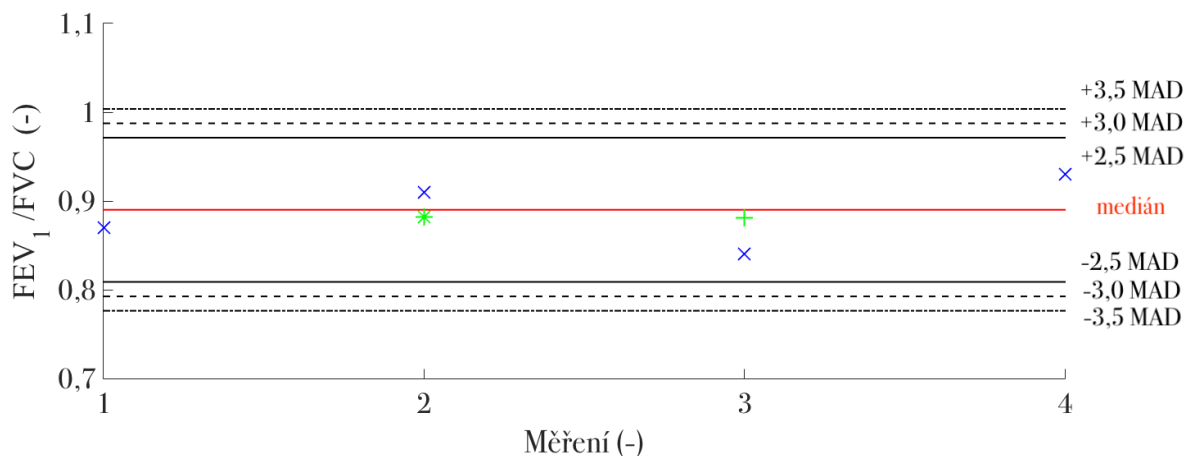
grafu probanda 19 pro parametr FVC je zobrazen na Obrázku 4.7, FEV₁ na Obrázku 4.8 a FEV₁/FVC na Obrázku 4.9. Grafy pro zbylých 21 probandů je možné nalézt v příloze G.



Obrázek 4.7: Graf rozdílu parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie (modré křížky) a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT. První EIT měření je označeno zelenou hvězdičkou, druhé měření zeleným znaménkem plus.



Obrázek 4.8: Graf rozdílu parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie (modré křížky) a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT. První EIT měření je označeno zelenou hvězdičkou, druhé měření zeleným znaménkem plus.



Obrázek 4.9: Graf rozdílu parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie (modré křížky) a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT. První EIT měření je označeno zelenou hvězdičkou, druhé měření zeleným znaménkem plus.

Pro parametr FVC a FEV_1 v rámci všech probandů leželo 43 % všech hodnot uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD a pro FEV_1/FVC 50 % všech hodnot $\pm 3,5$ MAD. Následně bylo provedeno hodnocení dle pohlaví. Výsledky jsou zobrazeny v Tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Výsledky z grafů vytvořených pro jednotlivé probandy hodnocené v rámci celé populace.

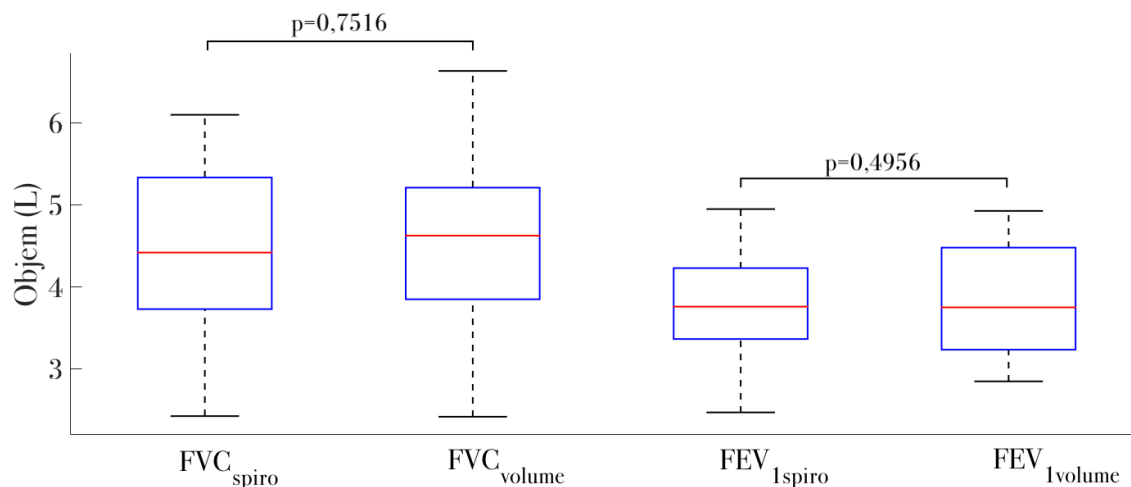
Parametr	Skupina	$\pm 3,5$ MAD (-)	$>3,5$ MAD (-)	Σ	$\pm 3,5$ MAD (% z Σ)
FVC	Muži + ženy	17	23	40	43
	Muži	11	11	22	50
	Ženy	6	12	18	33
FEV_1	Muži + ženy	17	23	40	43
	Muži	10	12	22	45
	Ženy	7	11	18	39
FEV_1/FVC	Muži + ženy	20	20	40	50
	Muži	13	9	22	60
	Ženy	7	11	18	39

4.3 Simultánní měření EIT a standardní spirometrie

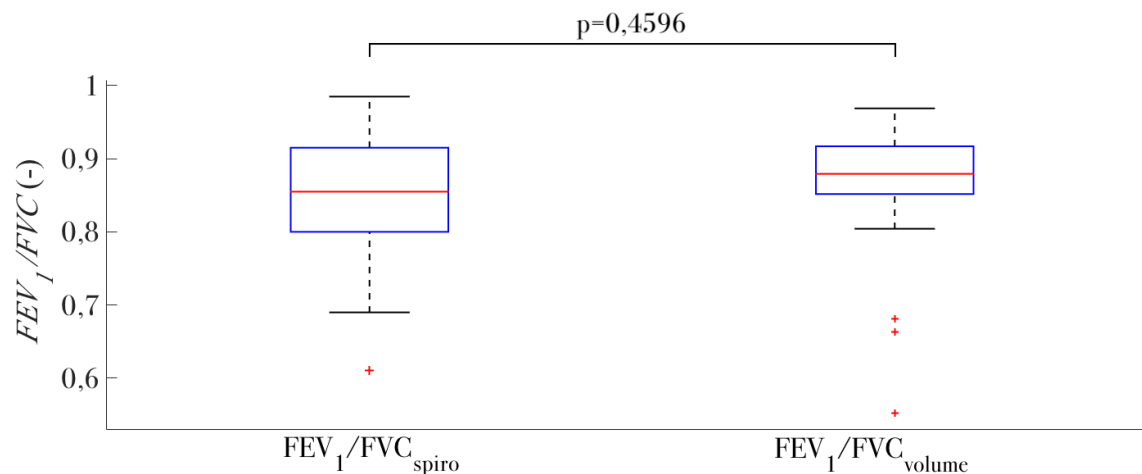
Pro testování statisticky významného rozdílu mezi výsledky ze simultánního měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT, vyznačených na Obrázku 3.14 modře, byl na základě pozitivních výsledků testování normality pro parametry FVC ($p_{spiro} = 0,7997$ a $p_{volume} = 0,9936$) a FEV_1 ($p_{spiro} = 0,7872$ a

$p_{volume} = 0,0597$) vybrán oboustranný párový t-test. Pro parametr FEV_1/FVC , u kterého nebylo potvrzeno normální rozdělení, byl využit oboustranný Wilcoxonův test pro dva výběry ($p_{spiro} = 0,2791$ a $p_{volume} = 6,6114 \cdot 10^{-4}$, nebylo potvrzeno normální rozdělení).

Testováním parametrů FVC a FEV_1 oboustranným párovým t-testem a parametru FEV_1/FVC Wilcoxonovým testem nebyl ani u jednoho parametru prokázán statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$). Hodnoty statistické významnosti FVC a FEV_1 jsou uvedeny na Obrázku 4.10. Hodnota statistické významnosti FEV_1/FVC je uvedena na Obrázku 4.11.

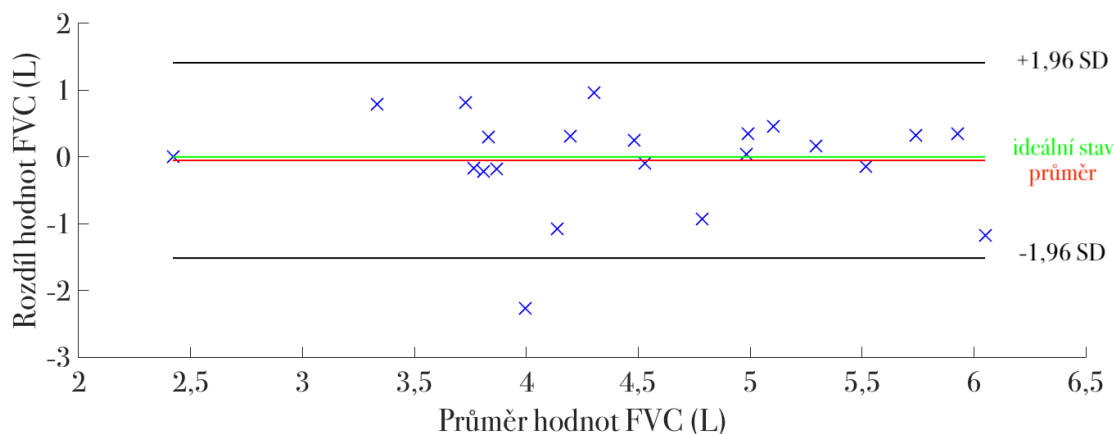


Obrázek 4.10: Porovnání parametrů FVC a FEV_1 vypočtených z průběhu *volume* a spirometru a jejich statistické hodnocení pomocí t-testu.

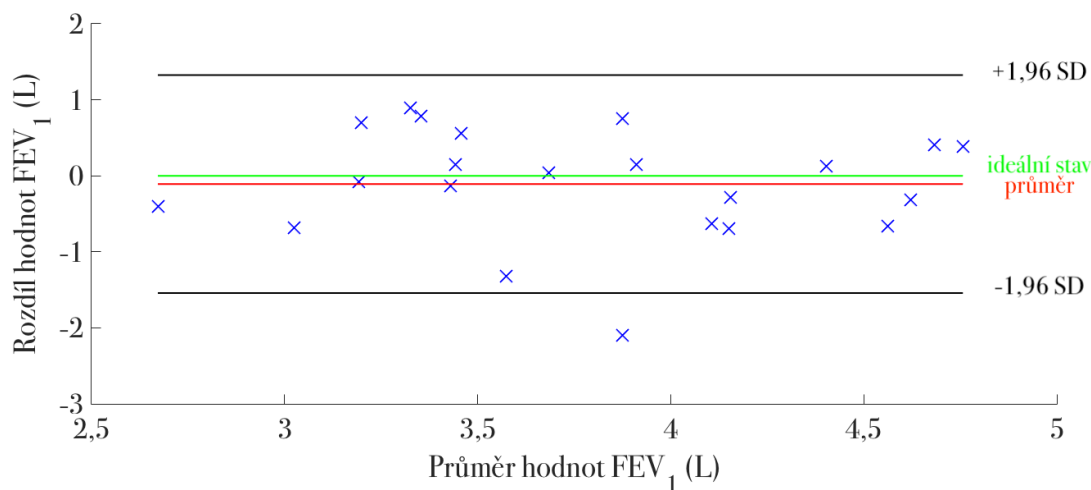


Obrázek 4.11: Porovnání parametru FEV_1/FVC vypočteným z průběhu *volume* a spirometru a jejich statistické hodnocení pomocí Wilcoxonova testu.

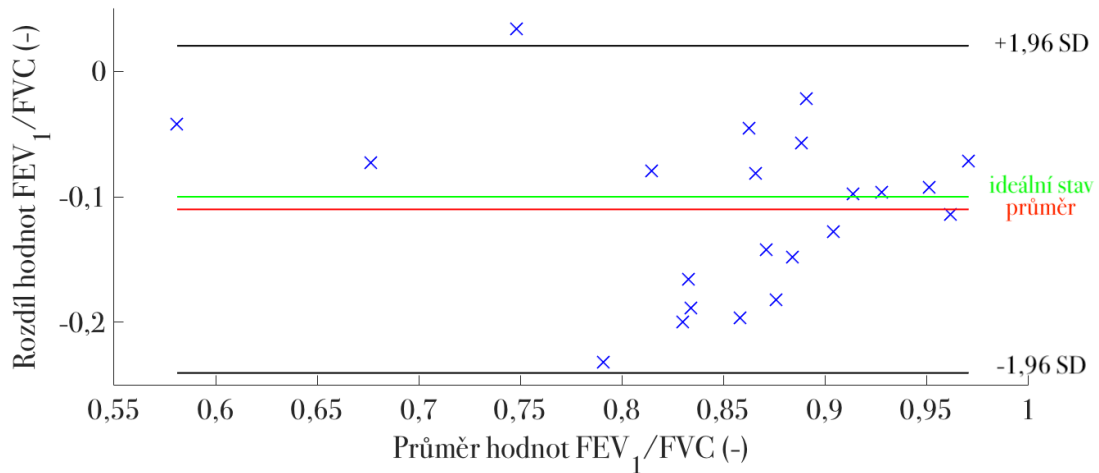
Pomocí Shapiro-Wilkova testu bylo potvrzeno normální rozdělení rozdílů mezi průměrnými hodnotami jednotlivých parametrů FVC a FEV₁ a FEV₁/FVC ($p_{diffFVC} = 0,0729$, $p_{diffFEV_1} = 0,1291$) a ($p_{diffFEV_1/FVC} = 0,9043$). Významnost rozdílů hodnot získaných ze standardního spirometru a hodnot vypočtených z bioimpedanční křivky byla provedena na základě rozdílového grafu. Pro parametr FVC je rozdílový graf na Obrázku 4.12, pro parametr FEV₁ na Obrázku 4.13 a pro FEV₁/FVC na Obrázku 4.14.



Obrázek 4.12: Rozdílový graf získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FVC.

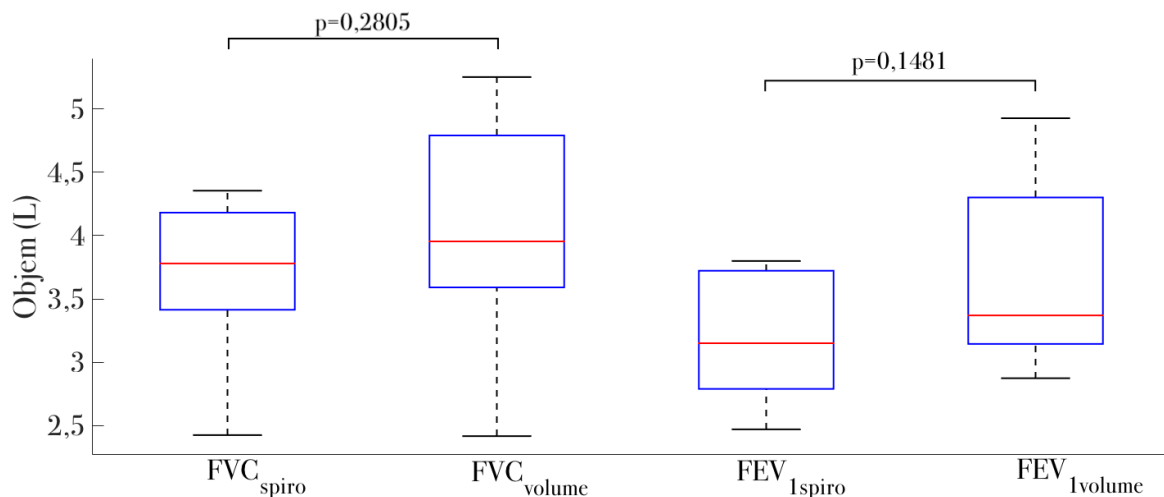


Obrázek 4.13: Rozdílový graf získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FEV₁.

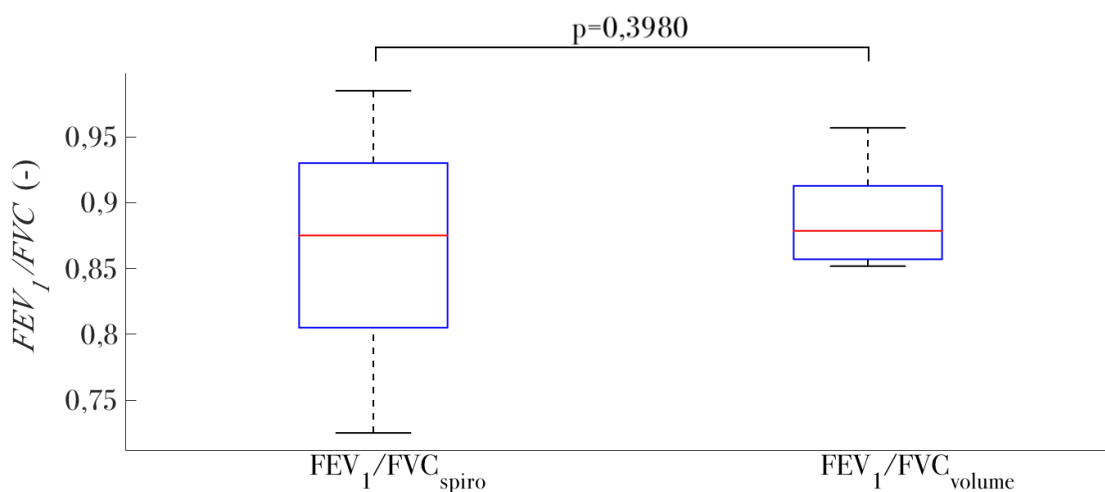


Obrázek 4.14: Rozdílový graf získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FEV_1/FVC .

Testování statisticky významného rozdílu mezi výsledky ze simultánního měření standardní spirometrie a vyšetření realizovaného pomocí EIT bylo provedeno dále i pro jednotlivá pohlaví. Na základě Shapiro-Wilkova testu bylo u žen potvrzeno normální rozdělení parametru FVC ($p_{spiro} = 0,1809$, $p_{volume} = 0,7301$), FEV_1 ($p_{spiro} = 0,2789$, $p_{volume} = 0,3245$) a FEV_1/FVC ($p_{spiro} = 0,8895$, $p_{volume} = 0,2709$). Oboustrannými párovými t-testy nebyl prokázán u žen statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$) mezi hodnotami parametrů získaných ze simultánního měření standardní spirometrie a vypočtených z *volume*. Hodnoty statistické významnosti FVC a FEV_1 jsou zobrazeny na Obrázku 4.15 a FEV_1/FVC na Obrázku 4.16.

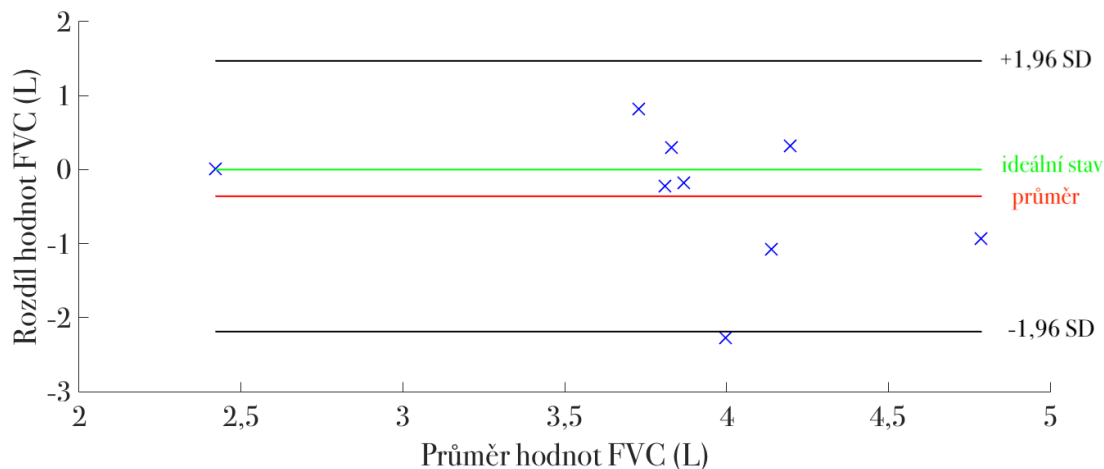


Obrázek 4.15: Porovnání parametrů FVC a FEV₁ vypočtených z průběhu *volume* a spirometru a jejich statistické hodnocení pomocí t-testů pro ženy.

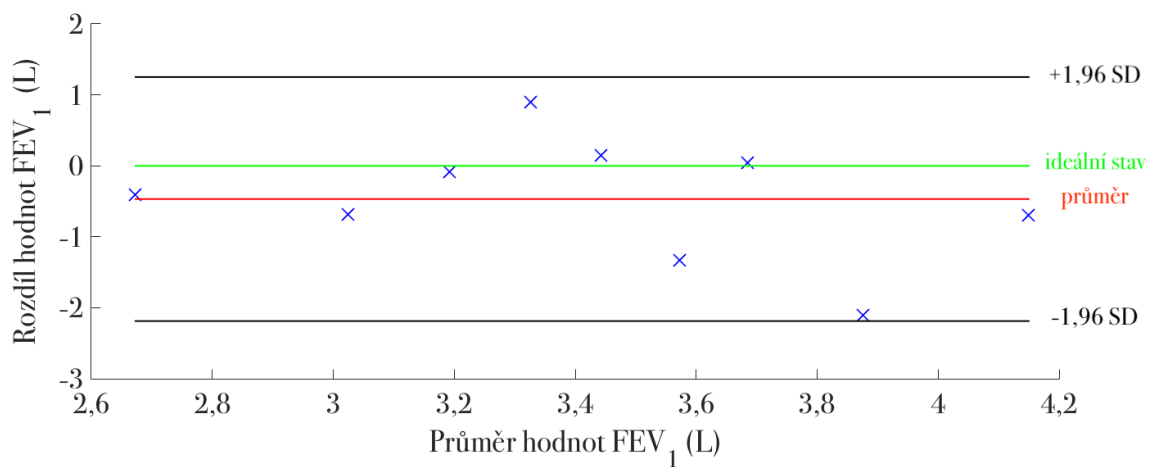


Obrázek 4.16: Porovnání parametru FEV₁/FVC vypočteného z průběhu *volume* a spirometru a statistické hodnocení pomocí t-testu pro ženy.

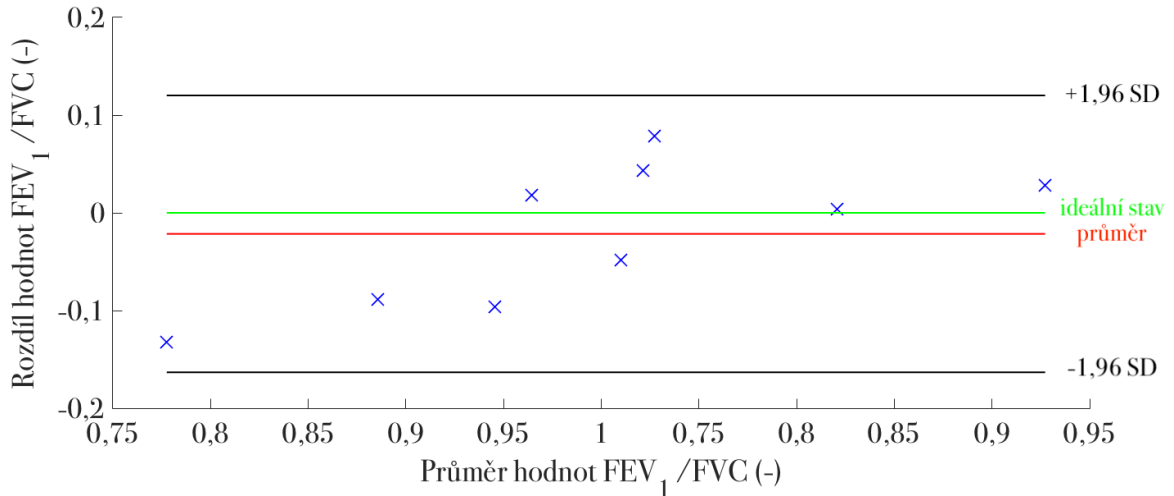
Pomocí Shapiro-Wilkova testu bylo u žen potvrzeno normální rozdělení rozdílů mezi průměrnými hodnotami jednotlivých parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC ($p_{diffFVC} = 0,4182$, $p_{diffFEV_1} = 0,9117$) a ($p_{diffFEV_1/FVC} = 0,5981$). Významnost rozdílů hodnot parametrů ze standardního spirometrického vyšetření a hodnot vypočtených z *volume* byla provedena na základě rozdílového grafu. Rozdílový graf probandů ženského pohlaví pro parametr FVC je zobrazen na Obrázku 4.17, FEV₁ na Obrázku 4.18 a FEV₁/FVC na Obrázku 4.19.



Obrázek 4.17: Rozdílový graf pro ženské pohlaví získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FVC.

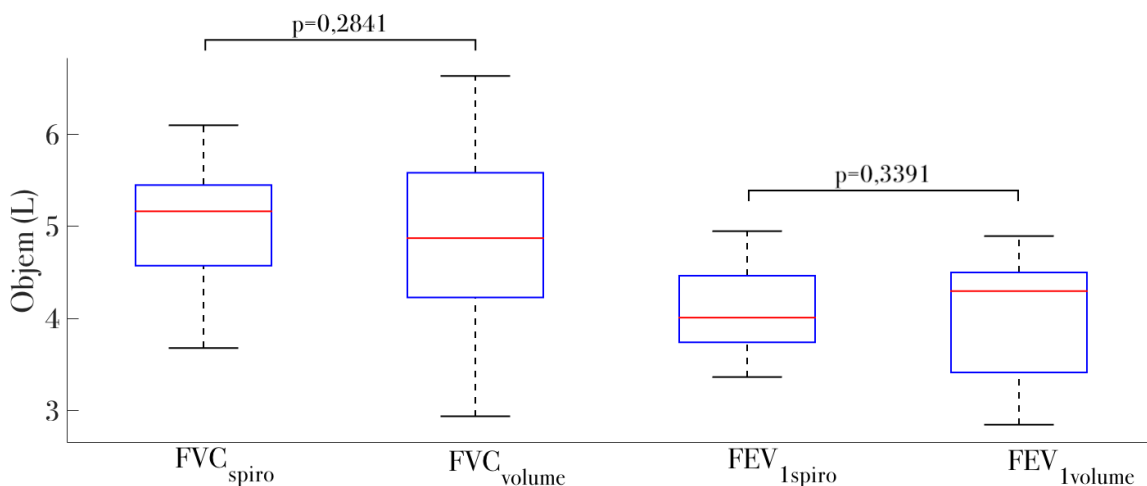


Obrázek 4.18: Rozdílový graf pro ženské pohlaví získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FEV₁.

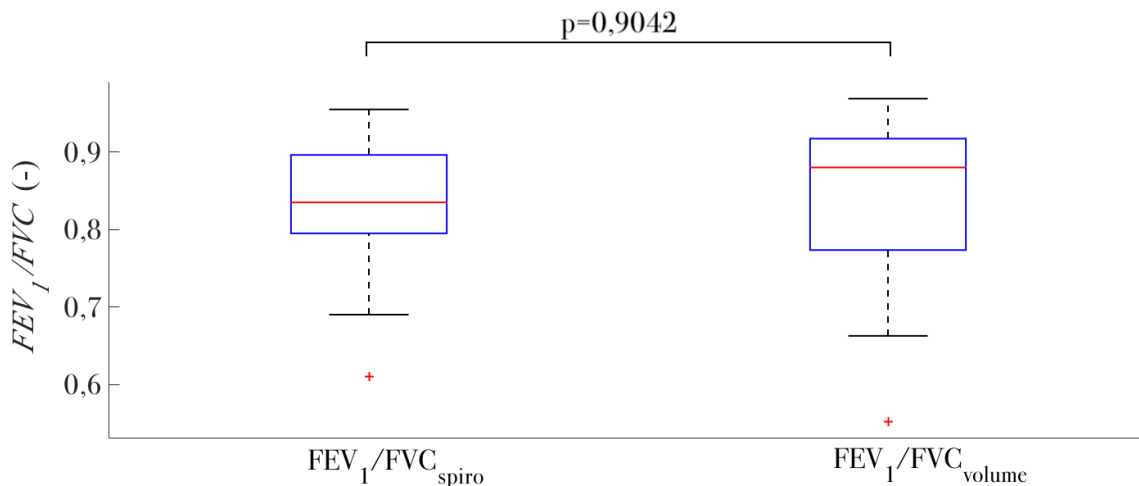


Obrázek 4.19: Rozdílový graf pro ženské pohlaví získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FEV_1/FVC .

Na základě Shapiro-Wilkova testu bylo u mužů potvrzeno normální rozdělení parametru FVC ($p_{spiro} = 0,4761$ a $p_{volume} = 0,9948$), FEV_1 ($p_{spiro} = 0,7232$ a $p_{volume} = 0,2220$) i FEV_1/FVC ($p_{spiro} = 0,2656$ a $p_{volume} = 0,0347$). Oboustrannými párovými t-testy nebyl prokázán u mužů statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$) mezi hodnotami parametrů získaných ze simultánního měření standardní spirometrie a výpočtených z *volume*. Hodnoty statistické významnosti FVC a FEV_1 jsou zobrazeny na Obrázku 4.20 a FEV_1/FVC na Obrázku 4.21.

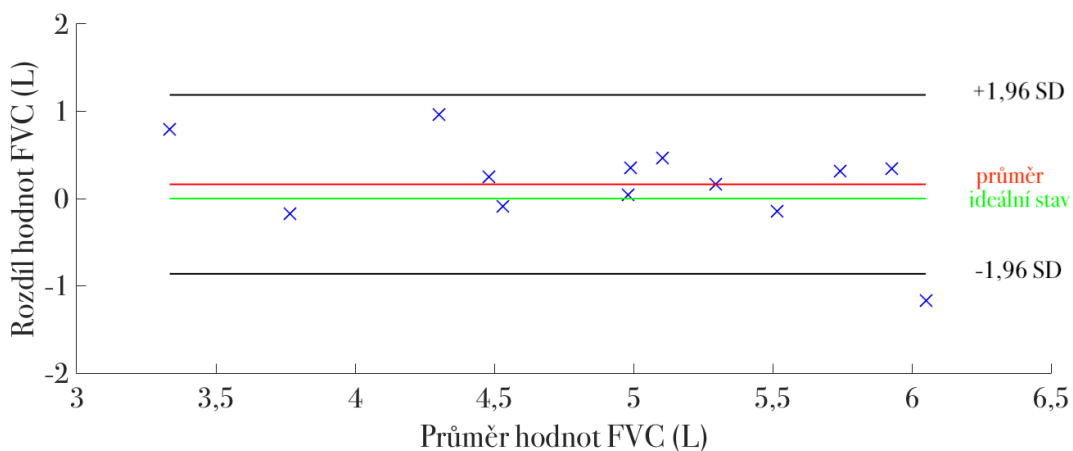


Obrázek 4.20: Porovnání parametrů FVC a FEV_1 vypočtených z průběhu *volume* a spirometru a jejich statistické hodnocení pomocí t-testů pro muže.

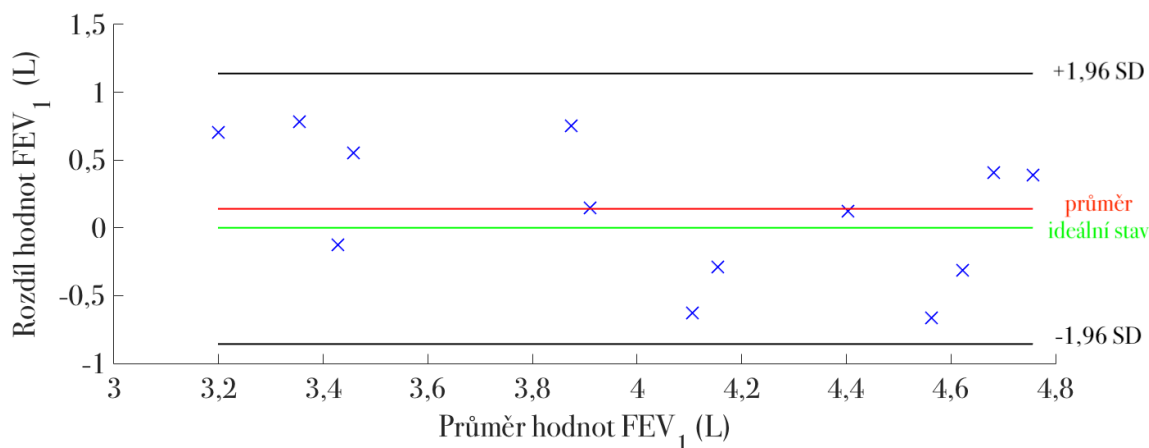


Obrázek 4.21: Porovnání parametru FEV_1/FVC vypočteného z průběhu *volume* a spirometru a statistické hodnocení pomocí t-testu pro muže.

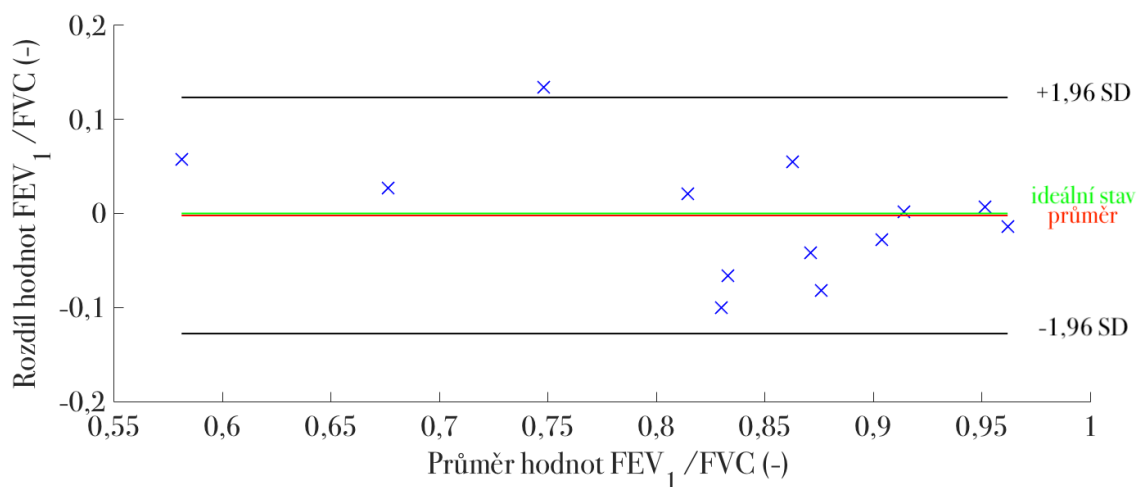
U mužů bylo pomocí Shapiro-Wilkova testu potvrzeno normální rozdělení rozdílů mezi průměrnými hodnotami jednotlivých parametrů FVC, FEV_1 a FEV_1/FVC ($p_{diffFVC} = 0,0740$, $p_{diffFEV_1} = 0,3009$) a ($p_{diffFEV_1/FVC} = 0,9552$). Významnost rozdílů hodnot parametrů ze standardního spirometrického vyšetření a hodnot vypočtených z *volume* byla provedena na základě rozdílového grafu. Rozdílový graf mužského pohlaví pro parametr FVC je zobrazen na Obrázku 4.22, FEV_1 na Obrázku 4.23 a FEV_1/FVC na Obrázku 4.24.



Obrázek 4.22: Rozdílový graf pro mužské pohlaví získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FVC.



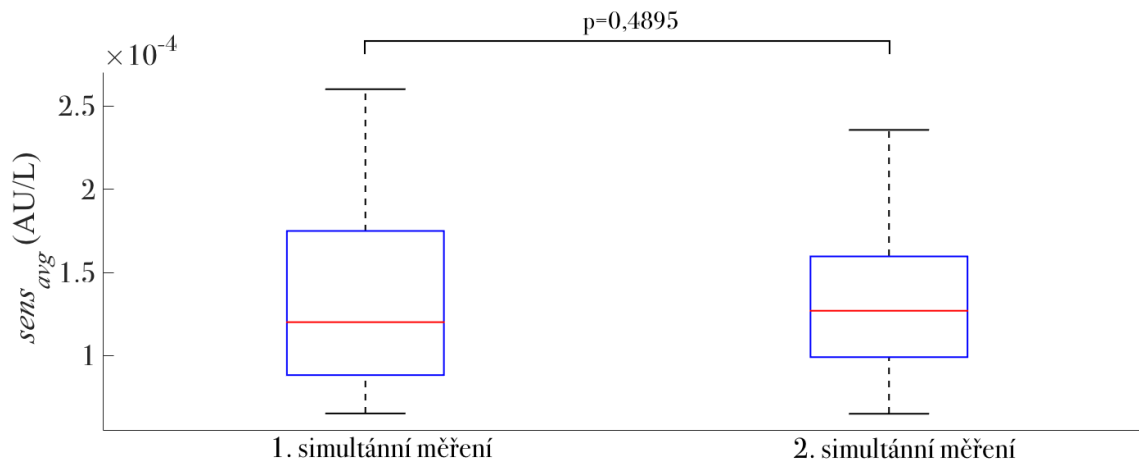
Obrázek 4.23: Rozdílový graf pro mužské pohlaví získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FEV_1 .



Obrázek 4.24: Rozdílový graf pro mužské pohlaví získaný pomocí Blandovy-Altmanovy analýzy spirometrického parametru FEV_1/FVC .

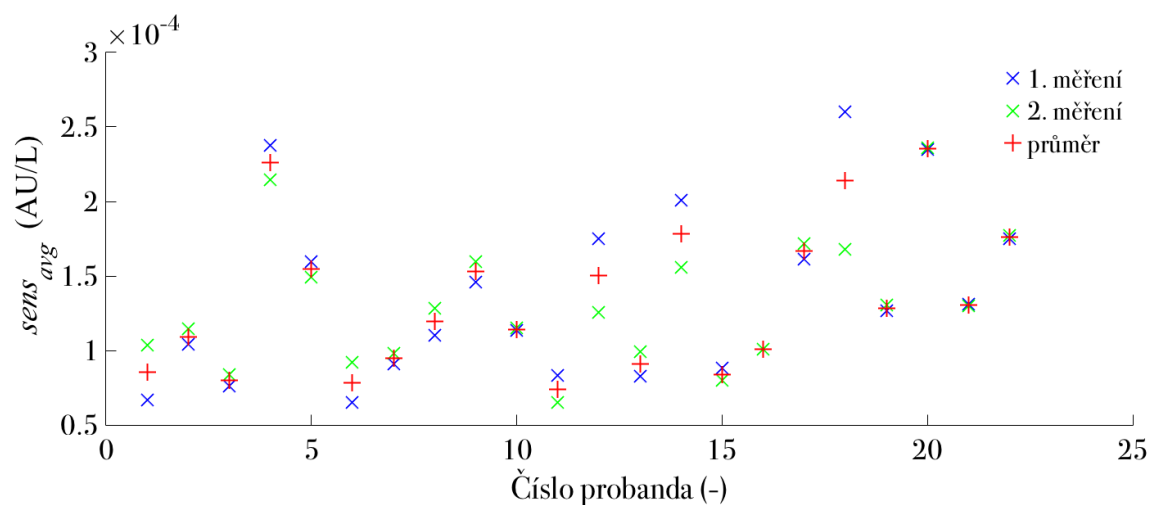
4.4 Rozložení hodnoty $sens_{avg}$

Pro všechny hodnoty $sens_{avg}$ získané z prvního a druhého simultánního měření standardní spirometrie a spirometrie pomocí EIT bylo na základě Shapiro-Wilkova testu potvrzeno normální rozdělení ($p_{sens_{avg1}} = 0,0601$ a $p_{sens_{avg2}} = 0,3298$). Pomocí oboustranného párového t-testu nebyl potvrzen statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$) mezi průměrnými hodnotami $sens_{avg}$ získaných z prvního a druhého simultánního měření. Hodnota statistické významnosti je zobrazena na Obrázku 4.25.



Obrázek 4.25: Porovnání hodnot $sens_{avg}$ získaných z prvního a druhé simultánního měření standardní spirometrie a spirometrie pomocí EIT.

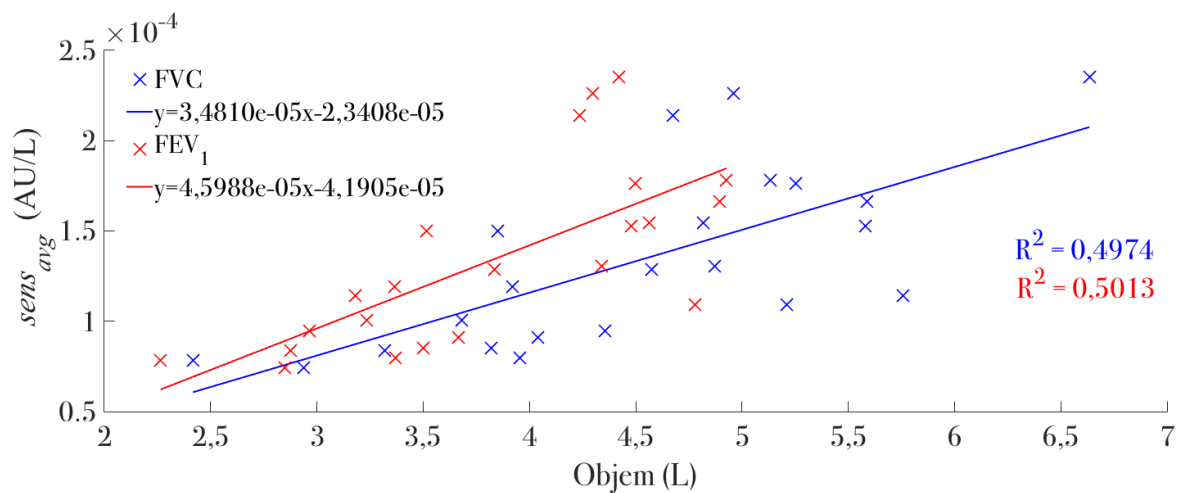
Výsledné hodnoty hodnoty $sens_{avg}$ zahrnující celou skupinu probandů byly uvedeny pomocí bodového grafu na Obrázku 4.26. Modrými křížky je označeno první simultánní měření, zelenými křížky druhé a červeným znakem plus jejich průměrná hodnota.



Obrázek 4.26: Výsledné hodnoty $sens_{avg}$ získané ze simultánního měření standardní spirometrie a spirometrie pomocí EIT.

Průměrné hodnoty parametrů FVC a FEV_1 vypočtených z *volume* ze simultánního měření standardní spirometrie a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT i hodnoty $sens_{avg}$ měly normální rozdělení ($p_{FVC_{vol.}} = 0,9936$, $p_{FEV_{1vol.}} = 0,2823$ a $p_{sens_{avg}} = 0,0649$). Výsledek lineární regresní analýzy na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ je zobrazen na Obrázku 4.27.

Na základě hodnoty statistické významnosti F -testu parametru FVC ($p_{Ftest_{FVC}} = 2,4652 \cdot 10^{-4}$) i FEV_1 ($p_{Ftest_{FEV_1}} = 2,4653 \cdot 10^{-4}$) byla zamítnuta nulová hypotéza o nulových regresních koeficientech. Zjištěné lineární regresní modely pro FVC i FEV_1 byly statisticky signifikantní.



Obrázek 4.27: Lineární regresní analýza vztahu konstanty sen_{avg} a velikosti FVC a FEV_1 vypočtených z *volume*.

5 Diskuze

Hlavním výsledkem experimentální studie je zjištění, že je možné realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT na základě předchozí kalibrace simultánním měření EIT a standardní spirometrie. Dalším podstatným zjištěním je, že nebyl prokázán vliv EIT pásu na naměřené hodnoty spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC.

5.1 Vliv EIT pásu na výsledky ze standardního spirometrického vyšetření

V rámci experimentu byla pro každého probanda provedena čtyři standardní spirometrická vyšetření, dvě samostatná a dvě simultánně měřená s EIT. Pro jedno samostatné měření bylo využito nepřipojeného EIT pásu pro simulaci odporu kolem hrudníku probanda. Na základě statistické analýzy dat nebyl potvrzen vliv EIT pásu na naměřené hodnoty spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC.

Při hodnocení parametrů v rámci všech probandů bylo na základě krabicových grafů (Obrázek 4.1) zjištěno, že hodnoty FVC i FEV₁ měřené s EIT pásem byly vyšší než při měření bez pásu. Rozdíl byl hodnocen jako statisticky nevýznamný. U parametru FVC měřeného s EIT pásem byl nárůst hodnoty mediánu oproti měření bez pásu o 0,13 L, u parametru FEV₁ pouze o 0,06 L. Parametr FEV₁/FVC na Obrázku 4.2 vykazoval opačný výsledek a hodnota mediánu měření bez EIT pásu byla o 0,02 vyšší než s EIT pásem.

Vliv EIT pásu na naměřené hodnoty parametrů nebyl prokázán ani při statistickém hodnocení dle pohlaví. Hodnocením parametru FVC na Obrázku 4.3 a 4.5 byl zjištěn nárůst mediánu měření s EIT pásem jak u žen tak mužů. U žen byl zaznamenán nárůst mediánu o 0,13 L, u mužů pouze 0,04 L. Hodnocením parametru FEV₁ byl zjištěn opačný jev, u žen došlo k změření nižší hodnoty mediánu s EIT pásem o -0,04 L a u mužů dokonce o -0,41 L. V případě hodnocení parametru FEV₁/FVC (Obrázek 4.4 a 4.6) bylo zjištěno, že u žen se medián měření s EIT pásem a bez něj nezměnil, u mužů došlo k snížení hodnoty mediánu měření s EIT pásem o -0,01.

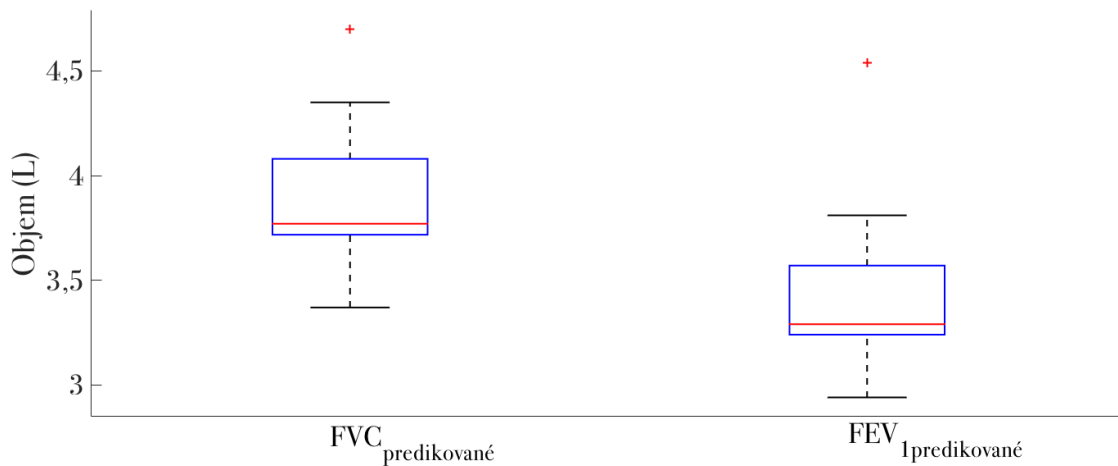
U obou pohlaví byl zjištěn nárůst mediánu parametru FVC při měření s EIT pásem. Hodnota mediánu parametru FEV₁ měřeného s EIT pásem, byla u obou pohlaví nižší. U mužů byl tento rozdíl vyšší než u žen a mohl být způsoben antropometrickými parametry mužského těla. Stejný důvod pravděpodobně vedl k získání nižší hodnoty mediánu FEV₁/FVC získaného z měření s EIT pásem u mužů.

Hodnoty mediánů na Obrázcích 4.3 a 4.5 ukazují, že muži dosahovali u parametru FVC o 1,33 L a FEV₁ o 1,04 L vyšších hodnot než ženy. Narozdíl u parametru

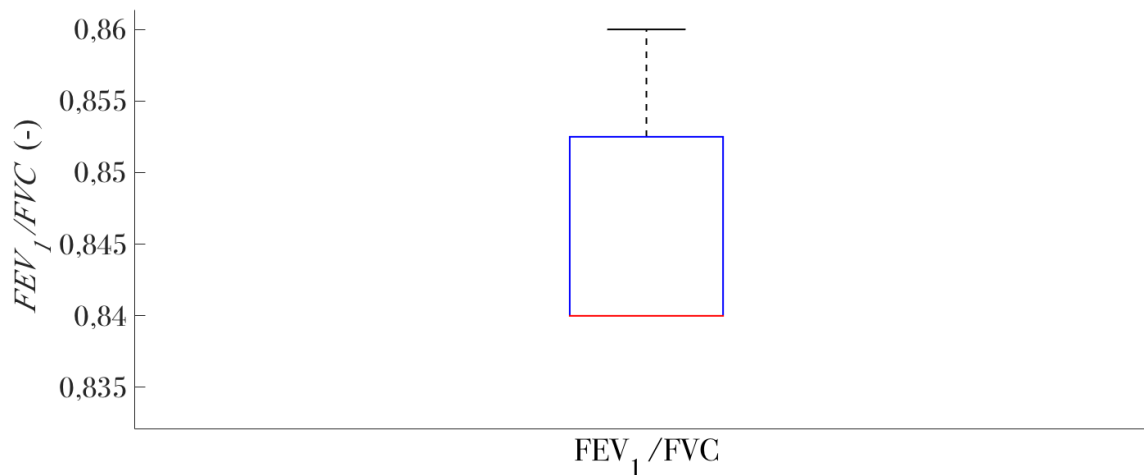
FEV₁/FVC (Obrázky 4.4 a 4.6) dosahovaly vyšších hodnot ženy, konkrétně o 0,05. Tato skutečnost byla způsobena specifickým dechovým vzorem žen a jinými antropometrickými parametry ženského a mužského těla.

Studie [55] uvádí, že u žen byly zjištěny signifikantně nižší hodnoty klidových dechových objemů než u mužů z důvodu torakoabdominálního pohybu. Studie [56] komentovala rozdíly mezi pohlavími v případě intenzivního cvičení, konkrétně menší objem plic a menší průměr dýchacích cest u žen.

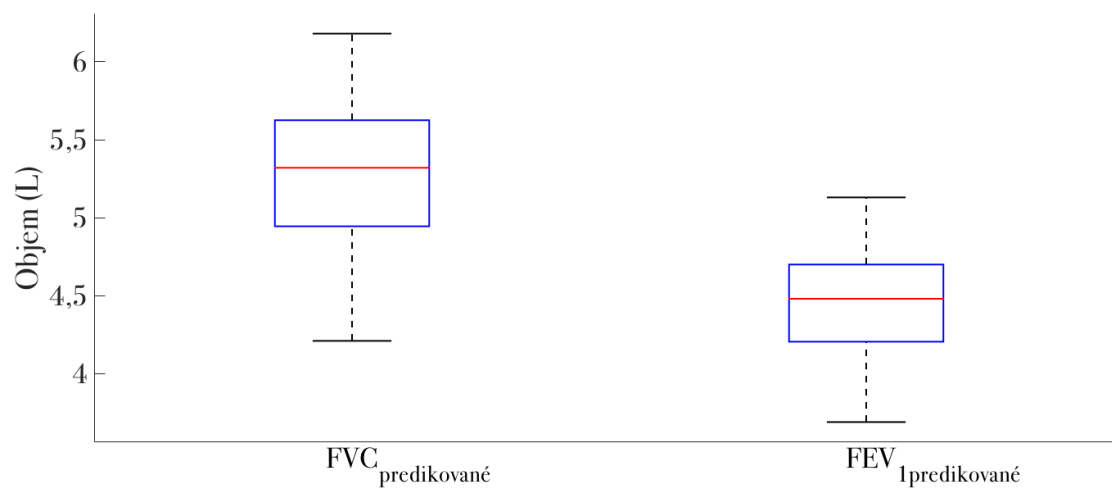
Na základě zadaných antropometrických údajů probandů byly vypočteny softwarem Blue Cherry predikované hodnoty spirometrických parametrů FVC, FEV₁ a FEV₁/FVC. Tyto hodnoty byly pomocí krabicových grafů porovnány mezi pohlavími. Pro ženy jsou predikované spirometrické parametry FVC a FEV₁ na Obrázku 5.1 a parametr FEV₁/FVC na Obrázku 5.2. Pro muže jsou predikované parametry FVC a FEV₁ na Obrázku 5.3 a parametr FEV₁/FVC na Obrázku 5.4. Predikované hodnoty parametru FVC u mužů byly o 1,55 L vyšší než u žen, u parametru FEV₁ byl tento rozdíl 1,19 L. U parametru FEV₁/FVC byl medián u žen i mužů stejný, tj. 0,84. U žen bylo zaznamenáno širší mezikvartilové rozpětí, u mužů naopak došlo k detekci tří odlehlých hodnot. Uvedené rozdíly v predikovaných hodnotách potvrzují skutečnost, že v případě měření s přítomností a nepřítomností EIT pásu dosahovali muži vyšších hodnot spirometrických parametrů než ženy.



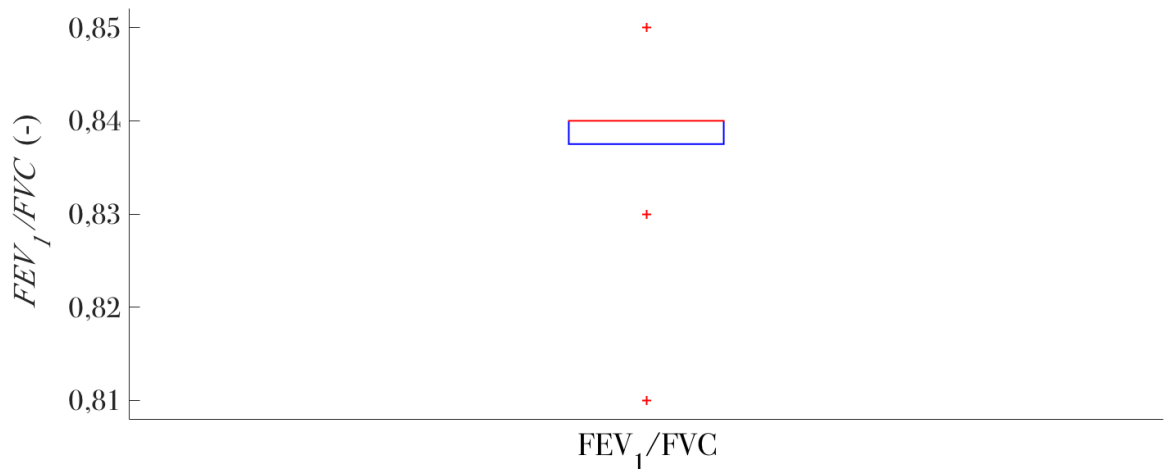
Obrázek 5.1: Predikované hodnoty spirometrických parametrů FVC a FEV₁ probandů ženského pohlaví.



Obrázek 5.2: Predikované hodnoty spirometrického parametru FEV_1/FVC probandů ženského pohlaví.



Obrázek 5.3: Predikované hodnoty spirometrických parametrů FVC a FEV_1 probandů mužského pohlaví.



Obrázek 5.4: Predikované hodnoty spirometrického parametru FEV_1/FVC probandů mužského pohlaví.

Vliv EIT pásu na dechové objemy nebyl v dostupných studiích hodnocen, nebylo proto možné výsledky této studie porovnat s jinými zdroji. Přínosem studie je potvrzení, že přítomností EIT pásu nedochází k ovlivnění dechových objemů. Tato práce poukazuje na nedostatečnou znalost vlivu EIT pásu na dechové objemy, kdy např. pomocí tenzometrů by mohl být kvantifikován vliv nového a méně poddajného EIT pásu na dechový vzor probanda.

5.2 Oddělené měření EIT a standardní spirometrie

Pro hodnocení spirometrických parametrů získaných z oddělených měření EIT a standardní spirometrie byly vytvořeny grafy pro každého probanda zvlášť. Tento postup byl zvolen z důvodu uvažování relativní změny bioimpedance, kterou v současné době nelze porovnávat mezi jednotlivými probandy.

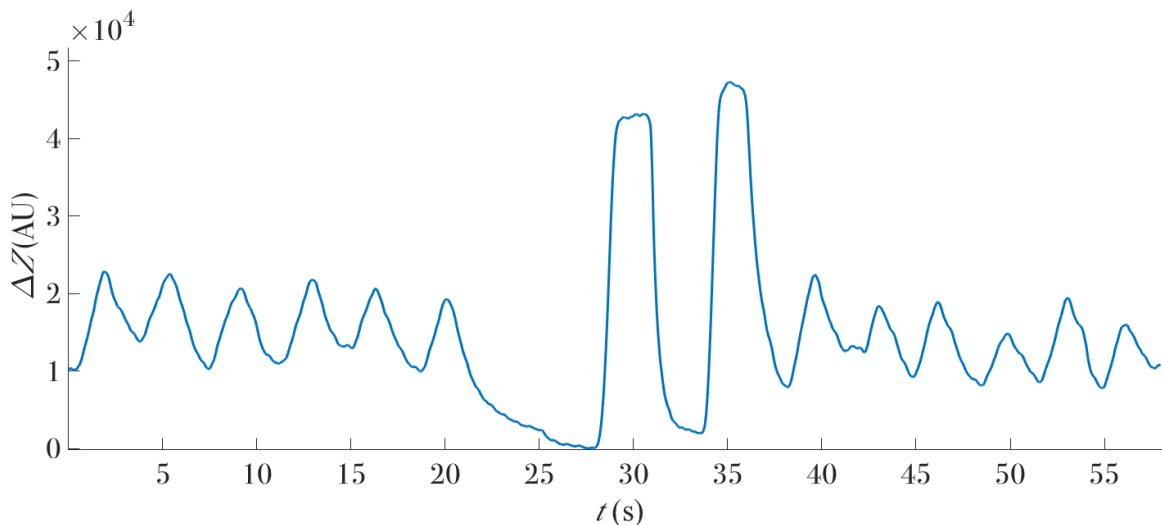
Z důvodu nesimultánního měření standardní spirometrie, a tudíž neznámé přesné hodnoty spirometrického parametru, bylo uvažováno rozpětí maximální a minimální hodnoty ze všech standardních spirometrických vyšetření. Vzhledem k nízkému počtu čtyř hodnot nebylo možné provést parametrickou Blandovu-Altmanovu analýzu [51], proto byly použity intervaly spolehlivosti s různými násobky MAD. Dle odborné literatury [46, 47] byly zvoleny násobky $\pm 2,5$ MAD [46], $\pm 3,0$ MAD [46] a $\pm 3,5$ MAD [47], kdy hodnoty za tímto intervalem spolehlivosti označili autoři jako odlehle hodnoty. Hodnoty vypočtené z *volume*, na základě přepočtu z bioimpedanční křivky odděleného spirometrického měření pomocí EIT, byly testovány násobky MAD pro detekci odlehlejších hodnot.

V rámci skupiny zahrnující všechny probandy leželo 43 % hodnot FVC uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD, 43 % hodnot FEV_1 uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD a 50 % hodnot FEV_1/FVC uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD. Na základě hodnocení podle pohlaví bylo zjištěn nárůst počtu hodnot ležících uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD všech parametrů u mužů. U parametru FVC došlo k nárůstu o 7 %, u parametru FEV_1 pouze o 2 %, ale u parametru FEV_1/FVC byl nárůst 10%. Naopak u žen došlo u všech parametrů k poklesu hodnot ležících uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD.

Výsledné grafy parametru FVC, FEV_1 a FEV_1/FVC pro jednotlivé probandy je možné nalézt v Příloze G.

Žádná dostupná literatura nerealizovala spirometrické vyšetření pouze pomocí EIT, proto výsledky této studie nemohly být porovány s jinými zdroji. Přínosem práce je poukázání na možnost realizovat spirometrické vyšetření pouze pomocí EIT a absenci studií zabývajících se danou problematikou.

Velkou nepřesnost výsledných hodnot parametrů a jejich odlehlost od očekávaného intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD mohlo způsobit několik následujících důvodů. Jedním z nich byl už samotný výpočet hodnoty spirometrického parametru z bioimpedanční křivky. Ačkoliv byly pro výpočet uvažovány standardy ATS/ERS [1, 35, 36], v některých případech bylo obtížné aplikovat postup na daný průběh relativní změny biompedance. Dle aktuálně platných standardů z roku 2005 [1] je např. parametr FVC definován jako maximální objem exspirovaného vzduchu s maximálním úsilím po maximálním inspiriu. U některých probandů došlo k situaci zobrazené na Obrázku 5.5. Na průběhu relativní změny biompedance byla během vykonání druhého maximálního nádechu patrná vyšší hodnota bioimpedance než u prvního maximálního nádechu, která by vedla následným přepočtem k vyšší hodnotě objemu. Pro výpočet parametru FVC byl uvažován dle standardů [1] usilovný výdech po prvním maximálním nádechu. Proband pravděpodobně nedostatečně vydechl a proto byl následující peak vyšší. V případě uvažování druhého maximálního nádechu ale nedošlo k usilovnému rychlému výdechu a proto z něj nelze počítat hodnotu FEV_1 a následný Tiffeneauův index FEV_1/FVC . Docházelo proto k nepřesnostem výpočtu a výslednému podhodnocování měřených spirometrických parametrů.



Obrázek 5.5: Průběh relativní změny biopedance s nesprávně provedeným dechovým manévrem.

Dalším možným důvodem mohl být výpočet kalibrační konstanty $sens_{avg}$ ze simultánního měření standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT. Tato problematika bude diskutována v následující podkapitole.

5.3 Simultánní měření EIT a standardní spirometrie

Na základě dvou simultánních měření standardní spirometrie a EIT nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi výsledky z obou metod. Pomocí krabicových grafů a hodnot statistické významnosti na Obrázku 4.10 bylo zobrazeno grafické rozložení hodnot ze simultánního měření pro všechny probandy. Na grafech bylo možné sledovat nárůst hodnoty mediánu parametru FVC získaného z *volume* o 0,21 L, naopak u parametru FEV_1 byl zaznamenán pokles o -0,01 L. U parametru FEV_1/FVC došlo u hodnot vypočtených z *volume* k detekci dvou dalších odlehlých hodnot a medián byl o 0,02 vyšší než u hodnot ze spirometru, nicméně rozdíl nebyl statisticky významný.

Studie [48] upozorňuje na skutečnost, že nesignifikantní výsledek nemusí vždy znamenat shodu metod. Z toho důvodu byla pro jednotlivé spirometrické parametry simultánního měření EIT a standardní spirometrie provedena Blandova-Altmanova analýza. Rozdílové grafy, které na základě této analýzy vznikly jsou zobrazeny na Obrázcích 4.12–4.14. Pro všechny spirometrické parametry platilo, že více jak 95 % hodnot leželo uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 1,96$ SD. Rozdílový graf parametru FVC na Obrázku 4.12 ukazuje, že pouze jedna hodnota nesplňovala limit shody a ležela mimo inter-

val spolehlivosti. Ostatní hodnoty byly náhodně rozděleny v celém rozmezí vypočtených průměrných hodnot. Průměrný rozdíl hodnot FVC vypočtený oběma metodami se lišil od nulové hodnoty (tzn. ideální stav) o $-0,05$ L, což znamená že hodnoty vypočtené z *volume* byly průměrně vyšší než hodnoty naměřené spirometrem. Rozdílový graf parametru FEV_1 zobrazený na Obrázku 4.13 ukazuje, že pouze jedna hodnota ležela mimo interval spolehlivosti. Průměrný rozdíl hodnot FEV_1 vypočtený oběma metodami se lišil od nulové hodnoty o $-0,11$ L. Pro parametr FEV_1/FVC byla situace složitější, protože na základě rozdílového grafu na Obrázku 4.14 byla zjištěna skutečnost, že s rostoucím průměrem hodnot na ose x roste rozdíl hodnot na ose y. V rozdílovém grafu byla detekována jedna hodnota mimo interval spolehlivosti, nicméně jedna další hodnota se výrazně blížila mezní hodnotě $-1,96$ SD. Průměrná hodnota rozdílu byla rovna $-0,01$.

Na základě krabicových grafů i Blandovy-Altmanovy analýzy bylo zjištěno, že parametry vypočítané z *volume* jsou vyšší než hodnoty získané spirometrem (statisticky nevýznamně). Tato skutečnost byla způsobena pravděpodobně přepočtem biimpedance na objem pomocí kalibrační konstanty $sens_{avg}$. Nepřesnost výpočtu konstanty $sens_{avg}$ mohla být způsobena špatným odečtem klidového dechového objemu a biimpedance klidového dýchání.

Pomocí krabicových grafů a oboustranných párových t-testů byla hodnocena statistická významnost mezi výsledky obou metod pro jednotlivá pohlaví. Na základě získaných hodnot statistické významnosti nebyl prokázán statisticky významný rozdíl parametrů získaných ze spirometru a výpočtem z *volume* u žen ani u mužů. U parametru FVC bylo zjištěno, že u žen byly hodnoty vypočtené z *volume* o $0,17$ L vyšší než hodnoty udávané spirometrem. U parametru FEV_1 byl rozdíl dokonce $0,22$ L. Parametr FEV_1/FVC vykazoval u žen stejnou hodnotu mediánu. U mužů byl medián hodnot FVC vypočtených z *volume* nižší o $-0,29$ L, u parametru FEV_1 byl naopak o $0,29$ L vyšší. Pro parametr FEV_1/FVC bylo zjištěno, že medián hodnot vypočtených z *volume* je o $0,05$ vyšší než v případě výsledků ze standardní spirometrie. Tato skutečnost mohla být způsobena přepočtem biimpedance na objem pomocí vztahu 3.3.

Na základě Blandovy-Altmanovy analýzy pro oddělená pohlaví bylo zjištěno, že více jak 95 % hodnot leželo uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 1,96$ SD. Ve skupině probandů ženského pohlaví došlo pouze v jednom případě k detekci bodu mimo tento interval, konkrétně u spirometrického parametru FVC. U mužů byla zjištěna jedna hodnota mimo interval spolehlivosti $\pm 1,96$ SD v případě hodnocení parametru FEV_1/FVC a jedna v případě hodnocení FVC.

5.4 Rozložení hodnoty $sens_{avg}$

Pomocí bodového grafu na Obrázku 4.26 byly zobrazeny hodnoty $sens_{avg}$ v rámci všech probandů. V grafu byly vyznačeny hodnoty $sens_{avg}$ z prvního a druhého simultánního měření standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT a následně jejich průměrná hodnota. U probanda 18 byl zaznamenán největší rozdíl mezi hodnotou z prvního a druhého měření. Naopak u probandů 10 a 19–22 byla vypočítána téměř totožná hodnota $sens_{avg}$ v rámci dvou měření.

Z důvodu, že u některých probandů se hodnoty $sens_{avg}$ z prvního a druhého simultánního měření výrazně lišily (viz proband 18), byl proveden test normality ($p > 0,05$). Na základě oboustranného párového t-testu nebyl potvrzen statisticky významný rozdíl ($p > 0,05$) mezi hodnotami $sens_{avg}$ získanými z prvního a druhého simultánního měření. Pomocí krabicového grafu byla data graficky vizualizována a bylo zjištěno, že u druhého simultánního měření byly hodnoty mediánu o $6,8 \cdot 10^{-6}$ vyšší.

Z důvodu uvažování kalibrační konstanty $sens_{avg}$ byla zjišťována její závislost na velikosti měřených objemů FVC a FEV₁. Pro hodnocení závislosti kalibrační konstanty $sens_{avg}$ na hodnotě spirometrickém parametru FVC a FEV₁ byla provedena lineární regresní analýza. Parametry FVC a FEV₁ simultánně měřené spirometrem a vypočtené z *volume* měly normální rozdělení ($p > 0,05$) a výsledek lineární regrese je zobrazen na Obrázku 4.27. Regresní model byl verifikován pomocí koeficientů determinace R_{FVC}^2 a $R_{FEV_1}^2$ a hodnoty statistické významnosti F -testu. Hodnoty koeficientů $R_{FVC}^2 = 0,4974$ a $R_{FEV_1}^2 = 0,5013$ nenaznačují silnou korelaci. Na základě výsledku celkového F -testu byla zamítnuta nulová hypotéza o nulových koeficientech a byla potvrzena lineární závislost biimpedance na objemu FVC a FEV₁. Získaný model byl na základě lineární regresní analýzy vyhodnocen jako vhodný.

Hodnocení kalibrační konstanty $sens_{avg}$ získané ze simultánního měření standardní spirometrie a EIT nebylo předmětem žádné dostupné odborné literatury. Z tohoto důvodu nebylo možné provést srovnání uvedených výsledků.

5.5 Limitace metod měření a vyhodnocení dat

Studie proběhla na homogenní skupině 22 dobrovolníků (13 mužů a 9 žen), jejichž základní charakteristiky jsou uvedeny v Tabulce 3.1. Počet probandů byl pro studii dostatečný, nicméně charakterizuje pouze určitou část populace, konkrétně zdravé mladé jedince průměrné váhy a výšky.

Limitace měření standardní spirometrie spočívala v přísných kritériích pro akceptaci měření spirometrických parametrů přístroje Ergostik. Softwarové prostředí Blue

Cherry instruuje osobu provádějící měření tak, aby proband provedl po rychlém usilovném výdechu rychlý a maximální nádech. Z důvodu, že probandi prováděli šest spirometrických vyšetření po relativně krátkých časových intervalech, zapomatovali si pořadí dechových manévrů a docházelo k ovlivnění měření. Tento problém je zobrazen na Obrázku 5.5, kdy proband neprovedl forsírovaný výdech s maximálním úsilím a došlo k většímu nádechu než v případě prvního forsírovaného nádechu pro výpočet hodnoty FVC a FEV₁. Hodnota FVC potom byla spirometrem vyhodnocena jako rozdíl maximální a minimální hodnoty objemu v celém měřeném úseku, což není v souladu s uvedeným postupem dle standardů ATS/ERS [1, 35]. Odchylení od nejnovějších standardů z roku 2017 [36] bylo nalezeno i v případě vizualizace hodnot FEV₁/FVC, kdy dle doporučení mají být zobrazovány jako desetinné číslo, ale hodnoty ze spirometru jsou uváděny v procentech. Další limitací bylo použití spirometrické sondy a antibakteriálního filtru, které mohou dle dostupných studií ovlivňovat dechový vzor či zvyšovat mrtvý prostor společně s hodnotou průtočného odporu [1,4–9]. Dle standardů ATS/ERS [1] musí být spirometr schopný měřit s přesností $\pm 3\%$ nebo $\pm 0,050$ L (uvažována je vyšší hodnota) a průtoky v rozmezí $0 - 14,0$ L·s⁻¹. Celkový průtočný odpor při průtoku 14 L·s⁻¹ musí být $< 1,5$ cm·H₂O·L⁻¹, tato hodnota má být měřena se všemi komponenty mezi měřeným subjektem a spirometrem. Spirometr Ergostik měří dokonce na rozsahu ± 16 L·s⁻¹ a maximální průtočný odpor při průtoku 15 L·s⁻¹ je $1,2$ cm·H₂O·L⁻¹. Mrtvý prostor je výrobcem udáván < 20 mL.

Limitace měření spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT spočívala v samotném využití EIT přístroje PulmoVista 500. Probandovi byl EIT pás umístěn dle instrukcí výrobce [40] do oblasti 4.-6. mezižebří, což zvláště u žen bylo problematické. Z důvodu nezkušenosti lokalizace přesného místa umístění EIT mohlo dojít k nesprávnému umístění EIT pásu na hrudník probanda a následnému ovlivnění měření, což je popsáno v práci [57]. Další ovlivnění měřených hodnot mohlo být způsobeno aplikací elektrodového gelu na EIT pás ve velkém množství, kdy mohlo dojít k vodivému spojení dvou sousedních elektrod vedoucí ke vzniku nedefinovaného šíření proudu po povrchu pokožky probanda. U štíhlých probandů, převážně ženského pohlaví, opakovaně docházelo k nepřilehnutí elektrody u páteřního kanálu a nebo naopak u sternu. Tento fakt se umocňoval při forsírovaném dýchání, kdy se tento problém začal týkat i štíhlých mužů. Problém by mohl být vyřešen např. kompresním obvazem okolo hrudníku pacienta či lehkým opření zády o pevnou podložku. Touto problematikou se žádné studie doposud nezabývaly, proto by bylo nutné první vyloučit vliv komprese elektrod na měřené hodnoty bioimpedance.

Při návrhu výpočtu dat z bioimpedanční křivky bylo často složité aplikovat dolo-

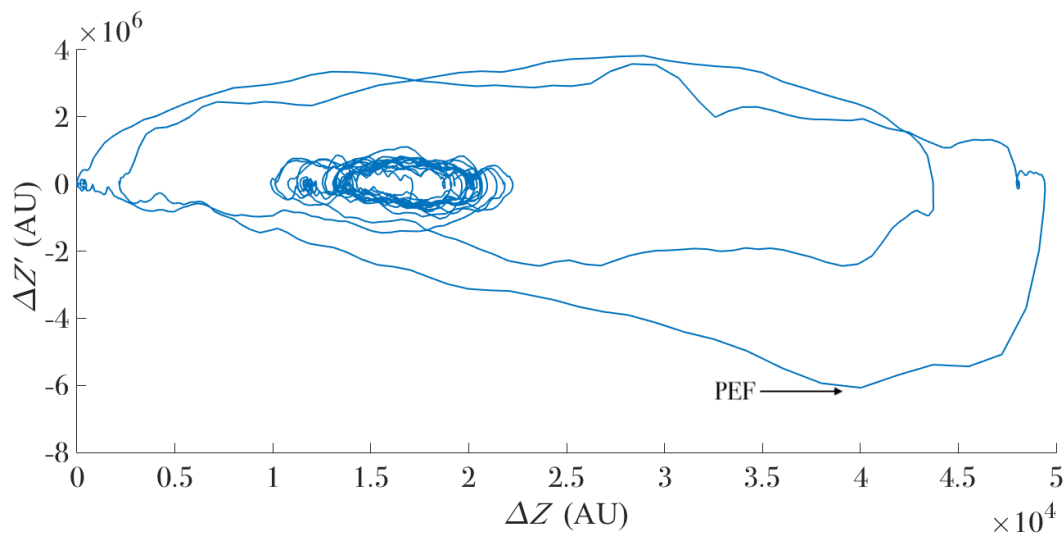
ručení ATS/ERS [1, 35, 36], proto vypočtené hodnoty, zvláště FVC, mohly být nepřesné a mohlo dojít k nepřesnostem ve srovnání s daty ze spirometru. K tomuto docházelo převážně u probandů, u kterých došlo k naměření větší hodnoty FVC v druhém peaku, viz Obrázek 5.5.

V klinické praxi je v současné době stále více používaný poměr FEV_1/FEV_6 . Parametr FEV_6 je definován jako objem vzduchu vydechnutý v šesti vteřinách usilovného výdechu. Bylo zjištěno, že parametr FEV_6 odpovídá parametru FVC. Pacienty s onemocněním respirační soustavy je dechový manévr vedoucí k poměru FEV_1/FEV_6 lépe snášen [58].

V této práci byly hodnoty udávané spirometrem brány jako přesné, ačkoliv tak tomu nemuselo být. Spirometr Ergostik pracuje na principu diferenčního snímání tlaku a jeho přepočtem na průtok. Z výše uvedených důvodů je nutné brát naměřené hodnoty s rezervou a uvažovat jejich možnou nepřesnost. U probandů mohlo vlivem jiného dechové vzoru docházet k naměření nižších hodnot spirometrem. EIT systém má širokou tomografickou rovinu a celkové dechové objemy i s torakoabdominálním ovlivněním naopak zaznamenat mohl. Konstanta $sens_{avg}$ byla počítána na základě simultánního měření standardní spirometrie a EIT. V případě, že spirometr nezaznamenal např. možný únik vzduchu u ústí respiračního systému, nebo zvláště u forsírovaných dechových manévrů malé objemy na konci manévru, mohlo dojít k uvedení chybných výsledků. EIT systém pracuje pouze na základě rozdílných hodnot bioimpedance, tato hodnota nebyla výše uvedenými vlivy nikterak ovlivněna a vypočítané hodnoty parametrů by měly být vyšší. Vypočítaná hodnota $sens_{avg}$ byla už od začátku ovlivněna touto chybou měření a byla přenášena na každé další výpočty, které ji uvažovaly.

5.6 Možnosti dalšího výzkumu

Bylo zjištěno, že lze z naměřených dat vykreslit i křivku průtok-objem, tzv. F/V křivku. Příklad je zobrazen na Obrázku 5.6, kde je naznačena potenciální hodnota PEF. Tato hodnota je dalším možným vyhodnocovaným parametrem při spirometrickém vyšetření. Tato skutečnost naznačuje, že by mohl být pomocí EIT systému PulmoVista 500 měřen i průtok, což by mohlo být předmětem dalších studií.



Obrázek 5.6: Křivka první derivace bioimpedance-bioimpedance, která simuluje křivku průtok-objem ze standardního spirometrického vyšetření.

Pokud by došlo k zpřesnění výpočtu konstanty $sens_{avg}$, byl by zpřesněn i výpočet objemů z bioimpedanční křivky a metoda měření spirometrického vyšetření realizovaná pomocí EIT by mohla být přínosnou metodou do klinické praxe. Její výhodou by bylo provedení simultánního měření standardní spirometrie a EIT pouze na klidovém dýchání a forsírované dýchání by bylo provedeno pouze s EIT pásem, který by odstranil negativní vlastnosti standardního vyšetření. Výhodou by tedy mohla být vyšší přesnost, odstranění nutnosti použít antibakteriální filtr a spirometrickou sondu a tím snížit hodnotu průtočného odporu a mrtvého objemu, což by mohlo pomoci hlavně pediatrickým pacientům a pacientům s onemocněním respirační soustavy. Nevýhodou této metody by pravděpodobně byla vysoká pořizovací cena EIT systému PulmoVista 500, vyšší časová náročnost vyšetření a nemožnost interpretovat data v reálném čase.

Předmětem dalšího zkoumání by mohla být možnost provést ergonomické spirometrické vyšetření realizované pomocí EIT, při kterém proband provádí fyzicky náročnou aktivitu (zpravidla jízda na kole či běh). Pokud by se podařil odstranit vliv pohybových artefaktů, bylo by možné realizovat sportovní zátěžový test s měřením spirometrického vyšetření pouze pomocí EIT. Tato metoda by byla cenná ve sporovní medicíně, protože zvláště u toho druhu testu je dýchání skrz pneumotachograf velmi nekomfortní.

6 Závěr

V průběhu experimentální studie byla pro 22 probandů vždy provedena dvě standardní spirometrická vyšetření, dvě spirometrická vyšetření realizovaná pomocí EIT a dvě měření simultánně měřená oběma metodami. Na základě simultánního měření byla pro každého probanda získána kalibrační konstanta $sens_{avg}$, která sloužila pro přepočtení hodnot bioimpedance na objem.

Výsledky z experimentální studie ukázaly, že při statistickém hodnocení simultánního měření EIT a standardní spirometrie nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi vypočtenými parametry FVC, FEV_1 a FEV_1/FVC z jednotlivých metod. V případě samostatného spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT pro parametr FVC a FEV_1 v rámci všech probandů leželo 43 % ze všech hodnot uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD a pro parametr FEV_1/FVC leželo 50 % ze všech hodnot uvnitř intervalu spolehlivosti $\pm 3,5$ MAD. Na základě získaných výsledků nebyl statisticky prokázán vliv EIT pásu na měřené hodnoty spirometrických parametrů. Pomocí regresní analýzy byla zjištěna lineární závislost kalibrační konstanty $sens_{avg}$ na objemu FVC ($R^2 = 0,4974$) a FEV_1 ($R^2 = 0,5013$).

Z klinického hlediska výsledky prokázaly, že lze realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT na základě předchozí kalibrace simultánního měření EIT a standardní spirometrie. Studie poukázala na limitaci a přesnost metody měření spirometrického vyšetření pomocí EIT a přepočtu hodnot bioimpedance na objem.

Seznam použité literatury

Reference

- [1] MILLER, M. R. Standardisation of spirometry. *European Respiratory Journal* [online]. 2005, 26(2), 319-338 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1183/09031936.05.00034805. ISSN 0903-1936. Dostupné z: <http://erj.ersjournals.com/cgi/doi/10.1183/09031936.05.00034805>
- [2] MOORE, V.C. Spirometry: step by step. *Breathe* [online]. 2012, 8(3), 232-240 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1183/20734735.0021711. ISSN 18106838. Dostupné z: <http://breathe.ersjournals.com/lookup/doi/10.1183/20734735.0021711>
- [3] MANDAL, NG. Anaesthesia & Intensive Care Medicine: Respirometers including spirometer, pneumotachograph and peak flow meter [online]. 2006, Issue 1(Volume 7), 1-5 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1472029906001834>
- [4] MILLER, M. R. General considerations for lung function testing. *European Respiratory Journal* [online]. 2005, 26(1), 153-161 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1183/09031936.05.00034505. ISSN 0903-1936. Dostupné z: <http://erj.ersjournals.com/cgi/doi/10.1183/09031936.05.00034505>
- [5] JOHNS, D. P, C. M INGRAM, S. KHOV, P. D ROCHFORD a E H. WALTERS. Effect of breathing circuit resistance on the measurement of ventilatory function. *Thorax* [online]. 1998, 53(11), 944-948 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1136/thx.53.11.944. ISSN 0040-6376. Dostupné z: <http://thorax.bmj.com/cgi/doi/10.1136/thx.53.11.944>
- [6] VALLINIS, P., G. M. DAVIS a A. L. COATES. A very low dead space pneumotachograph for ventilatory measurements in newborns. *Journal of Applied Physiology* [online]. 1990, 69(4), 1542-1545 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1152/jappl.1990.69.4.1542. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappl.1990.69.4.1542>
- [7] CRAMER, D. a S. WARD. Bacterial/viral filters in pulmonary function departments: The buyers' guide to respiratory care products. In: *European Respiratory Society* [online]. London, UK., 2008, s. 144–151 [cit. 2018-04-16]. Dostupné

z: <http://www.wales.nhs.uk/sitesplus/documents/861/bacterial%20viral%20filter%20info.pdf>

- [8] JOHNS, David P., Corrie INGRAM, Helen BOOTH, Trevor J. WILLIAMS a E. HAYDN WALTERS. Effect of a microaerosol barrier filter on the measurement of lung function. *Chest*. 1995, 1995(107:), 1045-48.
- [9] MANCZUR, T. a A. GREENOUGH. Tidal breathing parameters in young children: comparison of measurement by respiratory inductance plethysmography to a facemask pneumotachograph system. *Pediatr Pulmonol*. 1996, 28(6), 436-41.
- [10] EICHINGER, Monika, Daiva-Elzbieta OPTAZAITE, Annette KOPPSCHNEIDER, et al. Morphologic and functional scoring of cystic fibrosis lung disease using MRI. *European Journal of Radiology* [online]. 2012, 81(6), 1321-1329 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1016/j.ejrad.2011.02.045. ISSN 0720048X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0720048X11002312>
- [11] EICHINGER, Monika, Claus-Peter HEUSSEL, Hans-Ulrich KAUCZOR, Harm TIDDENS a Michael PUDERBACH. Computed tomography and magnetic resonance imaging in cystic fibrosis lung disease. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* [online]. 2010, 32(6), 1370-1378 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1002/jmri.22374. ISSN 10531807. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/jmri.22374>
- [12] TESCHNER, E., IMHOFF, M. LEONHARDT, S. Electrical impedance tomography: The realization of regional lung monitoring 2nd edition. Dräger, Lübeck, Německo, 2011.
- [13] PALLETT, J. E.; SCOPES, J. W. Recording respirations in newborn babies by measuring impedance of the chest. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 1965, 3.2: 161-168.
- [14] GRENVIK, Ake, et al. Impedance pneumography: comparison between chest impedance changes and respiratory volumes in 11 healthy volunteers. *Chest*, 1972, 62.4: 439-443.
- [15] FREUNDLICH, Jerome J.; ERICKSON, James C. Electrical impedance pneumography for simple nonrestrictive continuous monitoring of respiratory rate, rhythm and tidal volume for surgical patients. *Chest*, 1974, 65.2: 181-184.
- [16] MARQUIS, François, Nicolas COULOMBE, Roberta COSTA, Hervé GAGNON, Robert GUARDO a Yoanna SKROBIK. Electrical Impedance Tomography's

Correlation to Lung Volume is Not Influenced by Anthropometric Parameters. *Journal of Clinical Monitoring and Computing* [online]. 2006-7-10, 20(3), 201-207 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1007/s10877-006-9021-4. ISSN 1387-1307. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10877-006-9021-4>

- [17] COULOMBE, Nicolas, Hervé GAGNON, François MARQUIS, Yoanna SKROBIK a Robert GUARDO. A parametric model of the relationship between EIT and total lung volume. *Physiological Measurement* [online]. 2005, 26(4), 401-411 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1088/0967-3334/26/4/006. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0967-3334/26/i=4/a=006?key=crossref.531378d9079b09743be465a25d40c271>
- [18] BALLEZA, Marco, et al. Monitoring of breathing pattern at rest by electrical impedance tomography. *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*, 2007, 43.6: 300-303.
- [19] ZHAO, Zhanqi, Rainald FISCHER, Inéz FRERICHS, Ullrich MÜLLER-LISSE a Knut MÖLLER. Regional ventilation in cystic fibrosis measured by electrical impedance tomography. *Journal of Cystic Fibrosis* [online]. 2012, 11(5), 412-418 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1016/j.jcf.2012.03.011. ISSN 15691993. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569199312000501>
- [20] VOGT, B., S. PULLETZ, G. ELKE, Z. ZHAO, P. ZABEL, N. WEILER a I. FRERICHS. Spatial and temporal heterogeneity of regional lung ventilation determined by electrical impedance tomography during pulmonary function testing. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2012, 113(7), 1154-1161 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1152/jappphysiol.01630.2011. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://jap.physiology.org/cgi/doi/10.1152/jappphysiol.01630.2011>
- [21] VOGT, Barbara, Zhanqi ZHAO, Peter ZABEL, Norbert WEILER a Inéz FRERICHS. Regional lung response to bronchodilator reversibility testing determined by electrical impedance tomography in chronic obstructive pulmonary disease. *American Journal of Physiology - Lung Cellular and Molecular Physiology* [online]. 2016, 311(1), L8-L19 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1152/ajplung.00463.2015. ISSN 1040-0605. Dostupné z: <http://ajplung.physiology.org/lookup/doi/10.1152/ajplung.00463.2015>
- [22] LEHMANN, Sylvia, Steffen LEONHARDT, Chuong NGO, Lukas BERGMANN, Ines AYED, Simone SCHRADING a Klaus TENBROCK. Global and regio-

- nal lung function in cystic fibrosis measured by electrical impedance tomography. *Pediatric Pulmonology* [online]. 2016, 51(11), 1191-1199 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1002/ppul.23444. ISSN 87556863. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/ppul.23444>
- [23] NGO, Chuong, Steffen LEONHARDT, Tony ZHANG, Markus LÜKEN, Berno MISGELD, Thomas VOLLMER, Klaus TENBROCK a Sylvia LEHMANN. Linearity of electrical impedance tomography during maximum effort breathing and forced expiration maneuvers. *Physiological Measurement* [online]. 2017, 38(1), 77-86 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1088/1361-6579/38/1/77. ISSN 0967-3334. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0967-3334/38/i=1/a=77?key=crossref.97fbff517d3ed9eadffc2e6d86621736>
- [24] BODENSTEIN, Marc, Matthias DAVID a Klaus MARKSTALLER. Principles of electrical impedance tomography and its clinical application. *Critical Care Medicine* [online]. 2009, 37(2), 713-724 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1097/CCM.0b013e3181958d2f. ISSN 0090-3493. Dostupné z: <https://insights.ovid.com/crossref?an=00003246-200902000-00043>
- [25] BROWN, BH. Electrical impedance tomography (EIT): a review. *Journal of Medical Engineering & Technology* [online]. 2009, 27(3), 97-108 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1080/0309190021000059687. ISSN 0309-1902. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0309190021000059687>
- [26] KHALIL, Sami, Mas MOHKOTAR a Fatimah IBRAHIM. The Theory and Fundamentals of Bioimpedance Analysis in Clinical Status Monitoring and Diagnosis of Diseases. *Sensors* [online]. 2014, 14(6), 10895-10928 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.3390/s140610895. ISSN 1424-8220. Dostupné z: www.mdpi.com/1424-8220/14/6/10895
- [27] LEONHARDT, Steffen a Burkhard LACHMANN. Electrical impedance tomography: the holy grail of ventilation and perfusion monitoring?. *Intensive Care Medicine* [online]. 2012, 38(12), 1917-1929 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1007/s00134-012-2684-z. ISSN 0342-4642. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00134-012-2684-z>
- [28] BROWN, B.H, BARBER, D.C a A.D SEAGAR. Applied potential tomography: possible clinical applications. *Clin. phys. Physiol. Meas.: The Institute of Physics*. 1985, 6(2), 109-121.

- [29] TOMASHEFSKI, Joseph F. a David H. DAIL. Dail and Hammar's pulmonary pathology. 3rd ed. New York: Springer, c2008. ISBN 978-0387983950.
- [30] MIEDEMA, M. Electrical impedance tomography in high frequency ventilated preterm infants: the search for the Holy Grail. 2011.
- [31] CRABB, Michael. EIT Reconstruction Algorithms for Respiratory Intensive Care. 2014, Doctoral thesis, The University of Manchester.
- [32] CHLUMSKÝ, Jan a KOL. Doporučený postup pro interpretaci základních vyšetření plicních funkcí. Doporučený postup pro interpretaci základních vyšetření plicních funkcí [online]. 2008, roč.68,č.1 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://pneumologie.cz/upload/1480163867.pdf>
- [33] WANGER, J., J. L. CLAUSEN, A. COATES, et al. Standardisation of the measurement of lung volumes. European Respiratory Journal [online]. 2005, 26(3), 511-522 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1183/09031936.05.00035005. ISSN 0903-1936. Dostupné z: <http://erj.ersjournals.com/lookup/doi/10.1183/09031936.05.00035005>
- [34] DUKE, James. Anesthesia secrets. 4th ed. Philadelphia, PA: Mosby/Elsevier, c2011. ISBN 978-0-323-06524-5.
- [35] MILLER, M. R., J. HANKINSON, V. BRUSASCO, et al. Standardisation of lung function testing: the authors' replies to readers' comments. European Respiratory Journal [online]. 2010, 36(6), 1496-1498 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1183/09031936.00130010. ISSN 0903-1936. Dostupné z: <http://erj.ersjournals.com/cgi/doi/10.1183/09031936.00130010>
- [36] CULVER, Bruce H., Brian L. GRAHAM, Allan L. COATES, et al. Recommendations for a Standardized Pulmonary Function Report. An Official American Thoracic Society Technical Statement. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine [online]. 2017, 196(11), 1463-1472 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1164/rccm.201710-1981ST. ISSN 1073-449X. Dostupné z: <http://www.atsjournals.org/doi/10.1164/rccm.201710-1981ST>
- [37] BORG, Brigitte M., Bruce R. THOMPSON a Robyn E. O'HEHIR. Interpreting lung function tests: a step-by-step guide. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-118-40551-2.
- [38] PENHAKER, Marek. Lékařské diagnostické přístroje: učební texty. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0751-3.

- [39] CHLUMSKÝ, Jan. Plicní funkce pro klinickou praxi. Praha: Maxdorf, 2014. Jesenius. ISBN 978-80-7345-392-3.
- [40] DRÄGER MEDICAL GMBH. PulmoVista 500. Elektrická impedanční tomografie: Návod k použití. 2 – 2010-10. Lübeck, Německo, 2010, 134 s.
- [41] HUSTEN, C. G. How should we define light or intermittent smoking? Does it matter?. *Nicotine & Tobacco Research* [online]. 2009, 11(2), 111-121 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1093/ntr/ntp010. ISSN 1462-2203. Dostupné z: <https://academic.oup.com/ntr/article-lookup/doi/10.1093/ntr/ntp010>
- [42] PETTY, Thomas L. SIMPLE OFFICE SPIROMETRY. *Clinics in Chest Medicine* [online]. 2001, 22(4), 845-859 [cit. 2018-04-16]. DOI: 10.1016/S0272-5231(05)70070-8. ISSN 02725231. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272523105700708>
- [43] GERATHERM RESPIRATORY GMBH. Diffustik: Uživatelský manuál. Bad Kissingen, Německo, 2012, 26 s.
- [44] GERATHERM RESPIRATORY GMBH. Blue Cherry: Uživatelský manuál. Bad Kissingen, Německo, 2011, 162 s.
- [45] ELLISON, S. L. R., Trevor J. FARRANT a Vicki. BARWICK. *Practical statistics for the analytical scientist: a bench guide*. 2nd ed. Cambridge, UK: RSC Publishing, c2009. ISBN 978-0-85404-131-2.
- [46] LEYS, Christophe, Christophe LEY, Olivier KLEIN, Philippe BERNARD a Laurent LICATA. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology* [online]. 2013, 49(4), 764-766 [cit. 2018-04-30]. DOI: 10.1016/j.jesp.2013.03.013. ISSN 00221031. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022103113000668>
- [47] IGLEWICZ, Boris. a David C. HOAGLIN. *How to detect and handle outliers*. Milwaukee, Wis.: ASQC Quality Press, c1993. ISBN 9780873892476.
- [48] ZAKI, Rafdzah, Awang BULGIBA, Roshidi ISMAIL, Noor Azina ISMAIL a Fabio RAPALLO. Statistical Methods Used to Test for Agreement of Medical Instruments Measuring Continuous Variables in Method Comparison Studies: A Systematic Review. *PLoS ONE* [online]. 2012, 7(5), e37908- [cit. 2018-04-30]. DOI:

10.1371/journal.pone.0037908. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0037908>

- [49] GIAVARINA, Davide. Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia Medica* [online]. 2015, 25(2), 141-151 [cit. 2018-04-24]. DOI: 10.11613/BM.2015.015. ISSN 18467482. Dostupné z: <http://www.biochemia-medica.com/system/files/Giavarina%20Davide-Understanding%20Bland%20Altman%20analyses.pdf>
- [50] ALTMAN, D. G. a J. M. BLAND. Measurement in Medicine: The Analysis of Method Comparison Studies. *The Statistician* [online]. 1983, 32(3), 307- [cit. 2018-04-24]. DOI: 10.2307/2987937. ISSN 00390526. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/2987937?origin=crossref>
- [51] MYLES, P.S. a J. CUI. I. Using the Bland–Altman method to measure agreement with repeated measures. *British Journal of Anaesthesia* [online]. 2007, 99(3), 309-311 [cit. 2018-04-30]. DOI: 10.1093/bja/aem214. ISSN 00070912. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007091217347153>
- [52] BEWICK, Viv, Liz CHEEK a Jonathan BALL. *Critical Care* [online]. 7(6), 451- [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1186/cc2401. ISSN 13648535. Dostupné z: <http://ccforum.biomedcentral.com/articles/10.1186/cc2401>
- [53] LITSCHMANNOVÁ, M. Úvod do statistiky, elektronická skripta a doplňkové interaktivní materiály: Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava Západočeská univerzita v Plzni [online]. 2011 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.cs.vsb.cz/ochodkova/courses/MADI/interaktivni_uvod_do_statistiky.pdf
- [54] F-statistic and t-statistic: Documentation. MathWorks [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/f-statistic-and-t-statistic.html>
- [55] PARREIRA, Verônica F., Carolina J. BUENO, Danielle C. FRANÇA, Danielle S. R. VIEIRA, Dirceu R. PEREIRA a Raquel R. BRITTO. Padrão respiratório e movimento toracoabdominal em indivíduos saudáveis: influência da idade e do sexo. *Revista Brasileira de Fisioterapia* [online]. 2010, 14(5), 411-416 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1590/S1413-35552010000500010. ISSN 1413-3555. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-35552010000500010&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt

- [56] SHEEL, A. William a Jordan A. GUENETTE. Mechanics of Breathing during Exercise in Men and Women. *Exercise and Sport Sciences Reviews* [online]. 2008, 36(3), 128-134 [cit. 2018-05-07]. DOI: 10.1097/JES.0b013e31817be7f0. ISSN 0091-6331. Dostupné z: <https://insights.ovid.com/crossref?an=00003677-200807000-00005>
- [57] MASOPUSTOVÁ, M. Vliv tomografické roviny na vyšetření elektrickou impedenční tomografií u mužů a žen. Diplomová práce. Vedoucí práce K. Roubík. ČVUT FBMI, 2014.
- [58] VANDEVOORDE, J., S. VERBANCK, D. SCHUERMANS, L. BROEKAERT, D. DEVROEY, J. KARTOUNIAN a W. VINCKEN. Forced vital capacity and forced expiratory volume in six seconds as predictors of reduced total lung capacity. *European Respiratory Journal* [online]. 2008, 31(2), 391-395 [cit. 2018-05-09]. DOI: 10.1183/09031936.00032307. ISSN 0903-1936. Dostupné z: <http://erj.ersjournals.com/cgi/doi/10.1183/09031936.00032307>

A Žádost o projednání se souhlasem EK FBMI



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

nám. Sítňá 3105, 272 01 Kladno

Žádost o projednání výzkumného projektu v etické komisi FBMI ČVUT

Application for approval of a research project by FBMI CTU Institutional Ethical/Review Board

Název projektu: Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT

Name of the project: Realization of spirometry measurement with EIT

Hlavní řešitel projektu (Jméno, pracoviště, e-mail): Bc. Anna Miltová; miltova.anna@fbmi.cvut.cz

Stručný popis projektu (do 100 slov):

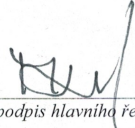
Elektrická impedanční tomografie je bezpečná, neinvazivní monitorovací technika plicní ventilace využívající vysokofrekvenční elektrické proudy pro zobrazení elektrických vlastností tkání a vnitřních struktur lidského těla. Jednou z možných aplikací v praxi by mohlo být měření a hodnocení plicních objemů při stejných dechových manévrech jako u standardního spirometrického vyšetření. Cílem tohoto výzkumného projektu je experimentálně porovnat získané parametry ze standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí elektrické impedanční tomografie. Experiment bude prováděn na zdravých dobrovolnících zejména z řad studentů FBMI za použití EIT systému PulmoVista 500 (Dräger, Německo).

Charakter projektu: Grantová úloha (název agentury);
 Výzkum výzkumného týmu (specifikace);
 Kvalifikační práce (specifikace): Diplomová práce
 Jiné:

Seznam příkládaných dokumentů:

- sylabus projektu
- informovaný souhlas vč. informace pro subjekt hodnocení

V Kladně dne 29.6.2017


podpis hlavního řešitele

Vyjádření souhlasu etické komise FBMI ČVUT

FBMI CTU Institutional Ethical/Review Board approval

Projekt byl schválen etickou komisí FBMI ČVUT dne:

pod číslem: CG/014

platný do: 12/2018

Etická komise FBMI ČVUT v Praze, ve složení Mgr. Martina Dingová Šliková (předsedkyně), RNDr. Táňa Jarošíková, CSc., MUDr. Radek Matlach, prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D., a Ing. Lucie Šedzmáková, zhodnotila předložený projekt a neshledala žádné rozpory s platnými zásadami, předpisy a mezinárodními směrnicemi pro provádění biomedicínského výzkumu zahrnujícího lidské účastníky nebo laboratorní zvířata.

Řešitel projektu splnil podmínky nutné k získání souhlasu etické komise.

V Kladně dne

27/10 2017

ETICKÁ KOMISE
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství
nám. Sítňá 3105
272 01 Kladno
razítko etické komise FBMI ČVUT


podpis předsedy etické komise

ČVUT v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství
nám. Sítňá 3105
272 01 Kladno

tel.: (+420) 224 358 419
fax: (+420) 312 608 204
www.fbmi.cvut.cz

IČ: 68407700
DIČ: CZ68407700
Bankovní spojení: KB Praha 6
č.ú. 27-7380010287/0100

B Syllabus výzkumného projektu

Syllabus výzkumného projektu

A: Základní údaje o výzkumném projektu:	
Název projektu: Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT	
Typ studie:	<input checked="" type="checkbox"/> intervenční <input checked="" type="checkbox"/> prospektivní <input type="checkbox"/> observační <input type="checkbox"/> retrospektivní
Půjde o práci:	<input type="checkbox"/> s osobami <input type="checkbox"/> s laboratorními zvířaty <i>(V závislosti na typu testovaných subjektů vyplňte buď část B, nebo část C tohoto syllabu)</i>
Cíl projektu, testovaná hypotéza: Cílem projektu je zjistit, zda je možná realizovat spirometrické vyšetření pomocí elektrické impedanční tomografie (EIT). Cílem je experimentálně porovnat získané parametry ze standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného pomocí EIT.	
Přínos projektu v technické, diagnostické, léčebné oblasti, pro lékařské poznání nebo individuální subjekt hodnocení: Přínosem projektu pro klinickou praxi je možnost realizovat spirometrické vyšetření pomocí EIT, při kterém jsou odstraněny negativní vlastnosti standardního spirometrického vyšetření (ovlivnění dechového vzoru, zvyšování mrtvého prostoru přidáváním komponentů do měřící aparatury apod.).	
B: Charakteristika souboru subjektů (osob) klinického hodnocení:	
Počet: 30 – 40	Věková struktura: 20 – 25 (převážně studenti FBMI ČVUT)
Pohlaví: muži i ženy	Způsob jejich náboru: náhodný mezi studenty FBMI ČVUT
Odměna za účast: není	Jiné: není
Doba trvání celého projektu (datum od-do): říjen 2017 – červen 2018	Doba trvání pro jeden subjekt hodnocení: max. 30 minut
Popis nakládání se subjekty, popis intervence, odebírání vzorků apod.: Všechna měření v průběhu experimentu jsou neinvazivní. Experiment je založen pouze na vdechování okolního vzduchu. Vybraný proband bude po příchodu na experimentální pracoviště podroben dotazníku o jeho zdravotním stavu. Po seznámení s průběhem celého experimentu bude provedeno standardní spirometrické vyšetření, při kterém proband vykoná předem definované dechové manévry. Stejný postup opakuje i pro případ měření spirometrie s elektrodovým EIT pásem. Během experimentu budou zjišťovány následující parametry: inspirační vitální kapacita (IVC), usilovná vitální kapacita (FVC), jednovteřinová vitální kapacita (FEV1), poměr FEV1/FVC a FEV1/VC, maximální expirační průtok (PEF), střední výdechová rychlost (MEF 25, 50, 75). Data budou zpracována v prostředí MATLAB.	
Líší se projekt od standardního postupu v denní praxi: <input checked="" type="checkbox"/> ANO <input type="checkbox"/> NE V případě, že ano, popište rozdíly: Oproti standardnímu spirometrickému vyšetření bude měření funkce plic doplněno o měření pomocí EIT. Metoda EIT je bezpečná neinvazivní monitorovací metoda bez dokumentovaných vedlejších účinků. Bude použit EIT systém PulmoVista 500 s platnou bezpečnostně technickou prohlídkou provedenou firmou Dräger.	

Možná rizika, nesnáze a obtíže pro subjekt hodnocení (včetně etických):	
Všechny použité přístroje mají platnou bezpečnostně technickou kontrolu, pro měření je používán jednorázový spotřební materiál. Jediným dyskomfortem pro probandy je čas strávený při experimentu podle předem dohodnutého programu. Přístroj PulmoVista 500 (Dräger, Německo) se nesmí používat u probandů s kardiostimulátorem, s implantovaným kardioverterem/defibrilátorem (ICD) a u probandů s jinými elektricky aktivními implantáty. Dále se nesmí používat u probandů, jejichž pokožka je v oblasti umístění elektrodového pásu jakkoliv poškozená nebo překrytá obvazovým materiálem. Přístroj PulmoVista 500 by neměl být používán u probandů s nekontrolovanými pohyby těla a u probandů s BMI větším než 50.	
Jak je zajištěna bezpečnost testovaného subjektu:	
Použitím EIT přístroje s platnou bezpečnostně technickou kontrolou. EIT je bezpečná monitorovací technika bez vedlejších účinků. Probandi splňující vylučující kritéria nebudou do studie zařazeni. Soukromí probandů při experimentu a ochrana jejich osobních údajů bude řádně zajištěna v souladu s legislativou a běžnou klinickou praxí.	
Kdo ponese náklady na odškodnění v případě poškození subjektu hodnocení:	
FBMI ČVUT, nicméně riziko je minimalizováno použitím zdravotnických přístrojů s platnou BTK podle zákona 268/2014, které budou navíc provozovány v galvanicky izolované soustavě ZIS.	
C: Charakteristika souboru laboratorních zvířat:	
Druh laboratorních zvířat:	Počet:
Doba trvání celého projektu (datum od-do):	Doba trvání pro jeden subjekt hodnocení:
Jak bude zajištěna péče o zvířata v průběhu experimentu:	
D: Doplnující informace k výzkumnému projektu:	

V Kladně dne

_____ *podpis hlavního řešitele*

C Informovaný souhlas

Informovaný souhlas a informace pro subjekt hodnocení

Název projektu: Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT

Hlavní řešitel: Bc. Anna Miltová

Pracoviště: Fakulta biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze



Vážená studentko, vážený studente,

projekt “Realizace spirometrického vyšetření pomocí EIT (elektrická impedanční tomografie)” je výzkumný projekt prováděný na FBMI ČVUT. Zabývá se možností měřit a vyhodnocovat standartní spirometrické vyšetření pomocí elektrické impedanční tomografie.

Spirometrie je funkční vyšetření plic, které se v klinické praxi běžně používá pro diagnostiku funkce plic a sledování průběhu léčby respiračních onemocnění. Během spirometrického vyšetření se měří statické a dynamické parametry během definovaných dechových manévrů. Výhodou této metody je neinvazivnost a rychlost vyhodnocení. Nevýhodou naopak nutnost použít spirometrický náustek s filtrem, který může ovlivňovat dechový vzor. Z důvodu přidávání jednotlivých komponentů se navyšuje mrtvý objem a dochází k zvětšování průtočného odporu celé měřicí soustavy. Tyto negativní vlastnosti spirometrické metody by mohlo odstranit měření spirometrie právě pomocí elektrické impedanční tomografie.

Elektrická impedanční tomografie je bezpečná, neinvazivní monitorovací technika plicní ventilace využívající vysokofrekvenční elektrické proudy pro zobrazení elektrických vlastností tkání a vnitřních struktur lidského těla. Jednou z možných aplikací v praxi by mohlo být měření a hodnocení plicních objemů při stejných dechových manévrech jako u spirometrického vyšetření.

Cílem tohoto výzkumného projektu je experimentálně porovnat získané parametry ze standardního spirometrického vyšetření a spirometrického vyšetření realizovaného po-

mocí elektrické impedanční tomografie.

Průběh měření:

Experiment bude prováděn na zdravých dobrovolnících (probandech) zejména z řad studentů FBMI. Statické a dynamické plicní objemy budou měřeny za použití EIT systému PulmoVista 500 (Dräger, Německo) a přístroje Ergostik (Geratherm Respiratory GmbH, Německo).

Vybraný proband bude po příchodu na experimentální pracoviště podroben vstupnímu vyšetření, při kterém budou zjištěny následující údaje: jméno, příjmení, pohlaví, datum narození, výška, váha, věk, obvod hrudníku, etnická skupina. Dále bude zaznamenáno, zda proband kouří nebo dříve kouřil, kolik let kouřil a počet cigaret za den. U probandů bude zaznamenáno také zda se léčili nebo aktuálně léčí s nějakým respiračním onemocněním. Proband provede standardní spirometrické vyšetření složené z klidového dýchání, usilovného nádechu a výdechu. Na probanda bude připevněn EIT elektrodový pás, kterým prochází velmi slabý elektrický proud (v souladu s IEC 60601-1), na jehož základě bude měřena elektrická rezistivita. V průběhu celého experimentu budou provedena dvě standardní spirometrická vyšetření spolu s EIT elektrodovým pásem, dvě měření pouze s elektrodovým EIT pásem a dvě standardní spirometrická vyšetření. Pořadí jednotlivých měření bude náhodné. Během experimentu budou zjišťovány následující parametry: inspirační vitální kapacita (IVC), usilovná vitální kapacita (FVC), jednovteřinová vitální kapacita (FEV1), poměr FEV1/FVC a FEV1/VC, maximální expirační průtok (PEF), střední výdechová rychlost (MEF 25, 50, 75). Data budou zpracována v prostředí MATLAB.

Použité měřicí systémy budou provozovány pouze v laboratoři vybavené galvanicky oddělenou elektrorozvodnou sítí ZIS (zdravotnická izolovaná soustava) a zařízení nezbytná pro záznam dat budou napájeny výhradně z bateriového napájecího zdroje. Všechna zařízení mají platnou bezpečnostně-technickou kontrolu.

Vylučovací kritéria a zdravotní rizika:

Přístroj Ergostik pro standardní spirometrické vyšetření nevyžaduje žádná vylučovací kritéria. Přístroj PulmoVista 500 se nesmí používat u probandů s kardiostimulátorem, s implantovaným kardioverterem/defibrilátorem (ICD) a s jinými elektricky aktivními implantáty. Dále se nesmí používat u probandů, jejichž pokožka je v oblasti umístění elektrodového pásu jakkoliv poškozená (poraněná) nebo překrytá obvazovým materiálem. Přístroj PulmoVista 500 by neměl být používán u probandů s nekontrolovanými pohyby těla a u probandů s BMI větším než 50. Proband svým podpisem tohoto informovaného souhlasu stvrzuje, že porozuměl těmto vylučujícím kritériím a že

tato vylučovací kritéria nenaplnuje.

Dyskomfortem pro probandy je čas strávený při experimentu podle předem dohodnutého programu. Kromě uvedených vylučujících kritérií je metoda EIT je bezpečná a nejsou popsány žádné vedlejší účinky ani rizika.

Z naměřených dat nebudou vyvozovány jakékoli závěry o zdravotním stavu probanda. Náklady na odškodnění v případě poškození probanda ponese ČVUT FBMI, nicméně riziko je minimalizováno použitím nových zdravotnických přístrojů s platnou BTK podle zákona 268/2014, které budou navíc provozovány v galvanicky izolované soustavě ZIS.

Účast na experimentu je zcela dobrovolná, bez nároku na jakoukoliv odměnu. Zároveň se nepředpokládají žádné finanční výdaje probanda.

Podepsáním tohoto písemného informovaného souhlasu souhlasíte s tím, že řešitelé a etická komise budou mít umožněn přímý přístup k původní klinické dokumentaci za účelem ověření průběhu studie anebo údajů, aniž dojde k porušení důvěrnosti informací o Vaší osobě, v míře povolené právními předpisy.

Záznamy podle nichž lze identifikovat probanda budou uschovány jako důvěrné a nebudou, v míře zaručené právními předpisy, veřejně zpřístupněny. Budou-li výsledky studie publikovány, totožnost probanda nebude zveřejněna.

Vyskytne-li se informace, která by mohla mít vliv na rozhodnutí probanda, zda pokračovat v účasti ve studii nebo ne, bude proband o této skutečnosti včas informován.

Další informace týkající se této studie a práv probandů lze získat u výše zmíněných řešitelů. V případě poškození zdraví v souvislosti se studií kontaktujte hlavního řešitele projektu.

Z účasti na experimentu může být proband vyloučen z těchto důvodů: kouření a požití alkoholických nápojů před začátkem experimentu, těhotenství, implantovaný kardiostimulátor, ICD, nebo jakýkoliv jiný aktivní implantát, BMI vyšší než 50, poranění v oblasti hrudníku.

Předpokládaná doba trvání experimentu v rámci jednoho probanda je přibližně 30 minut.

Studie se zúčastní přibližně 30-40 probandů.

Vaše účast ve studii je dobrovolná, můžete ji odmítnout nebo můžete od účasti ve studii kdykoliv odstoupit, a to bez udání důvodu a bez jakýchkoliv finančních, právních či jiných následků.

Prohlášení:

Prohlašuji a svým podpisem stvrzuji, že jsem se seznámil(a) a porozuměl(a) všemu výše uvedenému a souhlasím s účastí ve studii. Prohlašuji, že nesplňuji žádné kritérium výše

uvedené, které by neumožňovalo moji účast ve studii.

Jméno probanda:

Datum narození:

Proband byl do studie zařazen pod číslem:

Odpovědný řešitel:

Podpis probanda:

Podpis odpovědného řešitele:

Datum:

Datum:

D Protokol měření

Spirometrické vyšetření pomocí EIT

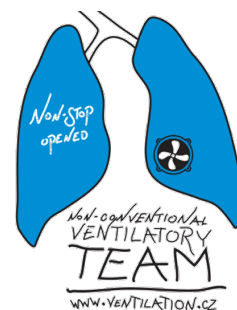
ID probanda:

Datum měření:

Čas měření:

Místo měření:

Protokol vyplnil:



Personální zajištění:

Funkce	Popis činnosti	Jméno a Příjmení	Připraven
Zkousející	Řídí měření		<input type="checkbox"/>
	Zapisuje protokol měření		
Obsluha EIT	Nasazuje elektrodový pás		<input type="checkbox"/>
	Obsluhuje EIT systém PulmoVista 500		
Obsluha spirometru	Obsluhuje spirometr		<input type="checkbox"/>

Technické zajištění

Přístroj	Název	Sériové číslo	Připraveno
EIT	Dräger PulmoVista 500	ASBL-0022	<input type="checkbox"/>
	Monitor	TPAA287841	<input type="checkbox"/>
Spirometr	Geratherm Ergostik	11 8 201 116	<input type="checkbox"/>
Kalibrační stříkačka 3L	Hans Rudolph (spirometer calibration syringe)	557-37215	<input type="checkbox"/>
Osobní váha	Omron BF511	201304-00563F	<input type="checkbox"/>

1. Přípravná část

- Seznámit probanda s průběhem měření.
- Ujistit se, že proband nejméně 1 hodinu před začátkem experimentu nekouřil.
- Ujistit se, že proband nejméně 4 hodiny před začátkem experimentu nepil alkoholické nápoje.
- Ujistit se, že proband nejméně 30 minut před začátkem experimentu nevykonával intenzivní cvičení.
- Ujistit se, že proband nejméně 2 hodiny před začátkem experimentu nejedl větší jídlo.
- Zeptat se probanda, zda nepotřebuje na záchod.
- Vyloučit kontraindikace průběhu experimentu.
- Zapsat identifikační kód (ID) probanda do protokolu a karty probanda.
- Připravit a zapnout všechny přístroje:
 - Spustit počítač, na kterém je nainstalován originální SW pro spirometr.
 - Vyčkat na zahřátí spirometru.
 - Provést kalibraci spirometru:
 - Propojit spirometrickou sondu s USB převodníkem spirometru a počítačem.
 - Provést kalibraci spirometru kalibrační stříkačkou.
 - Nastavit měření nového probanda na spirometru.
 - Zapnout přístroj EIT.
 - Provést kalibraci EIT systému:
 - Provést automatickou kontrolu přístroje - Device Check.
 - Nastavit měření nového probanda na EIT.
- Změřit teplotu, tlak a vlhkost vzduchu v místnosti konání experimentu.

Teplota (°C)	Tlak (kPa)	Vlhkost (%)

- Vyplnit s probandem kartu probanda.
- Umýt si ruce čistou vodou.
- Změřit výšku a váhu probanda bez bot.

Výška (m)	Hmotnost (kg)

- Provést nácvik spirometrického testu s probandem:
 - Správné držení těla.
 - Rychlý a plný nádech.
 - Výdech s maximálním úsilím.

- Odmastit pokožku probanda v oblasti umístění elektrodového pásu.
- Vyhmatat 4. - 6. mezižebří a jeho jednoznačné označení.

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

2. Měření: spirometrické měření bez EIT

- Umístit probandovi do úst spirometrickou sondu připojenou na antibakteriální spirometrický filtr.
- Umístit probandovi kolíček na nos pro vyloučení úniku vzduchu.
- Vyčkat na ustálení hodnoty na nule.
- Ujistit se, že proband je připraven na spirometrické měření.
- Spustit spirometrické měření na počítači.
- Provést čtyři normální nádechy a výdechy.
- Po pátém normálním nádechu provést maximální výdech následovaný maximálním nádechem.
- Po maximálním nádechu provést usilovný a rychlý výdech následovaný maximálním nádechem.
- Vydýchání probanda.
- Pozastavit spirometrické měření na počítači a uložit ho.
- Zaznamenat hodnoty spirometrického měření z monitoru počítače.

Parametr	Jednotka	Referenční hodnota	Naměřená hodnota
FVC	L		
FEV1	L		
FEV1/FVC	%		
FEV1/VC	%		
PEF	L/s		
MEF75	L/s		
MEF50	L/s		
MEF25	L/s		

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

3. Měření: spirometrické měření s EIT

- Odhadnout obvod hrudníku na úrovni označené oblasti.
- Zvolit vhodnou velikost elektrodového pásu na základě odhadu obvodu hrudníku.

Obvod hrudníku (cm)	Barva	Velikost	Zvolená velikost elektrod. pásu
70 až 85	Středně modrá	S	<input type="checkbox"/>
80 až 96	Tmavě modrá	M	<input type="checkbox"/>
92 až 110	Tmavě červená	L	<input type="checkbox"/>
106 až 127	Šedá	XL	<input type="checkbox"/>
124 až 150	Fialová	XXL	<input type="checkbox"/>

- Umístit elektrodový pás na předem označenou pozici 4. - 6. mezižebří na hrudníku probanda.
- Posadit probanda.
- Připojit elektrodový pás k EIT systému PulmoVista 500.
- Zkontrolovat kvalitu signálu elektrodového pásu.
- V případě špatného signálu zkontrolovat kontakt elektrod s pokožkou a aplikace EKG gelu na postižené místo.

Aplikace EKG gelu z důvodu špatného signálu na elektrodu č.

- Zajistit klid v místnosti.
- Umístit probandovi kolíček na nos pro vyloučení úniku vzduchu.
- Spustit záznam EIT.
- Spustit spirometrické měření na počítači.
- Provést pět normálních nádechů a výdechů.
- Po šestém normálním nádechu provést maximální výdech následovaný maximálním nádechem.

- Po maximálním nádechu provést usilovný a rychlý výdech následovaný maximálním nádechem.
- Vydýchání probanda.
- Pozastavit spirometrické měření na počítači.
- Pozastavit záznam EIT.
- Sundat kolíku z nosu probanda.
- Pozastavit EIT záznam.
- Zaznamenat hodnoty spirometrického měření z monitoru počítače.

Parametr	Jednotka	Referenční hodnota	Naměřená hodnota
FVC	L		
FEV1	L		
FEV1/FVC	%		
FEV1/VC	%		
PEF	L/s		
MEF75	L/s		
MEF50	L/s		
MEF25	L/s		

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

4. Měření:

- Spirometrické měření bez EIT**
- Spirometrické měření s EIT**
- Měření pouze s EIT**
- Zajistit klid v místnosti.
- Umístit probandovi kolíček na nos pro vyloučení úniku vzduchu.
- Obnovit záznam EIT.
- Spustit spirometrické měření na počítači.
- Provést čtyři normálních nádechy a výdechy.
- Po pátém normálním nádechu provést maximální výdech následovaný maximálním nádechem.

- Po maximálním nádechu provést usilovný a rychlý výdech následovaný maximálním nádechem.
- Vydýchání probanda.
- Pozastavit spirometrické měření na počítači.
- Pozastavit záznam EIT.
- Sundat kolíku z nosu probanda.
- Pozastavit EIT záznam.
- Zaznamenat hodnoty spirometrického měření z monitoru počítače.

Parametr	Jednotka	Referenční hodnota	Naměřená hodnota
FVC	L		
FEV1	L		
FEV1/FVC	%		
FEV1/VC	%		
PEF	L/s		
MEF75	L/s		
MEF50	L/s		
MEF25	L/s		

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

5. Měření:

- Spirometrické měření bez EIT**
- Spirometrické měření s EIT**
- Měření pouze s EIT**
- Zajistit klid v místnosti.
- Umístit probandovi kolíček na nos pro vyloučení úniku vzduchu.
- Obnovit záznam EIT.
- Spustit spirometrické měření na počítači.
- Provést čtyři normálních nádechy a výdechy.
- Po pátém normálním nádechu provést maximální výdech následovaný maximálním nádechem.
- Po maximálním nádechu provést usilovný a rychlý výdech následovaný maximálním nádechem.
- Vydýchání probanda.
- Pozastavit spirometrické měření na počítači.
- Pozastavit záznam EIT.
- Sundat kolíku z nosu probanda.
- Pozastavit EIT záznam.
- Zaznamenat hodnoty spirometrického měření z monitoru počítače.

Parametr	Jednotka	Referenční hodnota	Naměřená hodnota
FVC	L		
FEV1	L		
FEV1/FVC	%		
FEV1/VC	%		
PEF	L/s		
MEF75	L/s		
MEF50	L/s		
MEF25	L/s		

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

6. Měření:

- Spirometrické měření bez EIT**
- Spirometrické měření s EIT**
- Měření pouze s EIT**
- Zajistit klid v místnosti.
- Umístit probandovi kolíček na nos pro vyloučení úniku vzduchu.
- Obnovit záznam EIT.
- Spustit spirometrické měření na počítači.
- Provést čtyři normálních nádechy a výdechy.
- Po pátém normálním nádechu provést maximální výdech následovaný maximálním nádechem.
- Po maximálním nádechu provést usilovný a rychlý výdech následovaný maximálním nádechem.
- Vydýchání probanda.
- Pozastavit spirometrické měření na počítači.
- Pozastavit záznam EIT.
- Sundat kolíku z nosu probanda.
- Pozastavit EIT záznam.
- Zaznamenat hodnoty spirometrického měření z monitoru počítače.

Parametr	Jednotka	Referenční hodnota	Naměřená hodnota
FVC	L		
FEV1	L		
FEV1/FVC	%		
FEV1/VC	%		
PEF	L/s		
MEF75	L/s		
MEF50	L/s		
MEF25	L/s		

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

7. Měření:

- Spirometrické měření bez EIT**
- Spirometrické měření s EIT**
- Měření pouze s EIT**
- Zajistit klid v místnosti.
- Umístit probandovi kolíček na nos pro vyloučení úniku vzduchu.
- Obnovit záznam EIT.
- Spustit spirometrické měření na počítači.
- Provést čtyři normálních nádechy a výdechy.
- Po pátém normálním nádechu provést maximální výdech následovaný maximálním nádechem.
- Po maximálním nádechu provést usilovný a rychlý výdech následovaný maximálním nádechem.
- Vydýchání probanda.
- Pozastavit spirometrické měření na počítači.
- Pozastavit záznam EIT.
- Sundat kolíku z nosu probanda.
- Pozastavit EIT záznam.
- Zaznamenat hodnoty spirometrického měření z monitoru počítače.

Parametr	Jednotka	Referenční hodnota	Naměřená hodnota
FVC	L		
FEV1	L		
FEV1/FVC	%		
FEV1/VC	%		
PEF	L/s		
MEF75	L/s		
MEF50	L/s		
MEF25	L/s		

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

8. Ukončení měření s EIT

- Sejmout z probanda elektrodový pás.
- Odpojit soustavu elektrod z elektrodového pásu.
- Očistit a uklidit pás.
- Nebude-li následovat měření dalšího probanda:
 - Zálohovat data z EIT systému PulmoVista 500 na externí disk nebo Flash disk.
 - Vypnout přístroj PulmoVista 500.
 - Uvést pracoviště do původního stavu.

9. Ukončení měření spirometrie a experimentu

- Očištění spirometrické sondy.
- Nebude-li následovat měření dalšího probanda:
 - Zálohovat data z počítače připojeného ke spirometru.
 - Vypnout všechny použité přístroje.
 - Očistit použité přístroje a uložit je na příslušná místa.
 - Uvést pracoviště do původního stavu.

Poznámky, záznam nestandardních jevů:

E Karta probanda

Karta probanda

Výzkumný projekt:

Realizace spirometrického vyšetření pomocí
EIT

ID probanda:

Základní údaje:	
Jméno:	Příjmení:
Pohlaví: muž <input type="checkbox"/> žena <input type="checkbox"/>	
Datum narození:	Místo bydliště:
Věk:	Kontakt:
Etnická skupina: kavkazský <input type="checkbox"/> černošský <input type="checkbox"/> asijský <input type="checkbox"/>	

Naměřené údaje:	
Výška (cm):	Hmotnost (kg):
BMI (kg·m⁻²):	
Obvod hrudníku (cm):	

Informace o zdravotním stavu:		
Nemoci respirační soustavy:	Astma:	<input type="checkbox"/> ano <input type="checkbox"/> ne
	Jiné:	
Prodělané nemoci respirační soustavy:		
Další onemocnění:		
Aktivní implantáty:		
Aktuální zdravotní stav:	<input type="checkbox"/> zdravý	<input type="checkbox"/> nemocný
Kuřák v současnosti:	<input type="checkbox"/> ano	<input type="checkbox"/> ne
dříve:	<input type="checkbox"/> ano	<input type="checkbox"/> ne
počet let kouření:		počet cigaret za den:

Doplňující informace:

Množství přijaté potravy za poslední dvě hodiny:

Čas posledního většího jídla:

Sportovní aktivita (četnost, typ):

Poznámky:

Proband podepsal informovaný souhlas:

ano

ne

Zaznamenal:

Dne:

F Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Tabulka F.1: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 02

Proband 02	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,04
	FEV ₁	-	-	4,28
	TI	-	-	0,85
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,73
	FEV ₁	-	-	4,81
	TI	-	-	0,84
EIT	FVC	$4,71 \cdot 10^4$	5,15	-
	FEV ₁	$4,13 \cdot 10^4$	4,50	-
	TI	0,88	0,88	-
EIT	FVC	$4,94 \cdot 10^4$	5,40	-
	FEV ₁	$4,33 \cdot 10^4$	4,73	-
	TI	0,88	0,88	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,98 \cdot 10^4$	5,18	5,45
	FEV ₁	$4,51 \cdot 10^4$	4,69	4,5
	TI	0,91	0,91	0,83
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,59 \cdot 10^4$	5,24	5,31
	FEV ₁	$4,26 \cdot 10^4$	4,87	4,43
	TI	0,93	0,93	0,84
$sens_{avg_1}$ (L/AU)		$1,04 \cdot 10^{-4}$		
$sens_{avg_2}$ (L/AU)		$1,14 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.2: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 03

Proband 03	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,9
	FEV ₁	-	-	3,61
	TI	-	-	0,93
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,96
	FEV ₁	-	-	4,71
	TI	-	-	0,94
EIT	FVC	$4,12 \cdot 10^4$	3,29	-
	FEV ₁	$3,68 \cdot 10^4$	2,93	-
	TI	0,90	0,90	-
EIT	FVC	$4,76 \cdot 10^4$	3,80	-
	FEV ₁	$4,22 \cdot 10^4$	3,37	-
	TI	0,89	0,89	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$5,29 \cdot 10^4$	4,02	3,79
	FEV ₁	$4,66 \cdot 10^4$	3,55	3,57
	TI	0,89	0,89	0,94
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,66 \cdot 10^4$	3,89	3,77
	FEV ₁	$3,82 \cdot 10^4$	3,20	3,46
	TI	0,82	0,82	0,92
$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$7,62 \cdot 10^{-5}$			
$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$8,36 \cdot 10^{-5}$			

Tabulka F.3: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 04

Proband 04	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,05
	FEV ₁	-	-	4,96
	TI	-	-	3,29
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,91
	FEV ₁	-	-	4,21
	TI	-	-	0,86
EIT	FVC	$2,30 \cdot 10^4$	5,21	-
	FEV ₁	$1,86 \cdot 10^4$	4,21	-
	TI	0,81	0,81	-
EIT	FVC	-	-	-
	FEV ₁	-	-	-
	TI	-	-	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,18 \cdot 10^4$	5,20	5,01
	FEV ₁	$1,93 \cdot 10^4$	4,60	4,03
	TI	0,89	0,89	0,80
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,20 \cdot 10^4$	4,72	5,00
	FEV ₁	$1,86 \cdot 10^4$	4,00	3,99
	TI	0,85	0,85	0,80
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$2,38 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$2,15 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.4: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 05

Proband 05	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,94
	FEV ₁	-	-	4,71
	TI	-	-	0,95
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,16
	FEV ₁	-	-	4,76
	TI	-	-	0,92
EIT	FVC	$2,57 \cdot 10^4$	3,96	-
	FEV ₁	$2,46 \cdot 10^4$	3,80	-
	TI	0,96	-	-
EIT	FVC	-	-	-
	FEV ₁	-	-	-
	TI	-	-	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,99 \cdot 10^4$	4,77	5,11
	FEV ₁	$2,90 \cdot 10^4$	4,61	4,98
	TI	0,97	0,97	0,97
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,26 \cdot 10^4$	4,87	5,22
	FEV ₁	$3,02 \cdot 10^4$	4,51	4,92
	TI	0,93	0,93	0,94
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,59 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,49 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.5: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 06

Proband 06	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spiometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	2,67
	FEV ₁	-	-	2,54
	TI	-	-	0,95
Standardní spirometrie	FVC	-	-	2,89
	FEV ₁	-	-	2,55
	TI	-	-	0,88
EIT	FVC	$2,87 \cdot 10^4$	2,25	-
	FEV ₁	$2,54 \cdot 10^4$	2,00	-
	TI	0,89	0,89	-
EIT	FVC	$2,87 \cdot 10^4$	2,25	-
	FEV ₁	$2,63 \cdot 10^4$	2,06	-
	TI	0,92	0,92	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,90 \cdot 10^4$	1,89	2,21
	FEV ₁	$2,54 \cdot 10^4$	1,66	2,03
	TI	0,89	0,89	0,92
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,20 \cdot 10^4$	2,94	2,64
	FEV ₁	$3,13 \cdot 10^4$	2,87	2,47
	TI	0,98	0,98	0,94
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$6,52 \cdot 10^{-5}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$9,19 \cdot 10^{-5}$		

Tabulka F.6: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 07

Proband 07	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spiometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,72
	FEV ₁	-	-	4,07
	TI	-	-	0,86
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,28
	FEV ₁	-	-	3,47
	TI	-	-	0,81
EIT	FVC	$4,27 \cdot 10^4$	4,03	-
	FEV ₁	$3,19 \cdot 10^4$	3,01	-
	TI	0,75	0,75	-
EIT	FVC	-	-	-
	FEV ₁	-	-	-
	TI	-	-	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,76 \cdot 10^4$	4,33	4,66
	FEV ₁	$3,82 \cdot 10^4$	3,47	3,77
	TI	0,80	0,80	0,81
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,47 \cdot 10^4$	4,39	4,55
	FEV ₁	$2,50 \cdot 10^4$	2,46	3,72
	TI	0,56	0,56	0,82
<i>sens_{avg2}</i> (L/AU)		$9,82 \cdot 10^{-5}$		

Tabulka F.7: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 08

Proband 08	Parametr	<i>biimpedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spiometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,79
	FEV ₁	-	-	3,54
	TI	-	-	0,74
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,69
	FEV ₁	-	-	2,81
	TI	-	-	0,76
EIT	FVC	$3,72 \cdot 10^4$	4,43	-
	FEV ₁	$3,18 \cdot 10^4$	3,80	-
	TI	0,86	0,86	-
EIT	FVC	$3,10 \cdot 10^4$	3,70	-
	FEV ₁	$2,47 \cdot 10^4$	2,95	-
	TI	0,80	0,80	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,28 \cdot 10^4$	3,62	3,57
	FEV ₁	$2,77 \cdot 10^4$	3,05	2,61
	TI	0,84	0,84	0,73
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,29 \cdot 10^4$	4,22	3,83
	FEV ₁	$2,86 \cdot 10^4$	3,68	2,76
	TI	0,87	0,87	0,72
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,10 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,29 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.8: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 09

Proband 09	Parametr	<i>biimpedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,66
	FEV ₁	-	-	3,77
	TI	-	-	0,81
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,80
	FEV ₁	-	-	4,47
	TI	-	-	0,77
EIT	FVC	$3,20 \cdot 10^4$	4,90	-
	FEV ₁	$2,51 \cdot 10^4$	3,84	-
	TI	0,78	0,78	-
EIT	FVC	$3,77 \cdot 10^4$	5,76	-
	FEV ₁	$2,89 \cdot 10^4$	4,42	-
	TI	0,77	0,77	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,71 \cdot 10^4$	5,87	5,93
	FEV ₁	$3,21 \cdot 10^4$	4,69	5,00
	TI	0,80	0,80	0,84
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,60 \cdot 10^4$	5,82	5,87
	FEV ₁	$2,68 \cdot 10^4$	4,28	4,77
	TI	0,73	0,73	0,81
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,46 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,60 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.9: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 10

Proband 10	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	6,37
	FEV ₁	-	-	3,75
	TI	-	-	0,59
Standardní spirometrie	FVC	-	-	6,18
	FEV ₁	-	-	4,83
	TI	-	-	0,78
EIT	FVC	$3,48 \cdot 10^4$	3,97	-
	FEV ₁	$1,13 \cdot 10^4$	1,30	-
	TI	0,33	0,33	-
EIT	FVC	-	-	-
	FEV ₁	-	-	-
	TI	-	-	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,98 \cdot 10^4$	5,65	6,07
	FEV ₁	$2,66 \cdot 10^4$	3,01	3,79
	TI	0,53	0,53	0,62
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$5,10 \cdot 10^4$	5,87	6,13
	FEV ₁	$2,91 \cdot 10^4$	3,34	3,68
	TI	0,73	0,57	0,60
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,13 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,15 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.10: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 11

Proband 11	Parametr	<i>biimpedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,43
	FEV ₁	-	-	3,96
	TI	-	-	0,89
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,81
	FEV ₁	-	-	3,61
	TI	-	-	0,95
EIT	FVC	$3,75 \cdot 10^4$	2,78	-
	FEV ₁	$3,10 \cdot 10^4$	2,30	-
	TI	0,83	0,83	-
EIT	FVC	$4,02 \cdot 10^4$	2,98	-
	FEV ₁	$3,55 \cdot 10^4$	2,63	-
	TI	0,88	0,88	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,60 \cdot 10^4$	2,99	3,38
	FEV ₁	$3,52 \cdot 10^4$	2,93	3,28
	TI	0,98	0,98	0,97
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,43 \cdot 10^4$	2,88	4,08
	FEV ₁	$4,25 \cdot 10^4$	2,76	3,82
	TI	0,96	0,96	0,94
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$8,32 \cdot 10^{-5}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$6,50 \cdot 10^{-5}$		

Tabulka F.11: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 12

Proband 12	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,9
	FEV ₁	-	-	3,43
	TI	-	-	0,88
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,16
	FEV ₁	-	-	3,16
	TI	-	-	1
EIT	FVC	$2,53 \cdot 10^4$	3,80	-
	FEV ₁	$2,04 \cdot 10^4$	3,06	-
	TI	0,81	0,81	-
EIT	FVC	$2,39 \cdot 10^4$	3,58	-
	FEV ₁	$1,99 \cdot 10^4$	2,98	-
	TI	0,83	0,83	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,20 \cdot 10^4$	3,85	3,66
	FEV ₁	$2,00 \cdot 10^4$	3,50	3,31
	TI	0,91	0,91	0,90
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,07 \cdot 10^4$	3,86	3,70
	FEV ₁	$2,82 \cdot 10^4$	3,54	3,42
	TI	0,92	0,92	0,93
$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,75 \cdot 10^{-4}$			
$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,25 \cdot 10^{-4}$			

Tabulka F.12: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 13

Proband 13	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,34
	FEV ₁	-	-	3,66
	TI	-	-	0,84
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,42
	FEV ₁	-	-	3,83
	TI	-	-	0,87
EIT	FVC	$4,53 \cdot 10^4$	3,42	-
	FEV ₁	$3,90 \cdot 10^4$	2,44	-
	TI	0,86	0,86	-
EIT	FVC	$3,76 \cdot 10^4$	4,12	-
	FEV ₁	$2,69 \cdot 10^4$	3,54	-
	TI	0,71	0,71	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,74 \cdot 10^4$	3,92	4,32
	FEV ₁	$4,37 \cdot 10^4$	3,62	3,72
	TI	0,92	0,92	0,86
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,19 \cdot 10^4$	4,15	4,29
	FEV ₁	$3,75 \cdot 10^4$	3,71	3,69
	TI	0,89	0,89	0,86
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$8,28 \cdot 10^{-5}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$9,91 \cdot 10^{-5}$		

Tabulka F.13: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 14

Proband 14	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spiometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	2,88
	FEV ₁	-	-	2,85
	TI	-	-	0,99
Standardní spirometrie	FVC	-	-	2,45
	FEV ₁	-	-	2,44
	TI	-	-	1
EIT	FVC	$2,97 \cdot 10^4$	5,30	-
	FEV ₁	$2,79 \cdot 10^4$	5,00	-
	TI	0,94	0,94	-
EIT	FVC	$3,00 \cdot 10^4$	5,34	-
	FEV ₁	$2,74 \cdot 10^4$	4,88	-
	TI	0,91	0,91	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,74 \cdot 10^4$	5,50	2,84
	FEV ₁	$2,72 \cdot 10^4$	5,47	2,84
	TI	1	1	1
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,06 \cdot 10^4$	4,77	2,88
	FEV ₁	$2,81 \cdot 10^4$	4,38	2,81
	TI	0,92	0,92	0,97
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$2,01 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,56 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.14: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 15

Proband 15	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spiometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,12
	FEV ₁	-	-	2,95
	TI	-	-	0,72
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,21
	FEV ₁	-	-	3,76
	TI	-	-	0,89
EIT	FVC	$3,75 \cdot 10^4$	3,15	-
	FEV ₁	$3,16 \cdot 10^4$	2,65	-
	TI	0,84	0,84	-
EIT	FVC	$3,76 \cdot 10^4$	3,16	-
	FEV ₁	$3,05 \cdot 10^4$	2,56	-
	TI	0,81	0,81	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,90 \cdot 10^4$	3,44	4,23
	FEV ₁	$3,32 \cdot 10^4$	2,93	3,74
	TI	0,85	0,85	0,88
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,01 \cdot 10^4$	3,20	4,04
	FEV ₁	$3,54 \cdot 10^4$	2,83	3,81
	TI	0,88	0,88	0,94
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$8,83 \cdot 10^{-5}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$7,97 \cdot 10^{-5}$		

Tabulka F.15: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 16

Proband 16	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,11
	FEV ₁	-	-	3,23
	TI	-	-	0,78
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,03
	FEV ₁	-	-	3,19
	TI	-	-	0,79
EIT	FVC	$3,61 \cdot 10^4$	3,63	-
	FEV ₁	$2,03 \cdot 10^4$	2,04	-
	TI	0,56	0,56	-
EIT	FVC	$3,59 \cdot 10^4$	3,61	-
	FEV ₁	$2,74 \cdot 10^4$	2,75	-
	TI	0,76	0,76	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,66 \cdot 10^4$	3,69	3,98
	FEV ₁	$3,22 \cdot 10^4$	3,23	3,15
	TI	0,88	0,88	0,79
Stand. spirometrie+EIT	FVC	-	-	-
	FEV ₁	-	-	-
	TI	-	-	-
$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,01 \cdot 10^{-4}$			
$sens_{avg_2}$ (L/AU)	-			

Tabulka F.16: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 17

Proband 17	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,44
	FEV ₁	-	-	4,35
	TI	-	-	0,80
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,42
	FEV ₁	-	-	4,26
	TI	-	-	0,79
EIT	FVC	$2,74 \cdot 10^4$	4,56	-
	FEV ₁	$2,33 \cdot 10^4$	3,90	-
	TI	0,86	0,86	-
EIT	FVC	$3,06 \cdot 10^4$	5,09	-
	FEV ₁	$2,56 \cdot 10^4$	4,27	-
	TI	0,84	0,84	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,25 \cdot 10^4$	5,24	5,42
	FEV ₁	$3,01 \cdot 10^4$	4,96	4,22
	TI	0,95	0,95	0,78
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,46 \cdot 10^4$	5,93	5,47
	FEV ₁	$2,81 \cdot 10^4$	4,83	4,24
	TI	0,81	0,81	0,78
$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,61 \cdot 10^{-4}$			
$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,72 \cdot 10^{-4}$			

Tabulka F.17: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 18

Proband 18	Parametr	<i>biimpedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,67
	FEV ₁	-	-	3,04
	TI	-	-	0,83
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,61
	FEV ₁	-	-	2,97
	TI	-	-	0,82
EIT	FVC	$2,14 \cdot 10^4$	4,58	-
	FEV ₁	$1,82 \cdot 10^4$	3,70	-
	TI	0,85	0,85	-
EIT	FVC	$2,56 \cdot 10^4$	5,49	-
	FEV ₁	$2,13 \cdot 10^4$	4,56	-
	TI	0,83	0,83	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$1,96 \cdot 10^4$	5,08	3,55
	FEV ₁	$1,75 \cdot 10^4$	4,57	2,91
	TI	0,90	0,90	0,82
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,55 \cdot 10^4$	4,27	3,65
	FEV ₁	$2,33 \cdot 10^4$	3,91	2,91
	TI	0,91	0,91	0,80
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$2,60 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,68 \cdot 10^{-4}$		

Tabulka F.18: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 19

Proband 19	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,92
	FEV ₁	-	-	4,11
	TI	-	-	0,84
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,89
	FEV ₁	-	-	4,53
	TI	-	-	0,93
EIT	FVC	$3,26 \cdot 10^4$	4,20	-
	FEV ₁	$2,88 \cdot 10^4$	3,70	-
	TI	0,88	0,88	-
EIT	FVC	$3,60 \cdot 10^4$	4,63	-
	FEV ₁	$3,17 \cdot 10^4$	4,08	-
	TI	0,88	0,88	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,37 \cdot 10^4$	4,27	4,62
	FEV ₁	$2,66 \cdot 10^4$	3,38	4,00
	TI	0,79	0,79	0,87
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,74 \cdot 10^4$	4,88	4,35
	FEV ₁	$3,30 \cdot 10^4$	4,29	3,97
	TI	0,88	0,88	0,91
$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,27 \cdot 10^{-4}$			
$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,30 \cdot 10^{-4}$			

Tabulka F.19: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 20

Proband 20	Parametr	<i>biimpedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,60
	FEV ₁	-	-	3,85
	TI	-	-	0,69
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,25
	FEV ₁	-	-	5,04
	TI	-	-	3,67
EIT	FVC	$2,62 \cdot 10^4$	6,16	-
	FEV ₁	$1,40 \cdot 10^4$	3,30	-
	TI	0,53	0,53	-
EIT	FVC	$3,15 \cdot 10^4$	7,42	-
	FEV ₁	$2,38 \cdot 10^4$	5,59	-
	TI	0,75	0,75	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,68 \cdot 10^4$	6,31	5,21
	FEV ₁	$1,59 \cdot 10^4$	3,73	3,46
	TI	0,59	0,59	0,66
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,95 \cdot 10^4$	6,96	5,72
	FEV ₁	$2,17 \cdot 10^4$	5,11	4,12
	TI	0,73	0,73	0,72
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$2,35 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$2,36 \cdot 10^{-4}$		

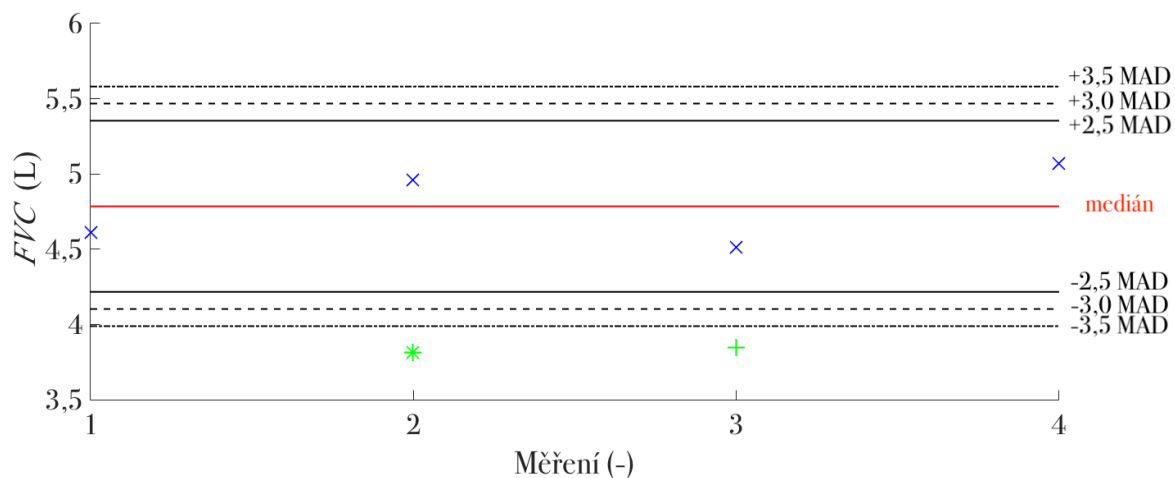
Tabulka F.20: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 21

Proband 21	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spirometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,27
	FEV ₁	-	-	4,39
	TI	-	-	0,83
Standardní spirometrie	FVC	-	-	5,41
	FEV ₁	-	-	4,57
	TI	-	-	0,84
EIT	FVC	$4,09 \cdot 10^4$	5,34	-
	FEV ₁	$3,57 \cdot 10^4$	4,66	-
	TI	0,87	0,87	-
EIT	FVC	$3,42 \cdot 10^4$	4,46	-
	FEV ₁	$2,44 \cdot 10^4$	3,19	-
	TI	0,72	0,72	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$4,00 \cdot 10^4$	5,25	5,35
	FEV ₁	$3,49 \cdot 10^4$	4,57	4,47
	TI	0,87	0,87	0,83
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,46 \cdot 10^4$	4,50	5,32
	FEV ₁	$3,17 \cdot 10^4$	4,11	4,46
	TI	0,91	0,91	0,87
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,31 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,30 \cdot 10^{-4}$		

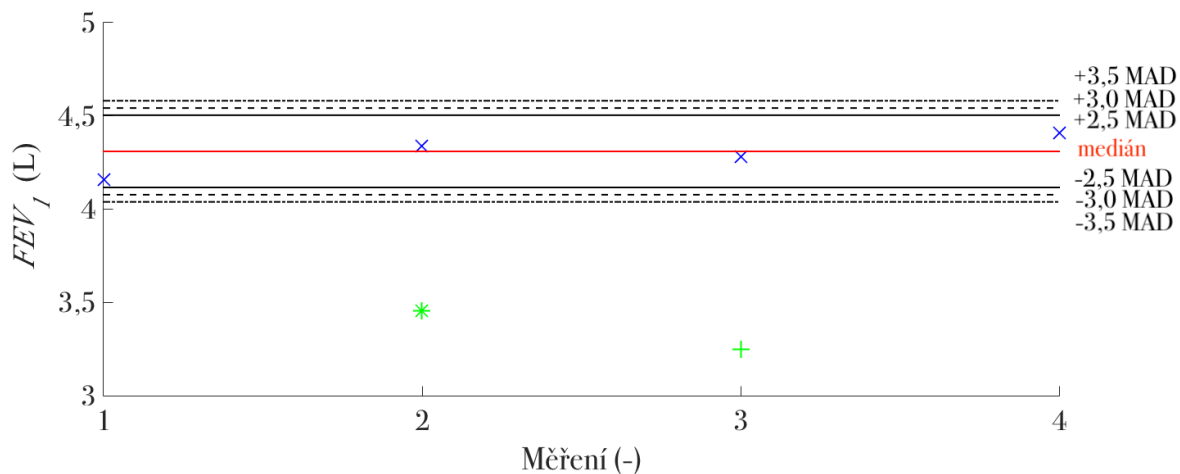
Tabulka F.21: Naměřené a vypočtené hodnoty ze všech měření pro probanda 22

Proband 22	Parametr	<i>biompedance</i> (AU -)	<i>volume</i> (L -)	spiometr (L -)
Standardní spirometrie	FVC	-	-	4,27
	FEV ₁	-	-	3,85
	TI	-	-	0,90
Standardní spirometrie	FVC	-	-	3,7
	FEV ₁	-	-	3,67
	TI	-	-	0,99
EIT	FVC	$3,07 \cdot 10^4$	5,41	-
	FEV ₁	$2,26 \cdot 10^4$	3,98	-
	TI	0,74	0,74	-
EIT	FVC	$2,87 \cdot 10^4$	5,06	-
	FEV ₁	$2,51 \cdot 10^4$	4,42	-
	TI	0,87	0,87	-
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$3,00 \cdot 10^4$	5,24	4,28
	FEV ₁	$2,59 \cdot 10^4$	4,53	3,79
	TI	0,86	0,86	0,88
Stand. spirometrie+EIT	FVC	$2,97 \cdot 10^4$	5,27	4,36
	FEV ₁	$2,52 \cdot 10^4$	4,47	3,81
	TI	0,85	0,85	0,87
	$sens_{avg_1}$ (L/AU)	$1,75 \cdot 10^{-4}$		
	$sens_{avg_2}$ (L/AU)	$1,77 \cdot 10^{-4}$		

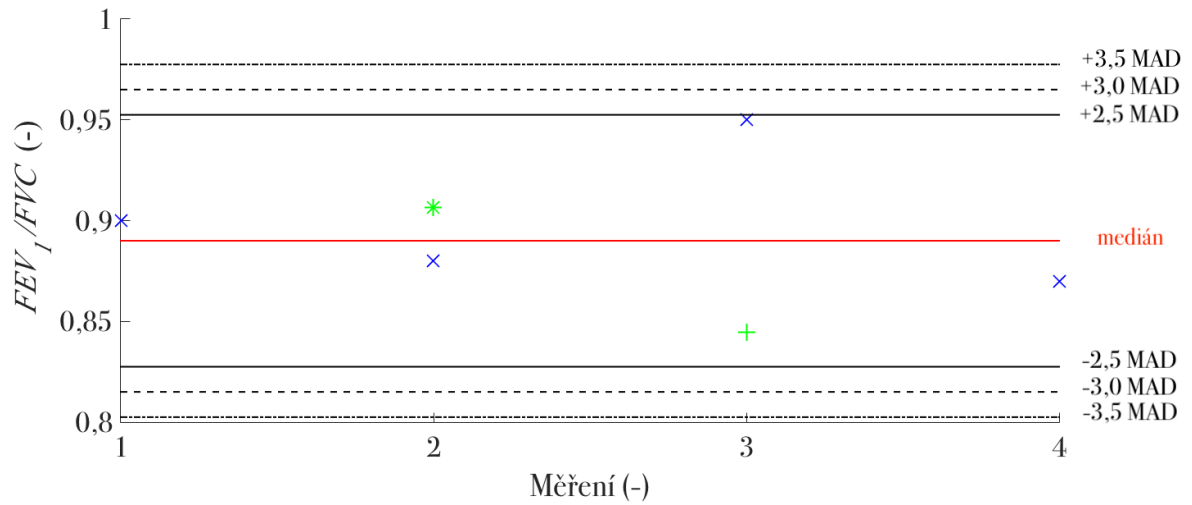
G Výsledky z odděleného EIT a spirometrického vyšetření



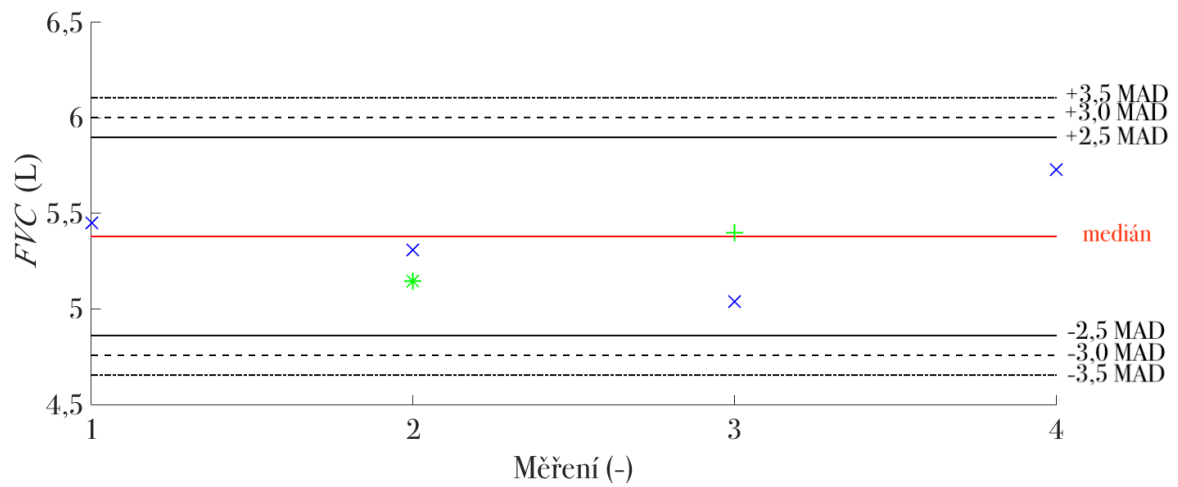
Obrázek G.1: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 01.



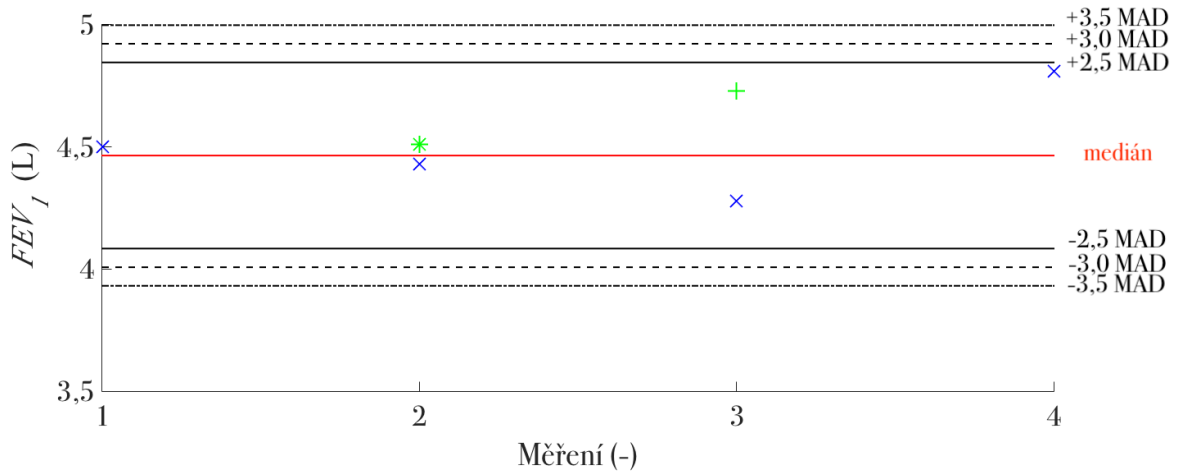
Obrázek G.2: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 01.



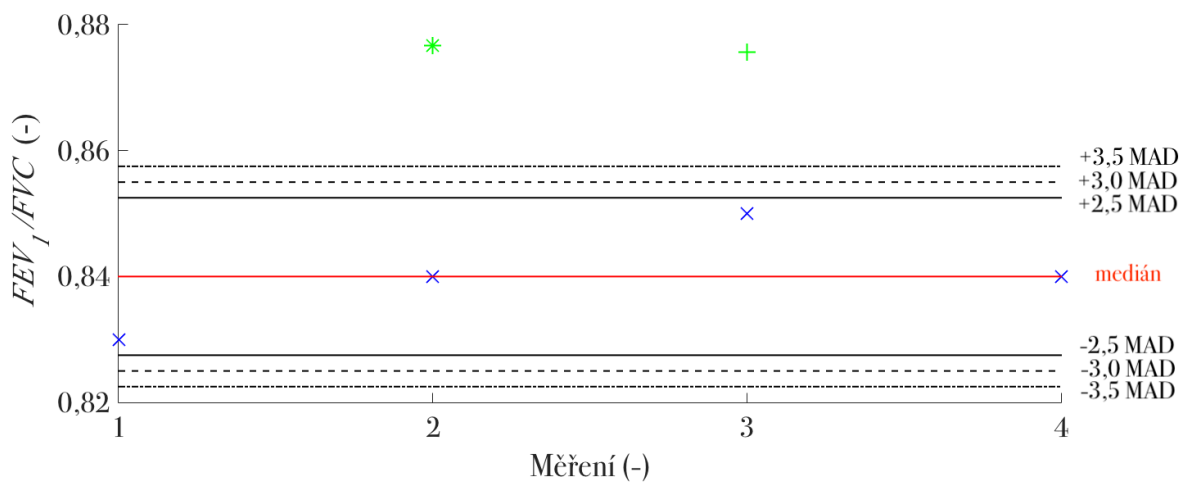
Obrázek G.3: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 01.



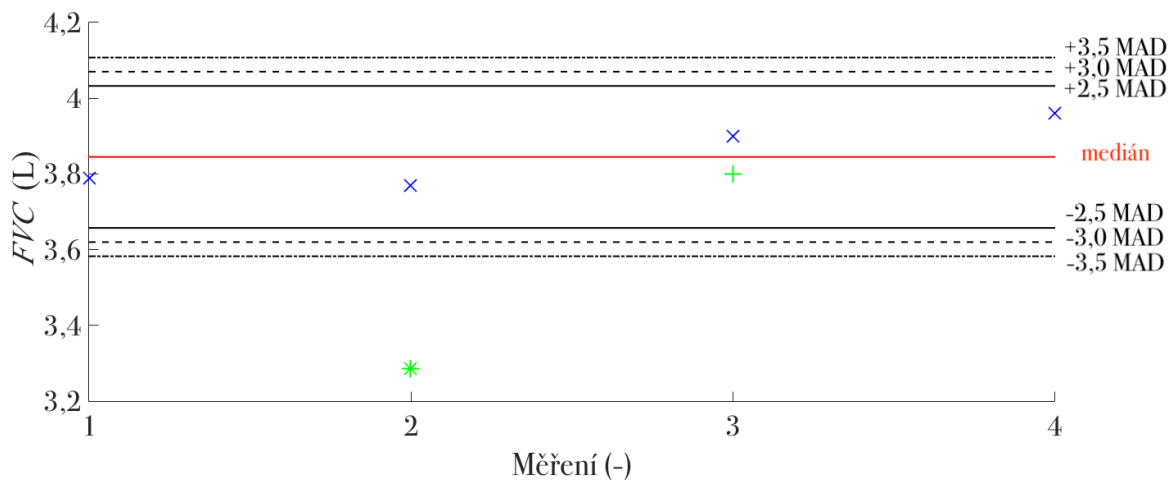
Obrázek G.4: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 02.



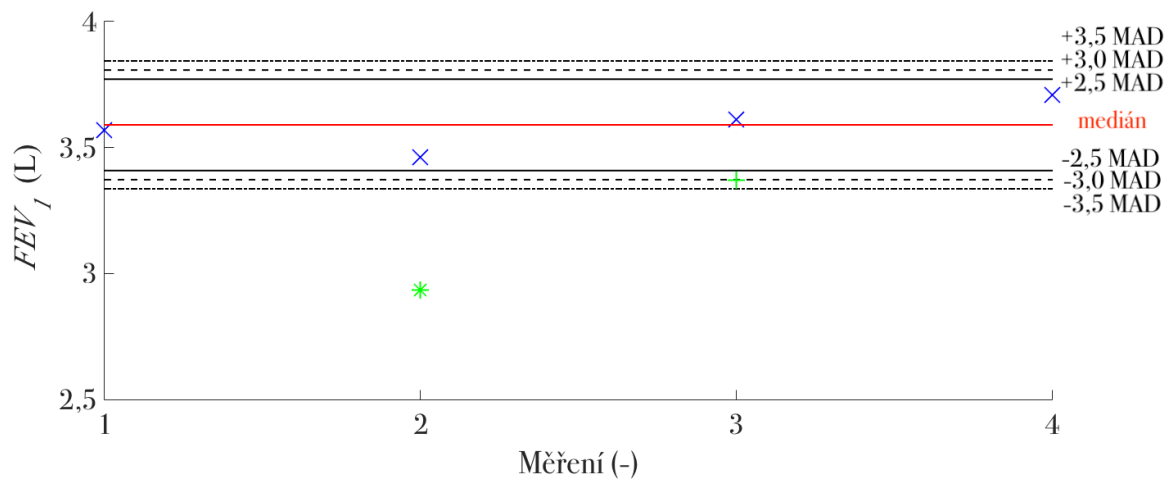
Obrázek G.5: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 02.



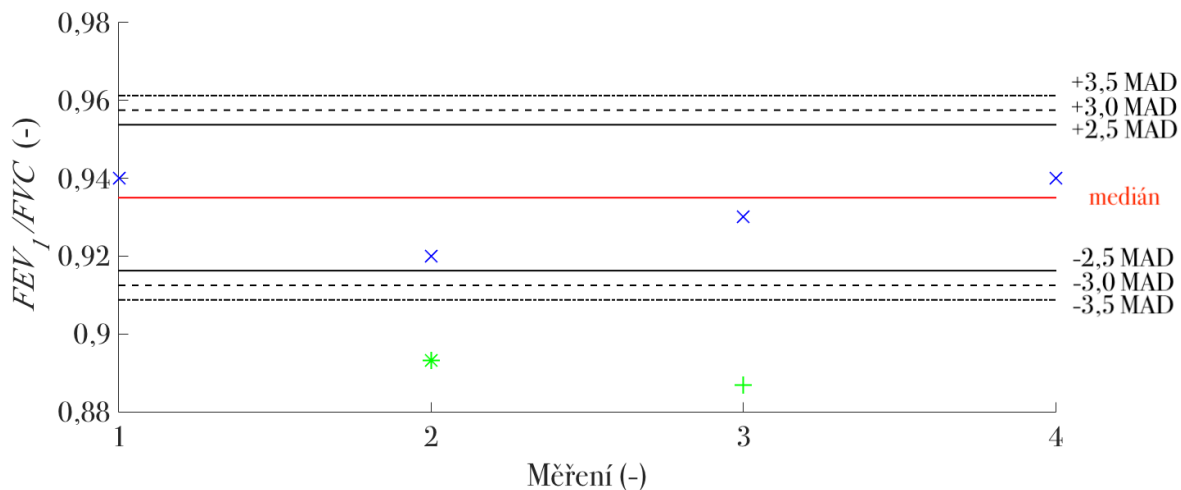
Obrázek G.6: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 02.



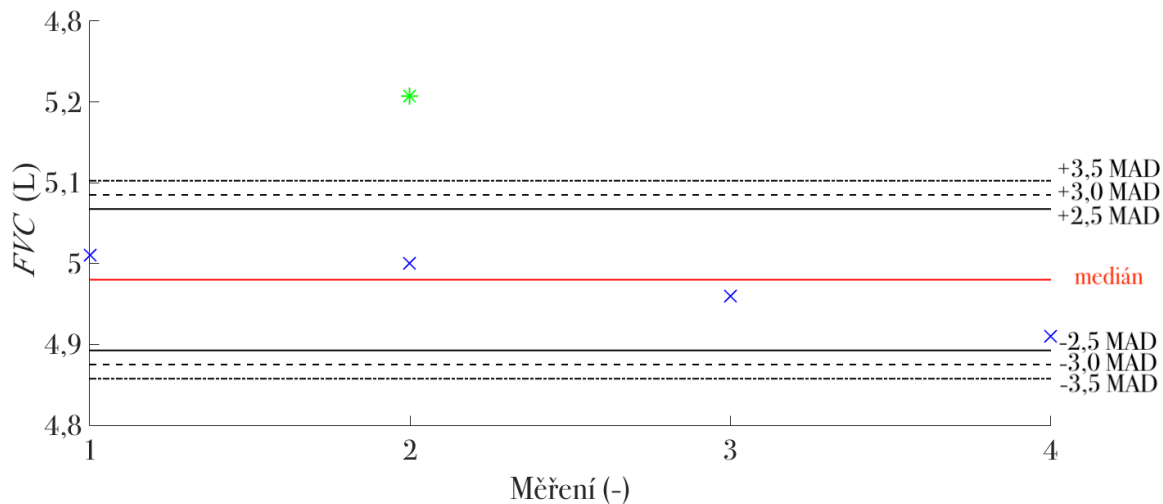
Obrázek G.7: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 03.



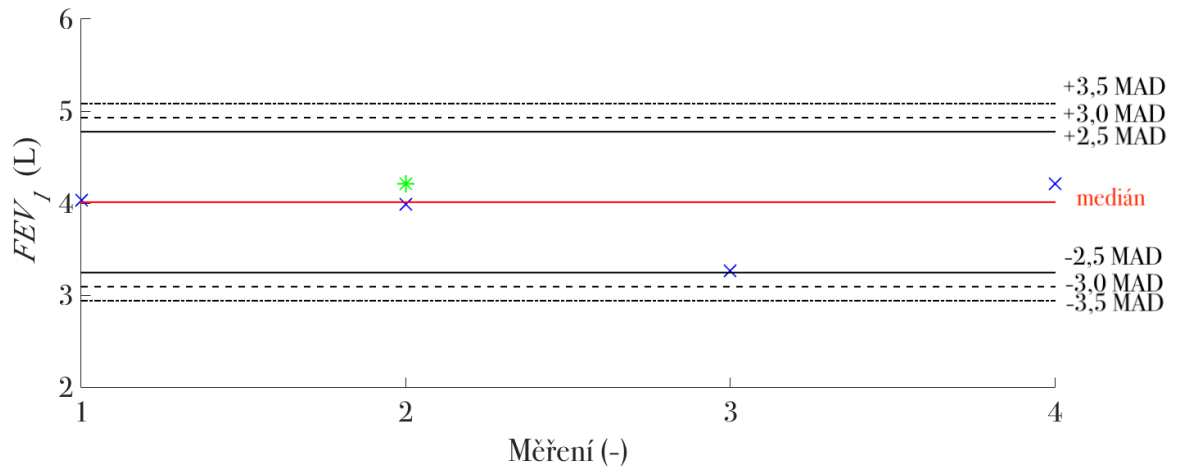
Obrázek G.8: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 03.



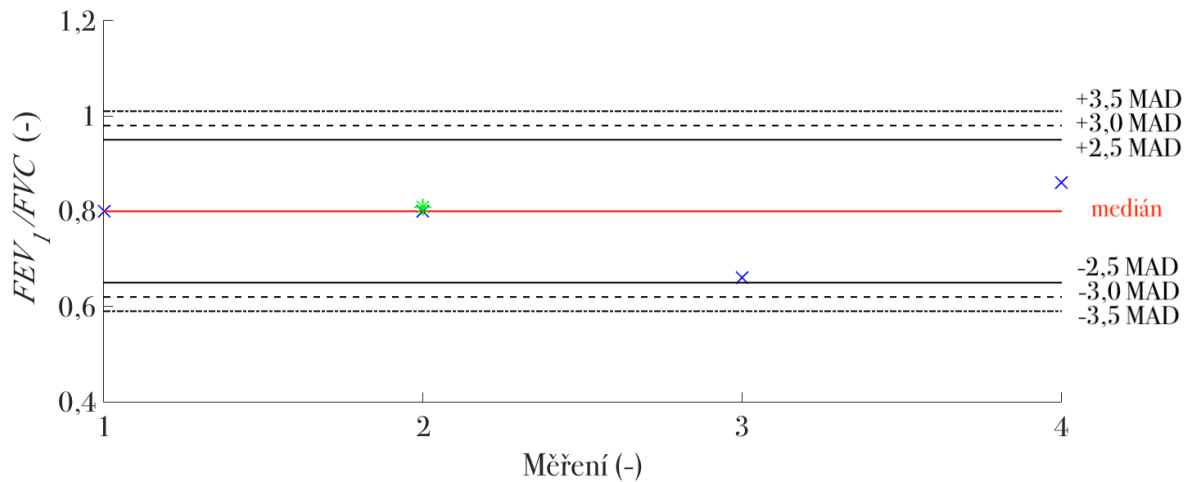
Obrázek G.9: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 03.



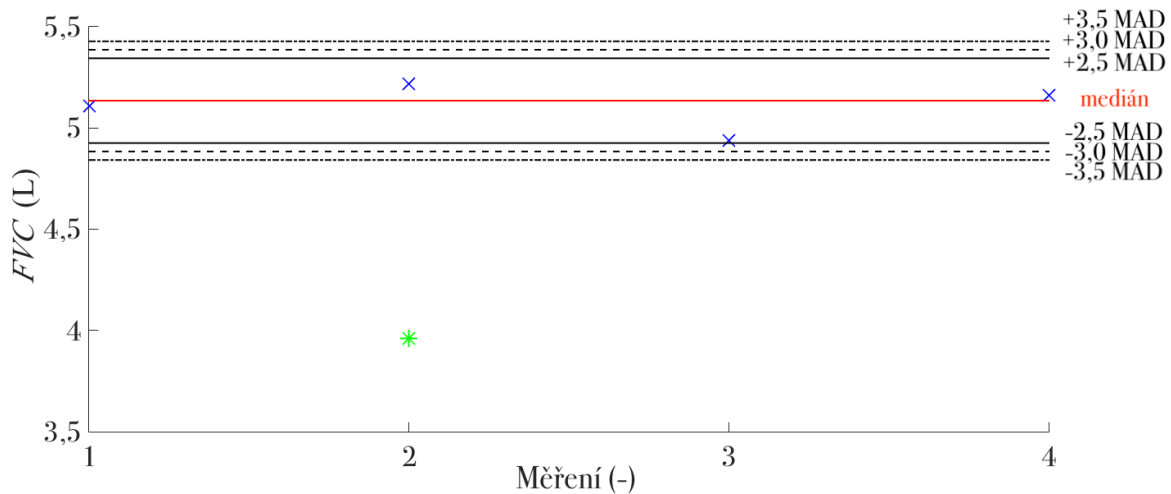
Obrázek G.10: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 04.



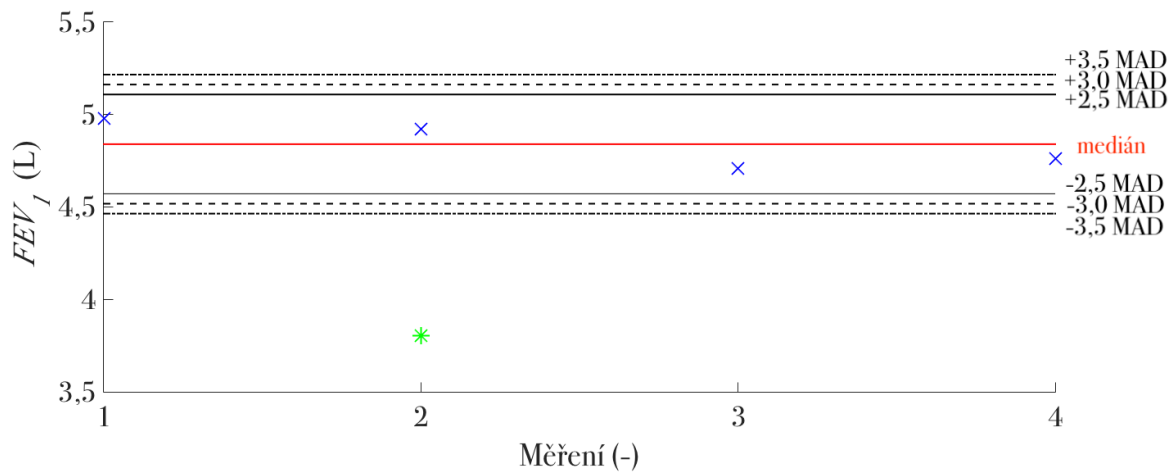
Obrázek G.11: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 04.



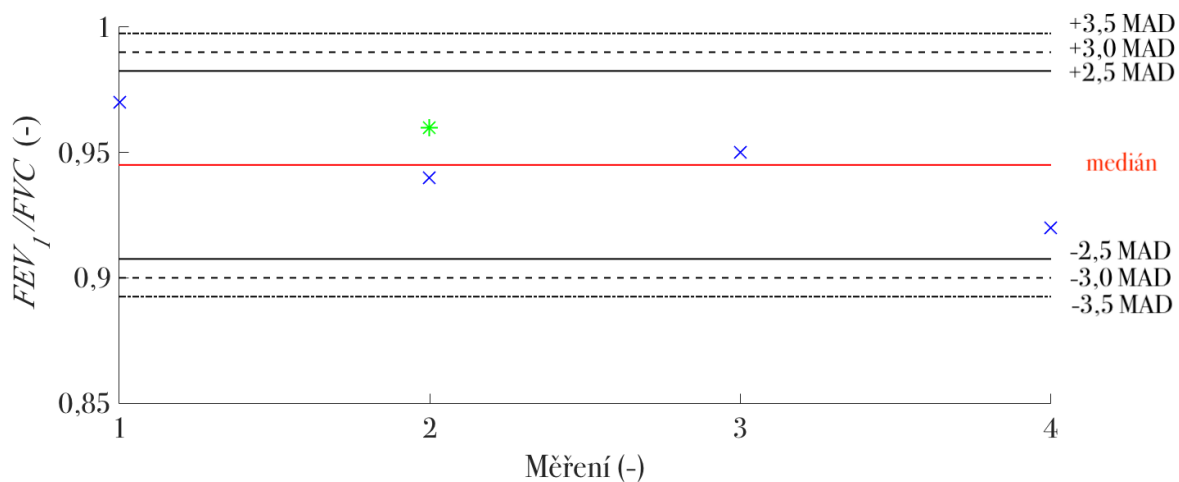
Obrázek G.12: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 04.



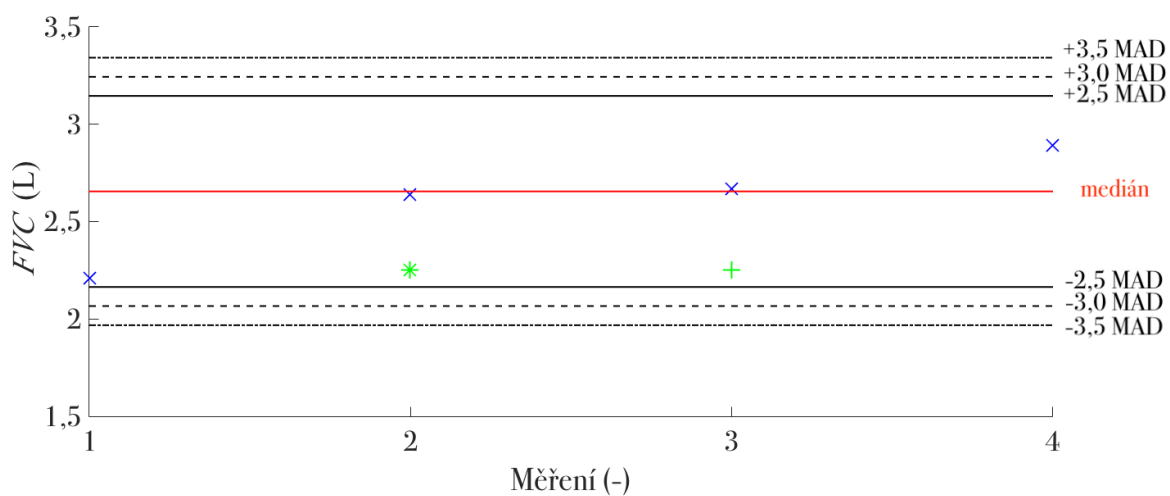
Obrázek G.13: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 05.



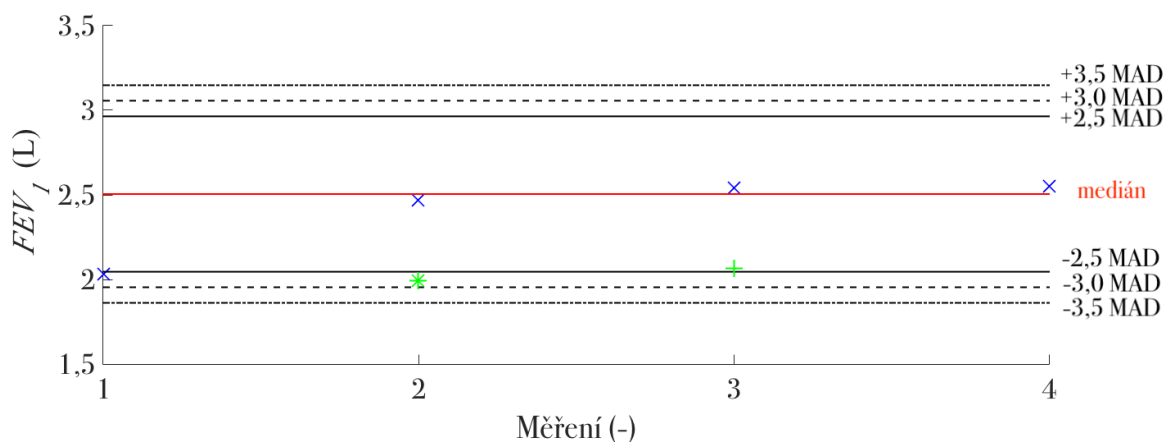
Obrázek G.14: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 05.



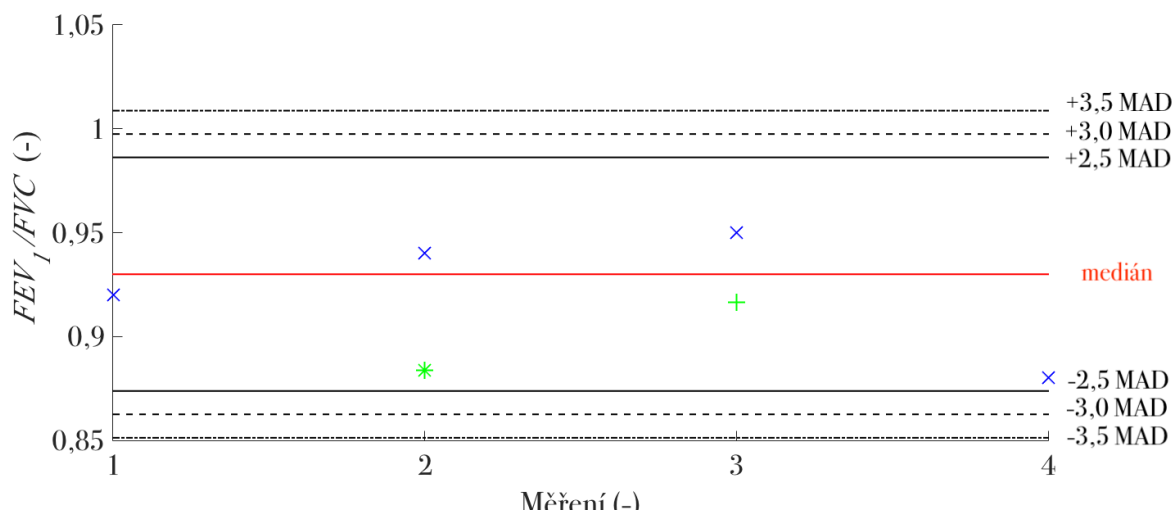
Obrázek G.15: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 05.



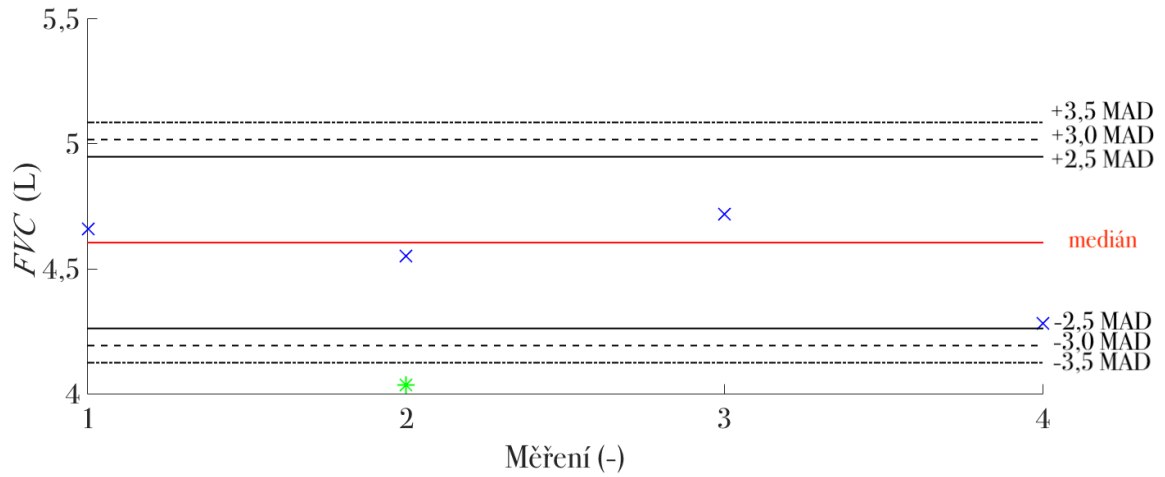
Obrázek G.16: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 06.



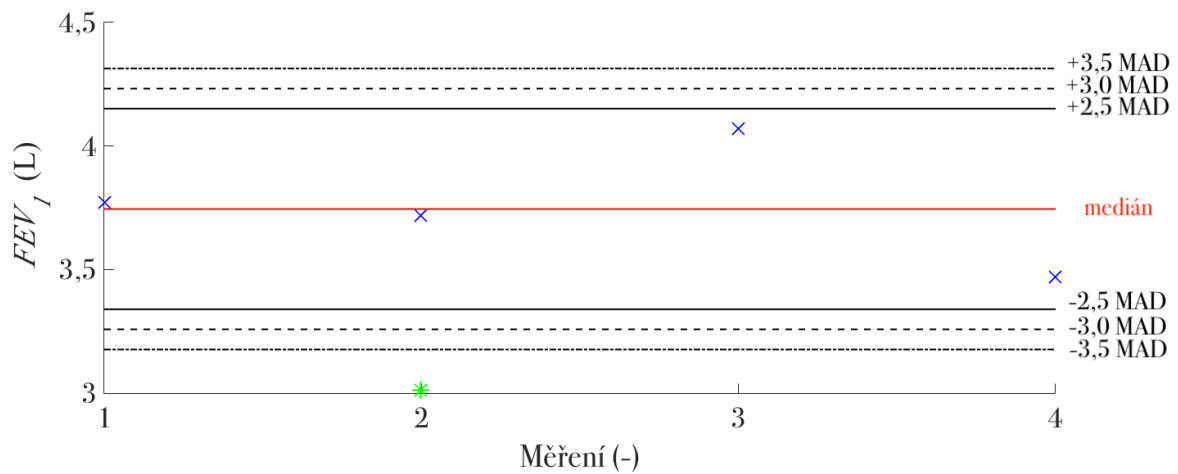
Obrázek G.17: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 06.



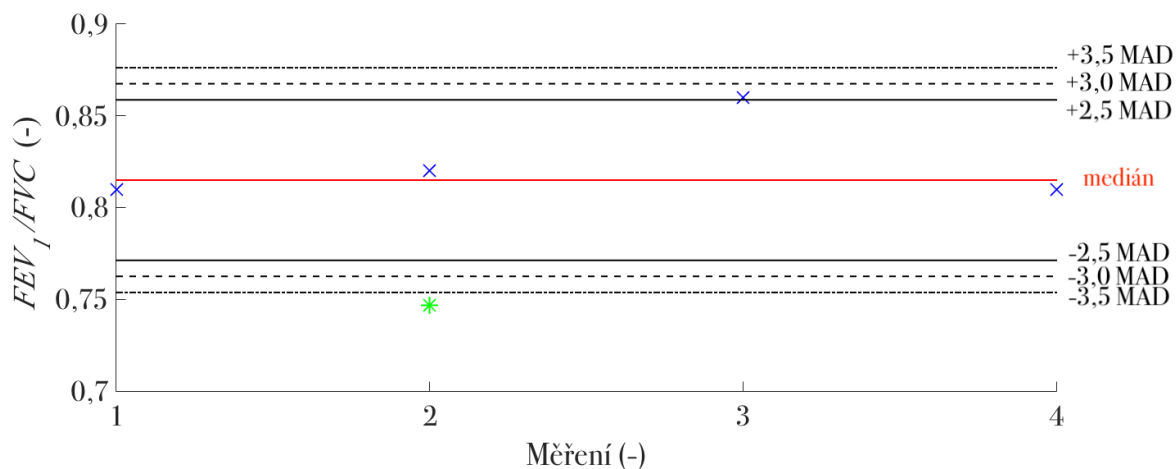
Obrázek G.18: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 06.



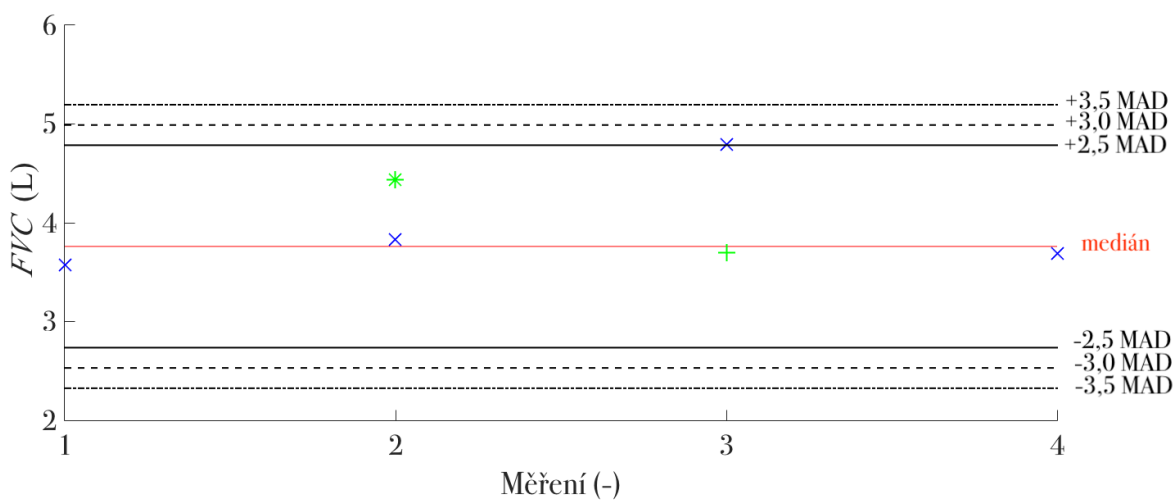
Obrázek G.19: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 07.



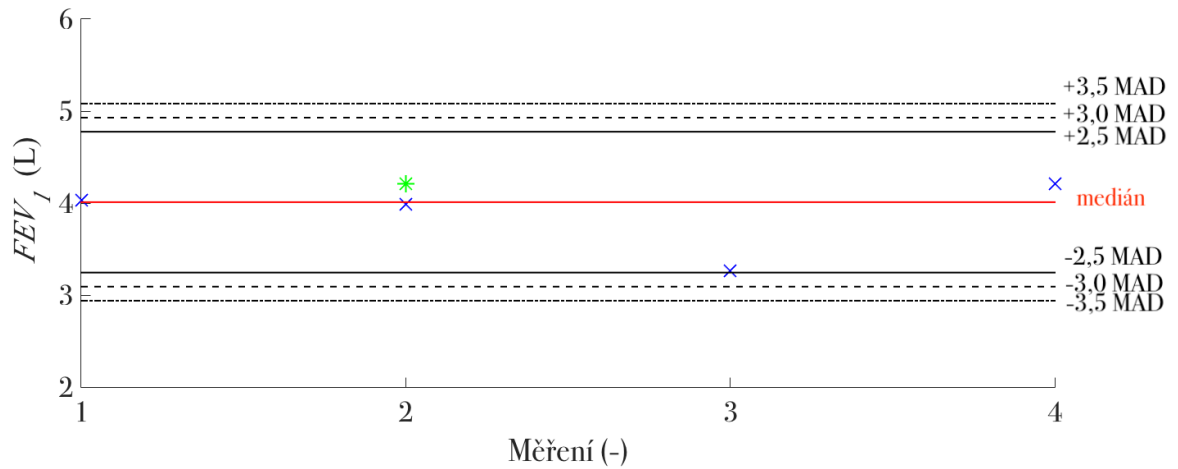
Obrázek G.20: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 07.



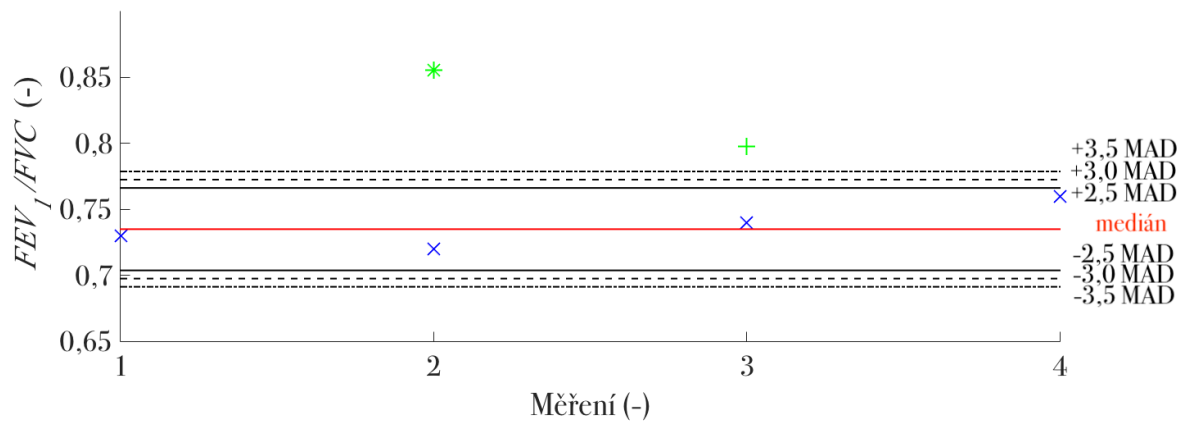
Obrázek G.21: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 07.



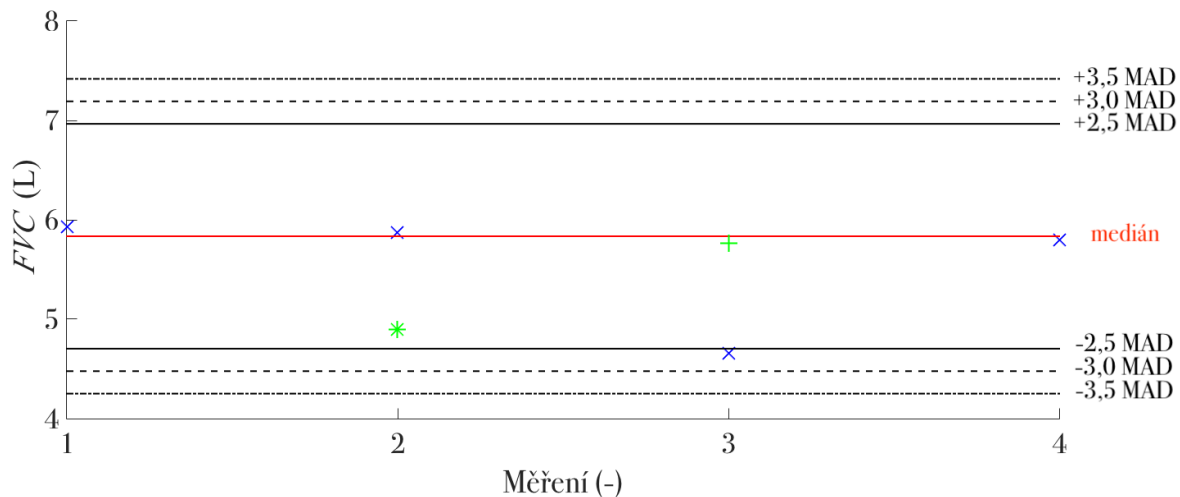
Obrázek G.22: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 08.



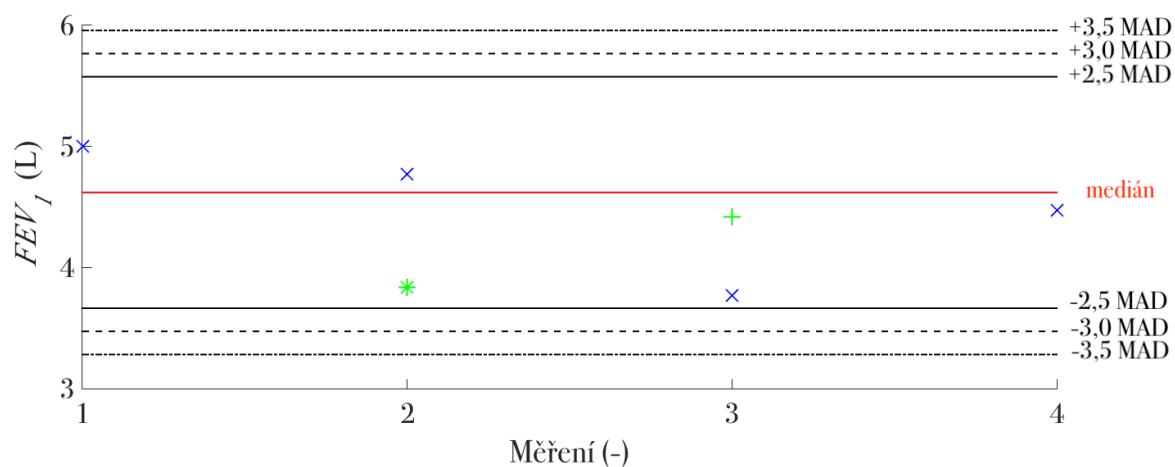
Obrázek G.23: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 08.



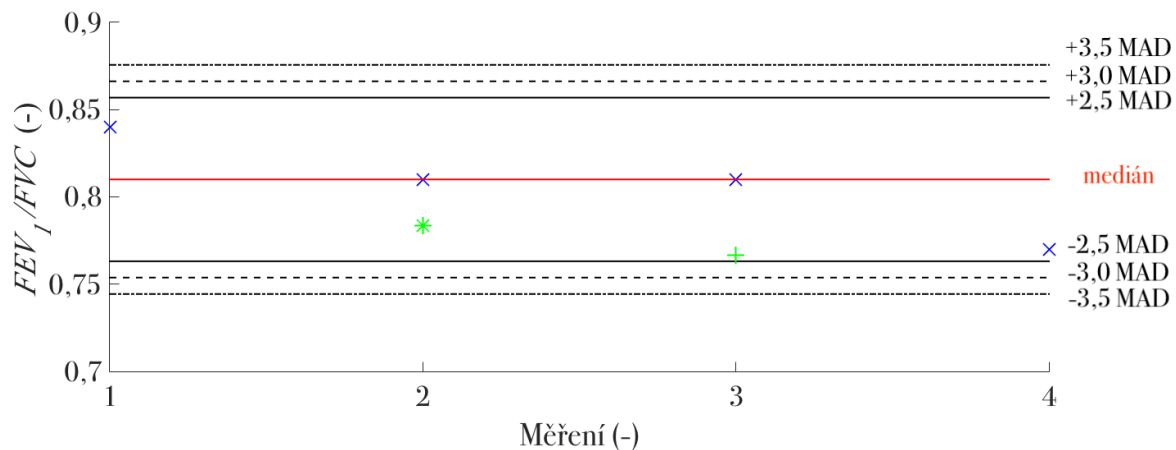
Obrázek G.24: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 08.



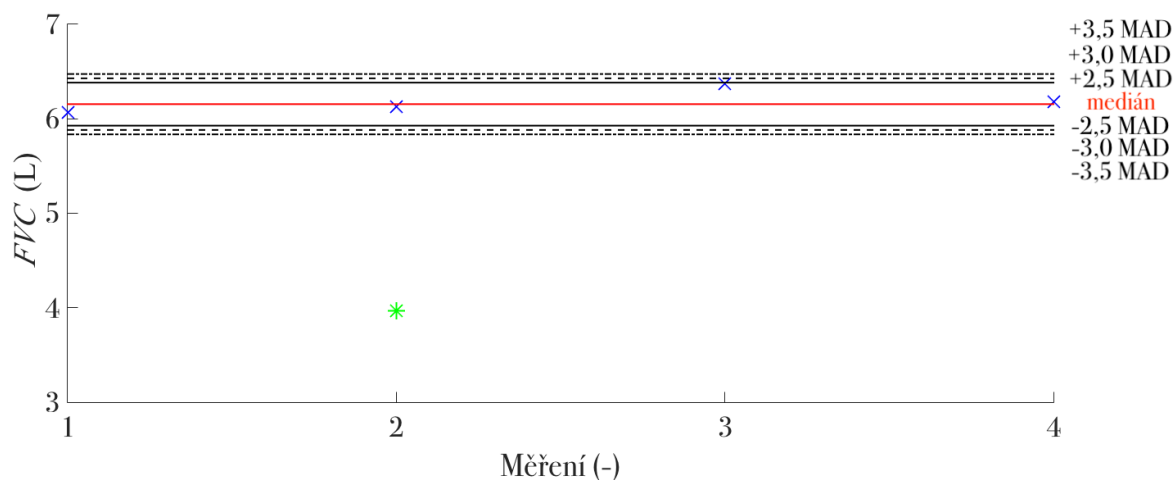
Obrázek G.25: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 09.



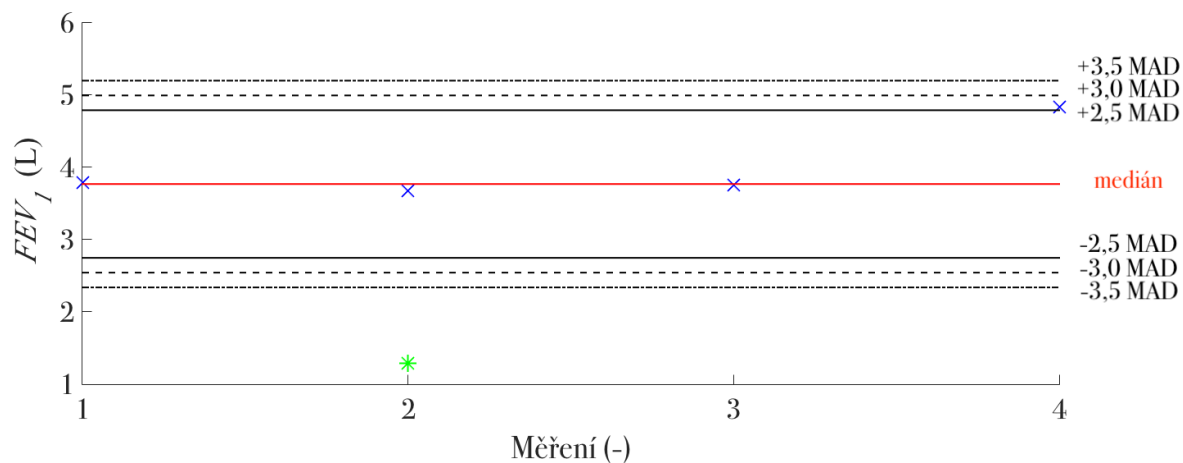
Obrázek G.26: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 09.



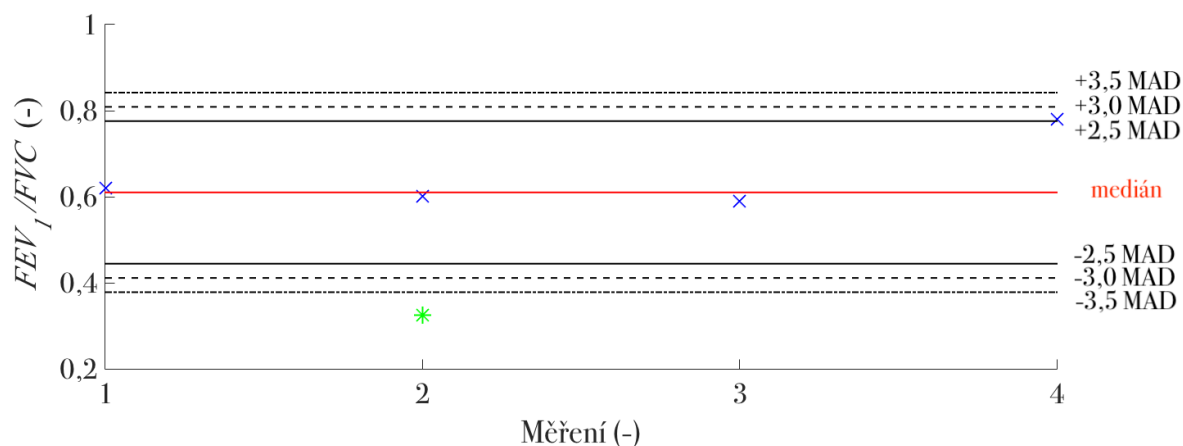
Obrázek G.27: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 09.



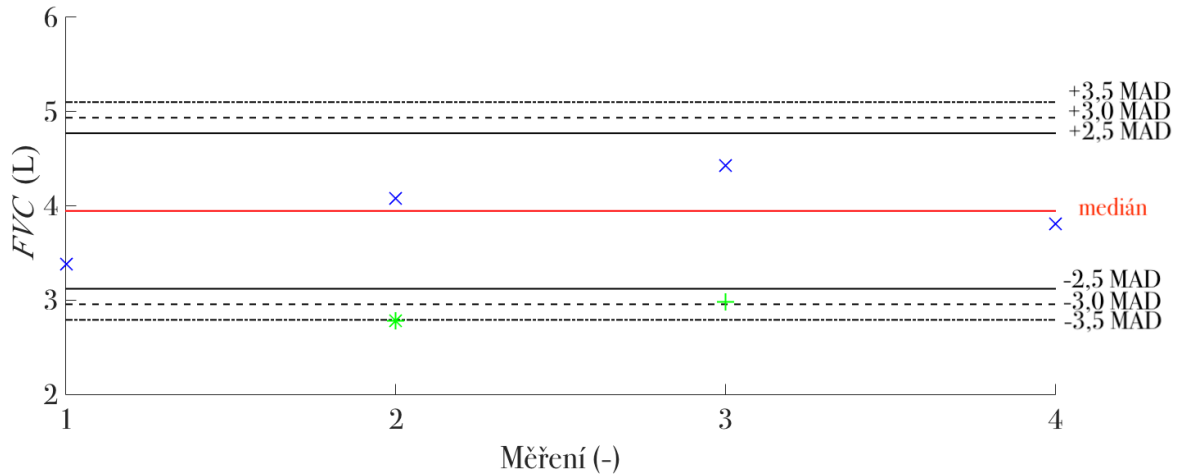
Obrázek G.28: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 10.



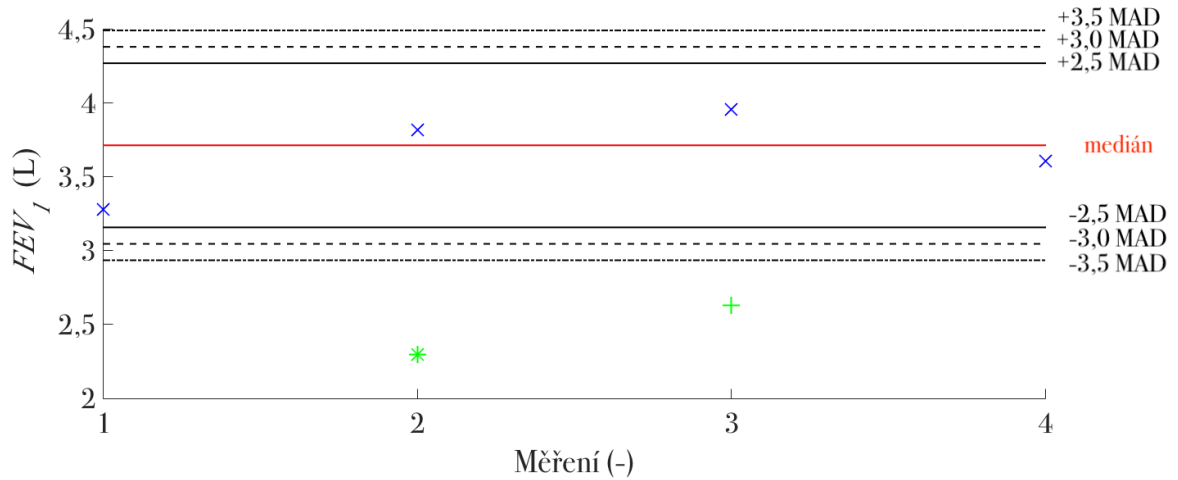
Obrázek G.29: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 10.



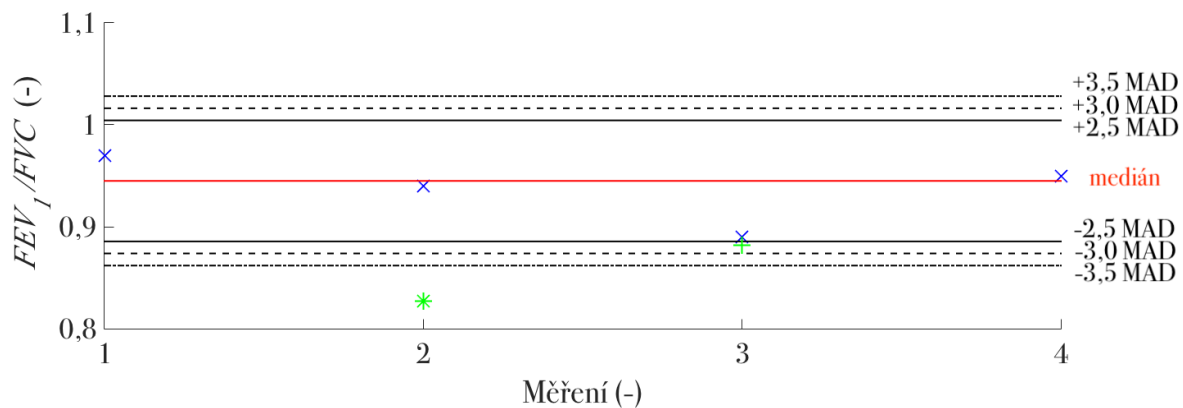
Obrázek G.30: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 10.



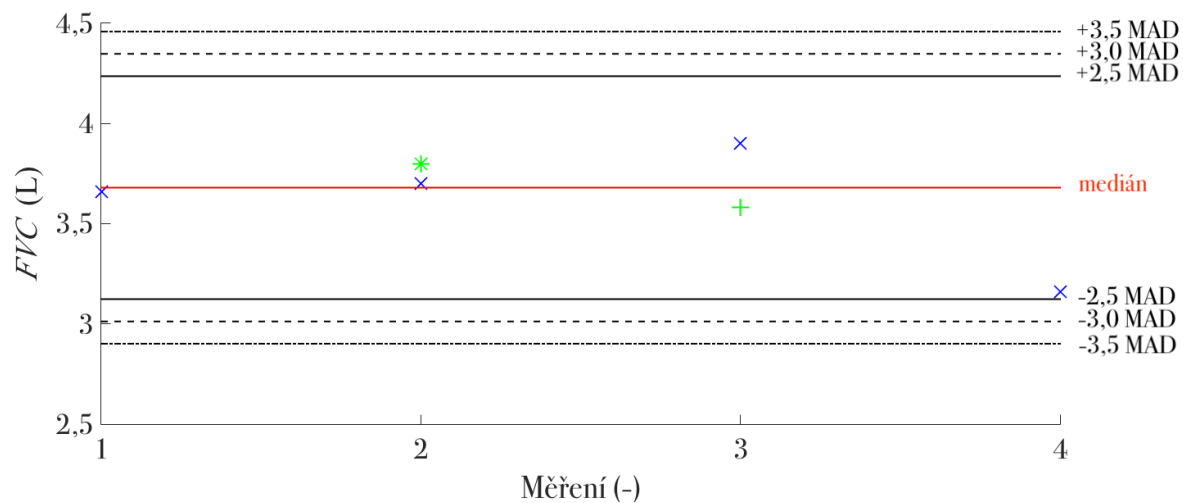
Obrázek G.31: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 11.



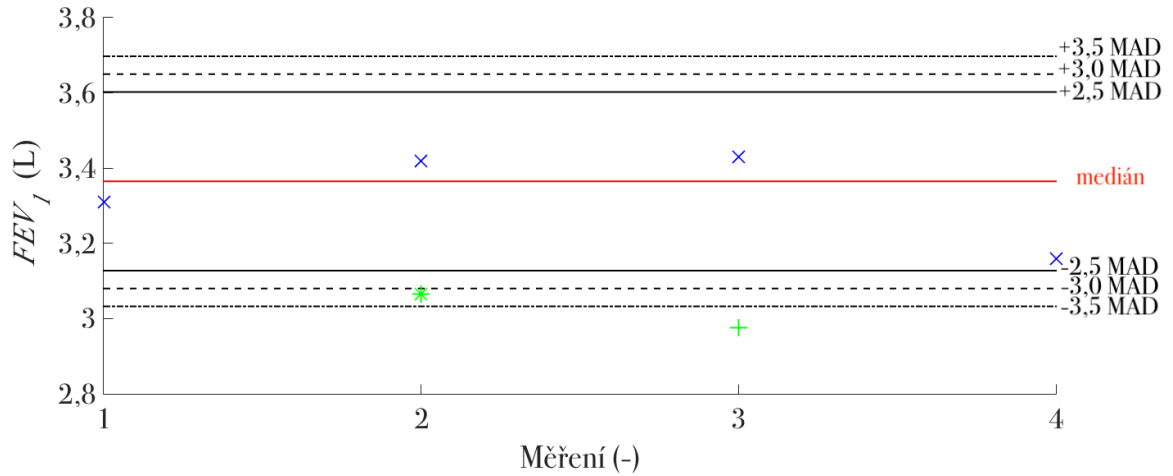
Obrázek G.32: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 11.



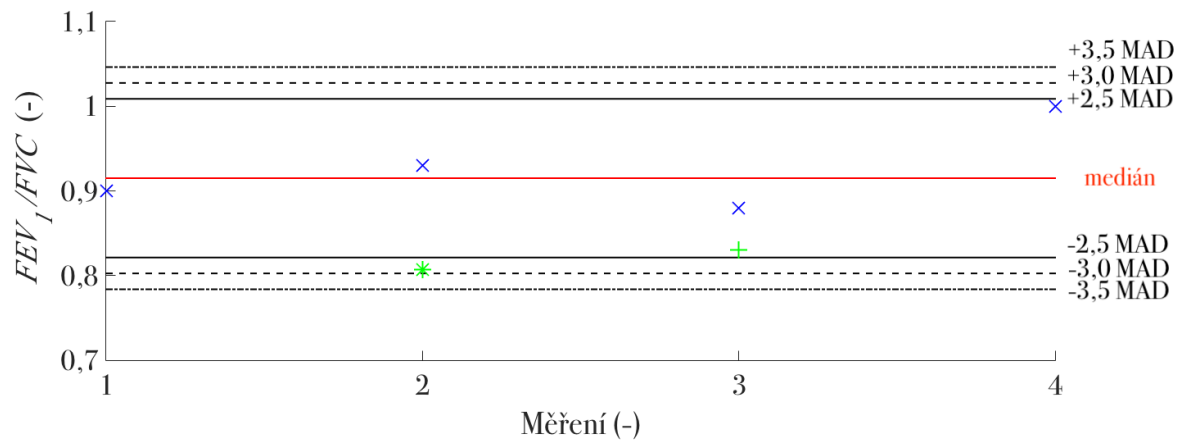
Obrázek G.33: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 11.



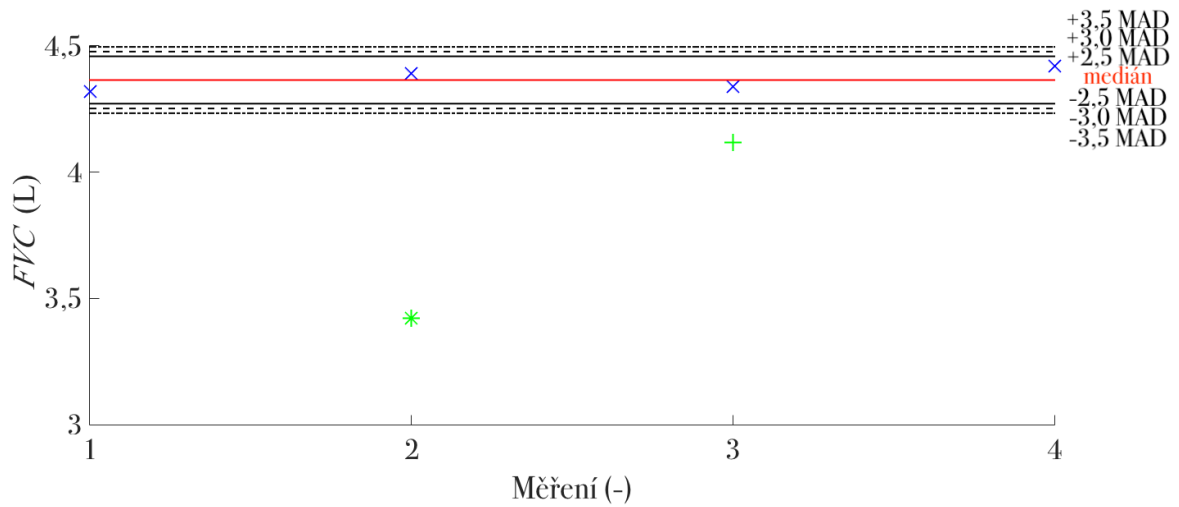
Obrázek G.34: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 12.



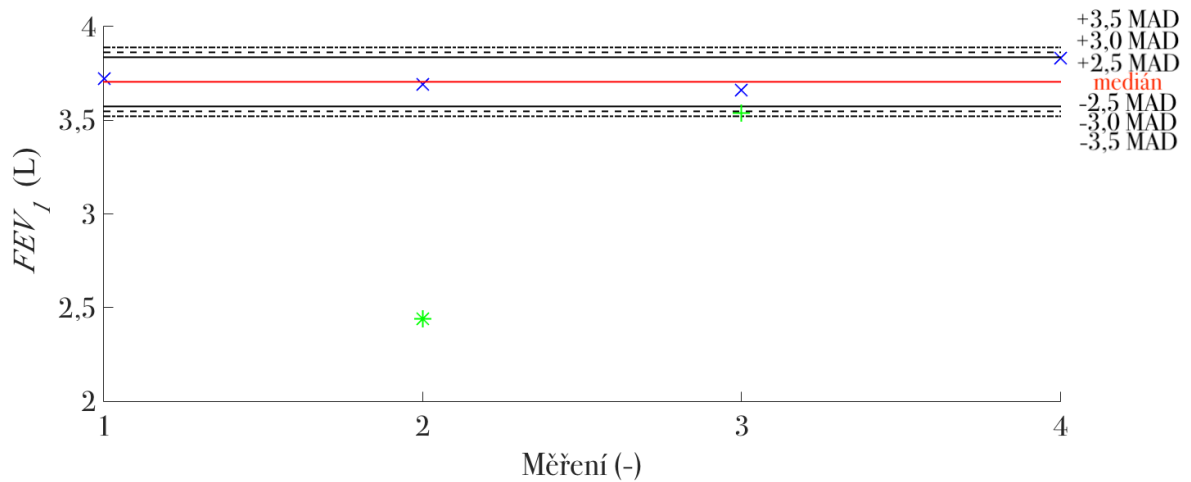
Obrázek G.35: Výsledný graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 12.



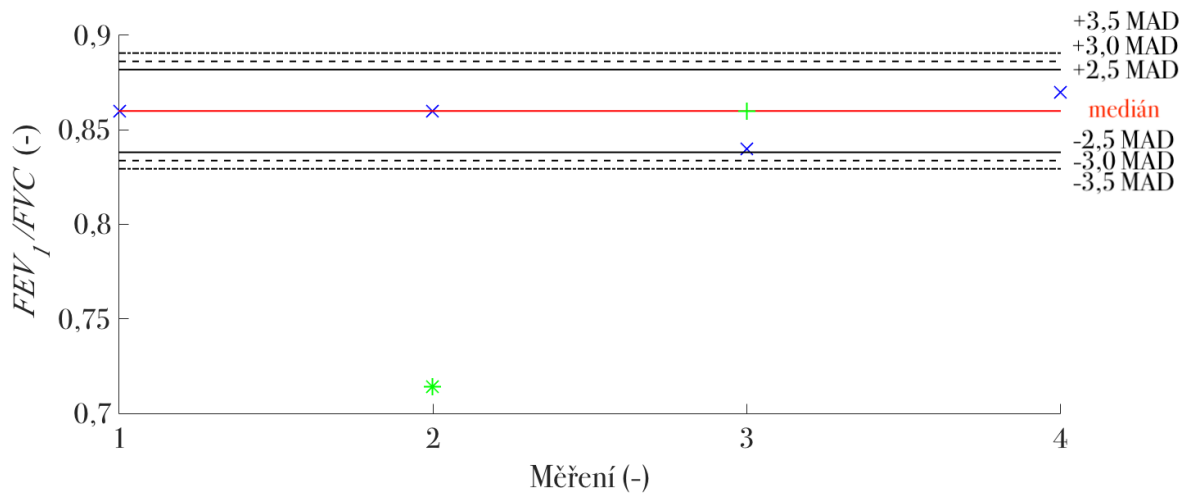
Obrázek G.36: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 12.



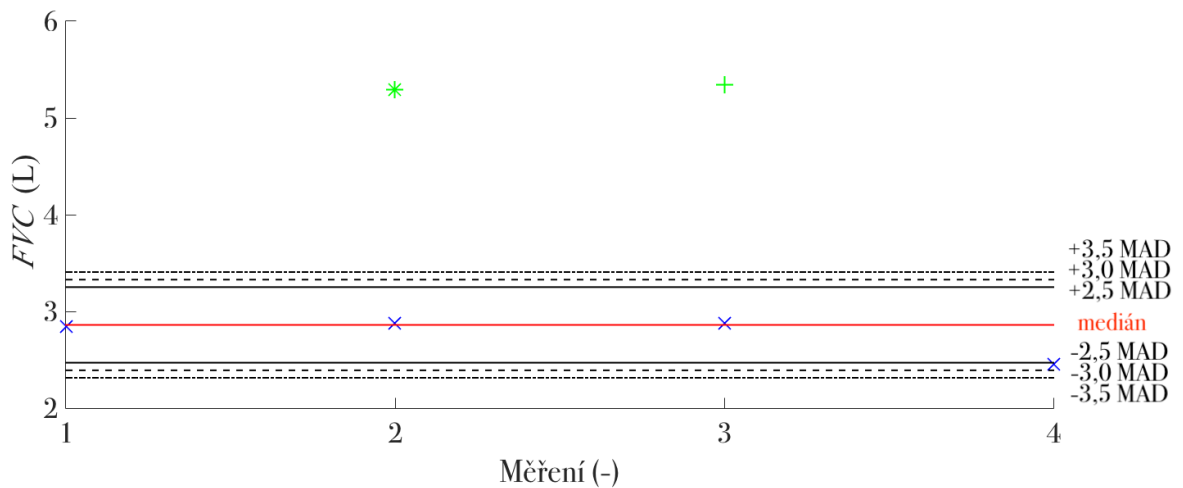
Obrázek G.37: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 13.



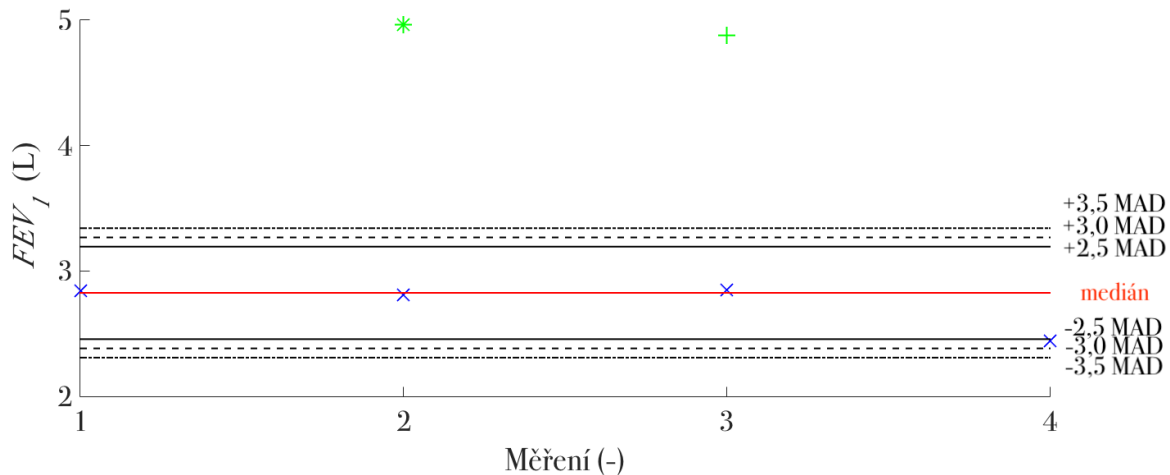
Obrázek G.38: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 13.



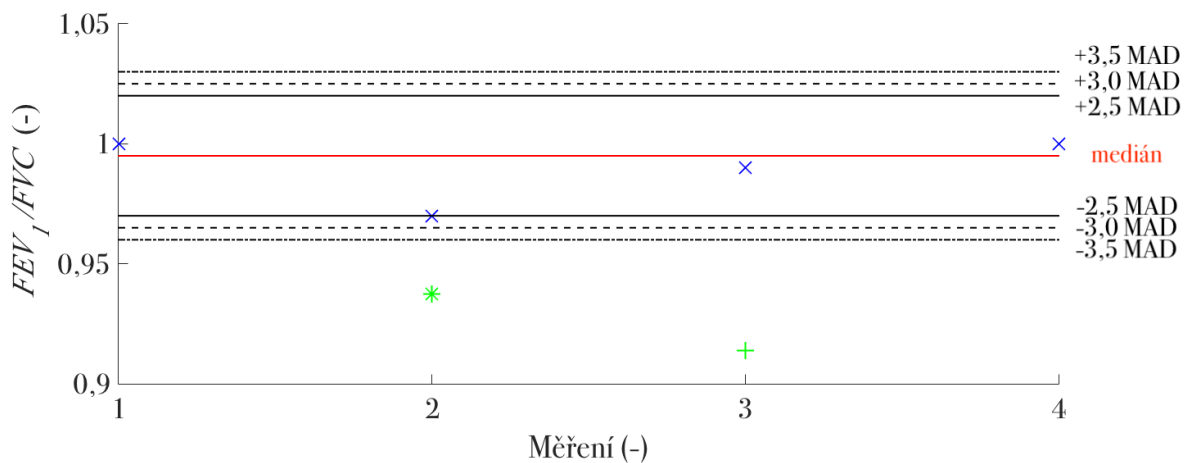
Obrázek G.39: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 13.



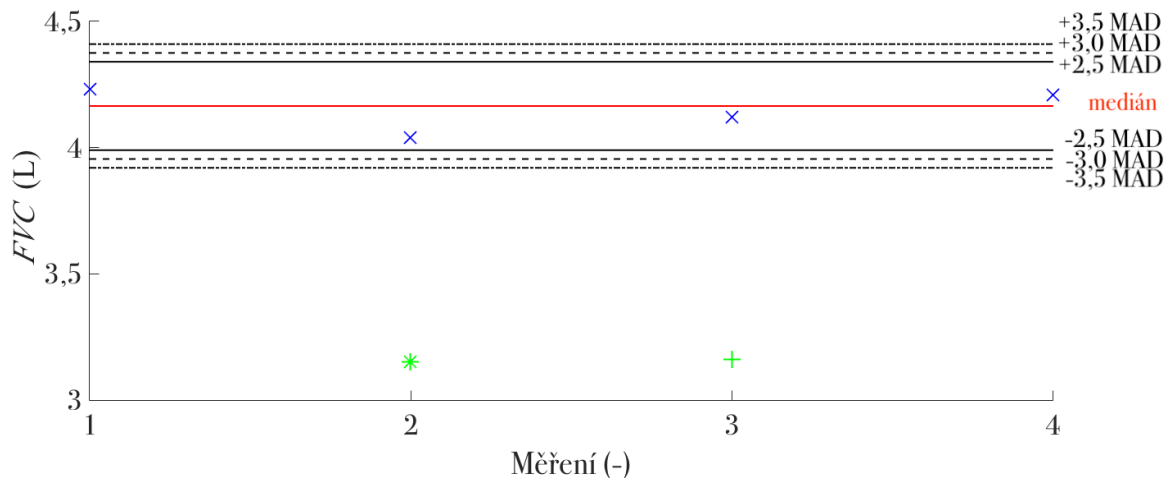
Obrázek G.40: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 14.



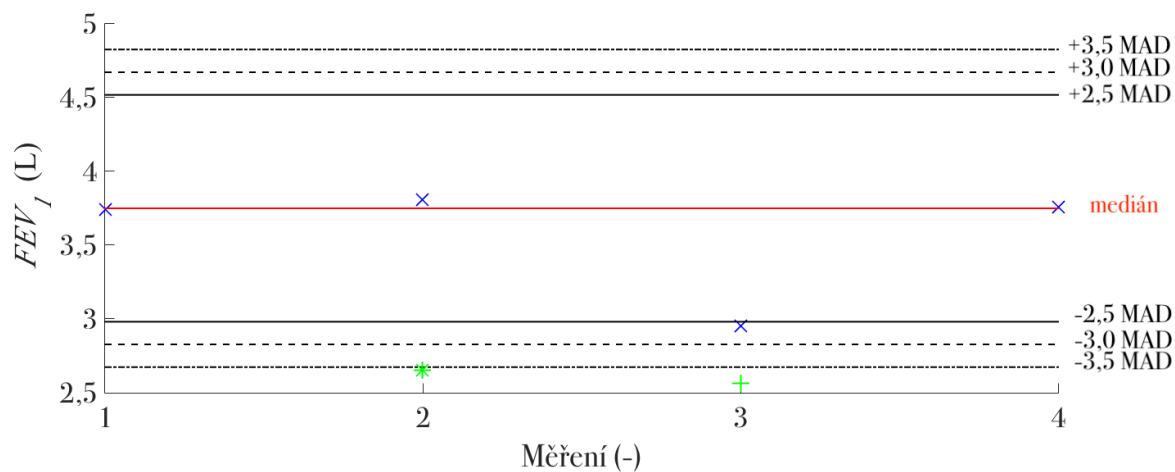
Obrázek G.41: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 14.



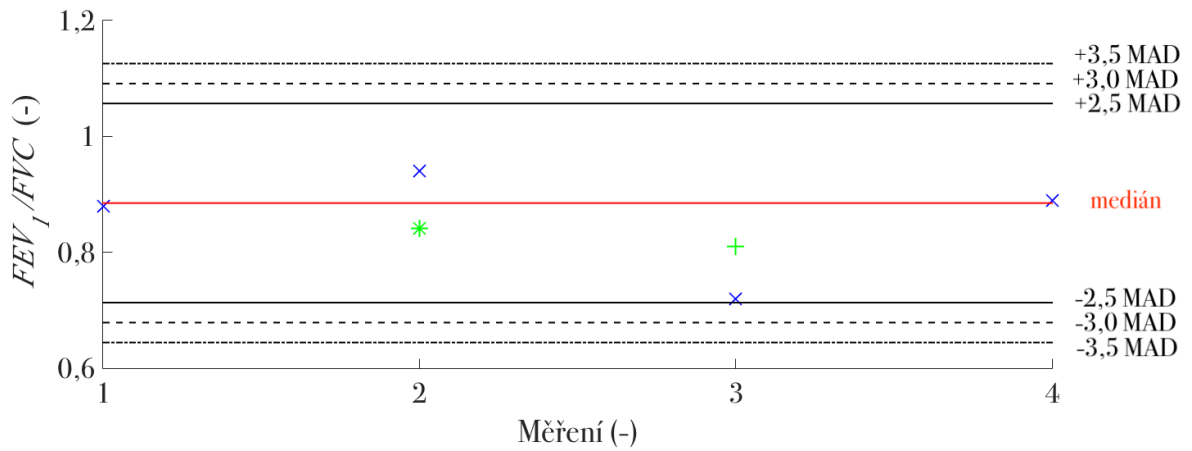
Obrázek G.42: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 14.



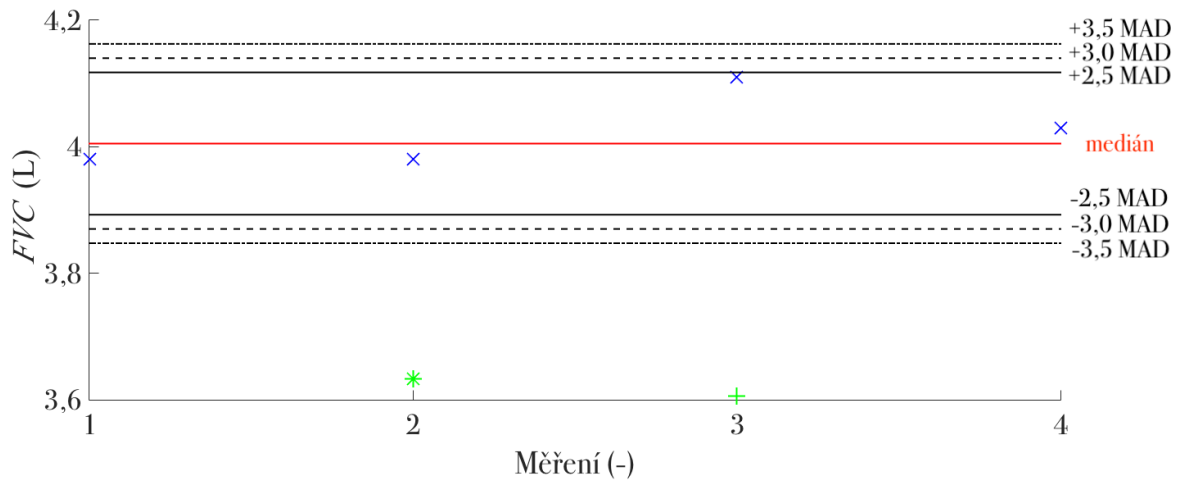
Obrázek G.43: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 15.



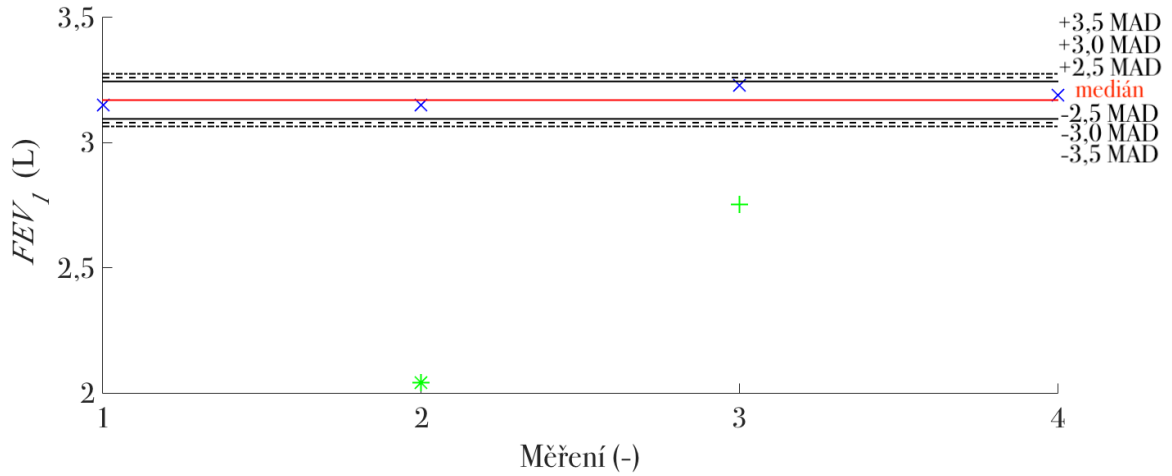
Obrázek G.44: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 15.



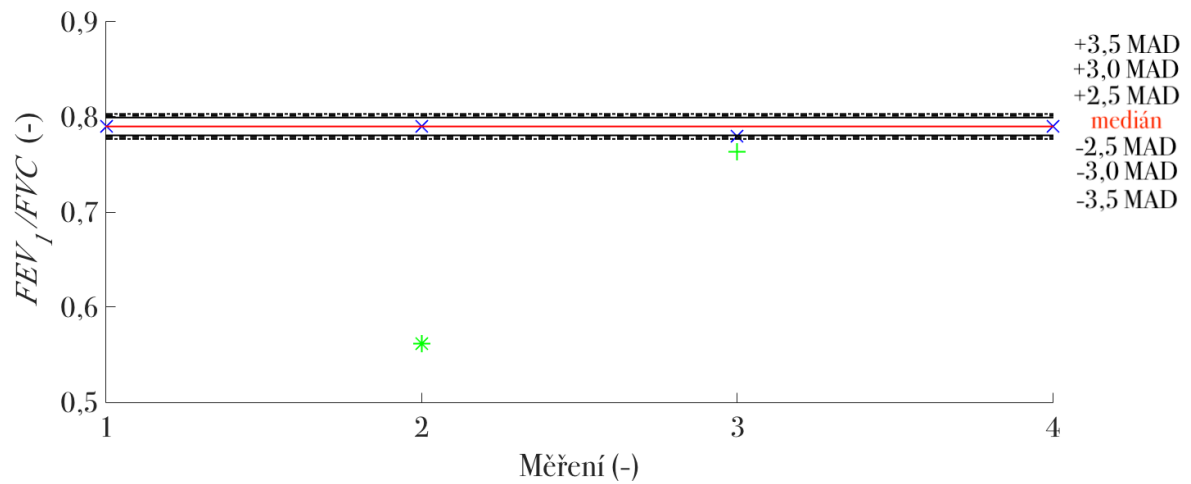
Obrázek G.45: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 15.



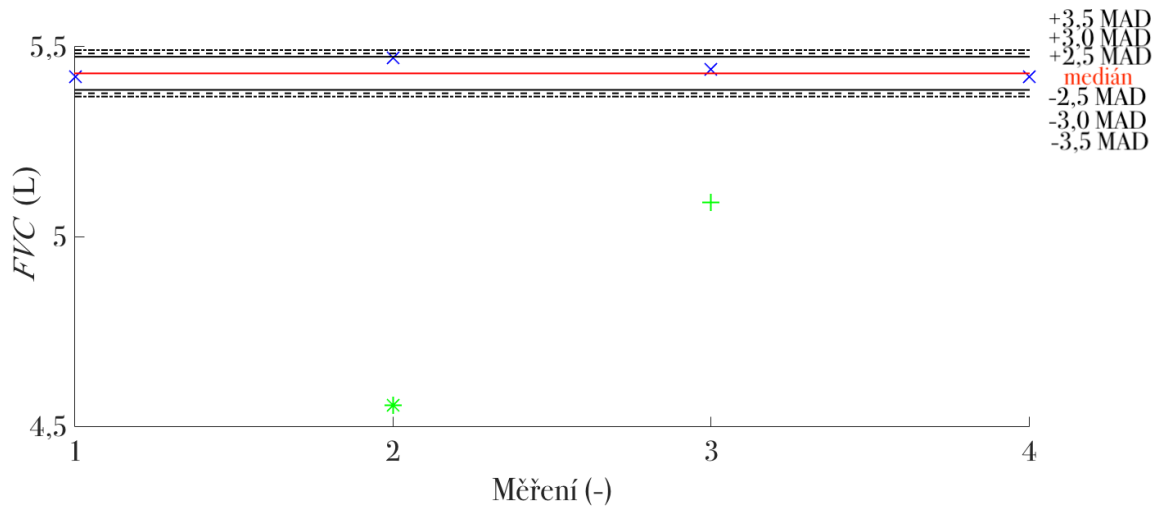
Obrázek G.46: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 16.



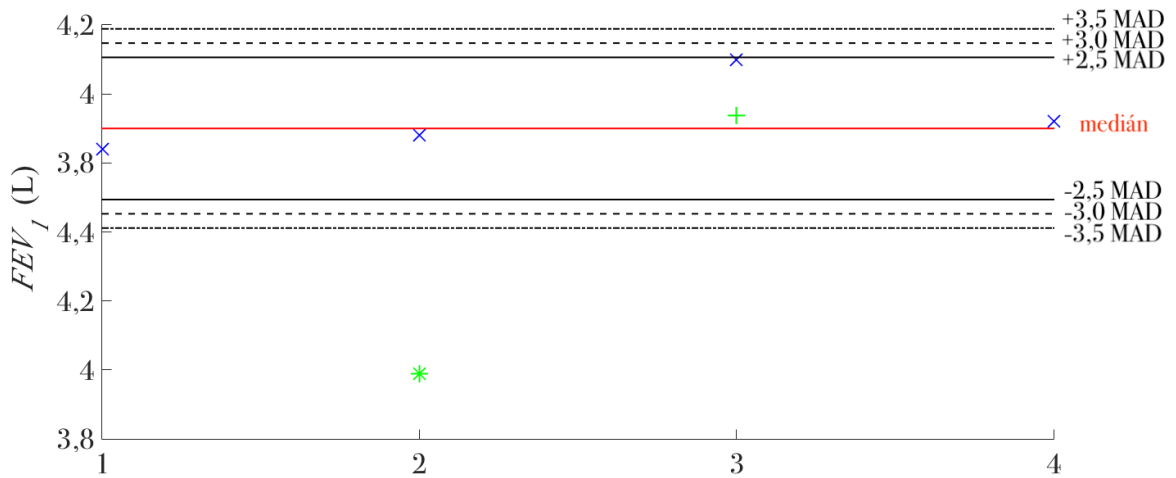
Obrázek G.47: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 16



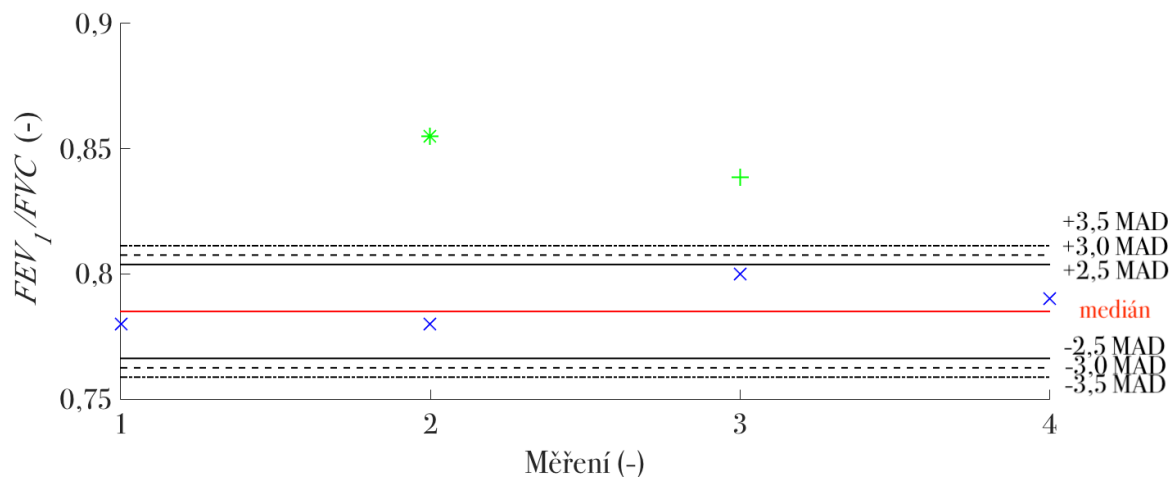
Obrázek G.48: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 16.



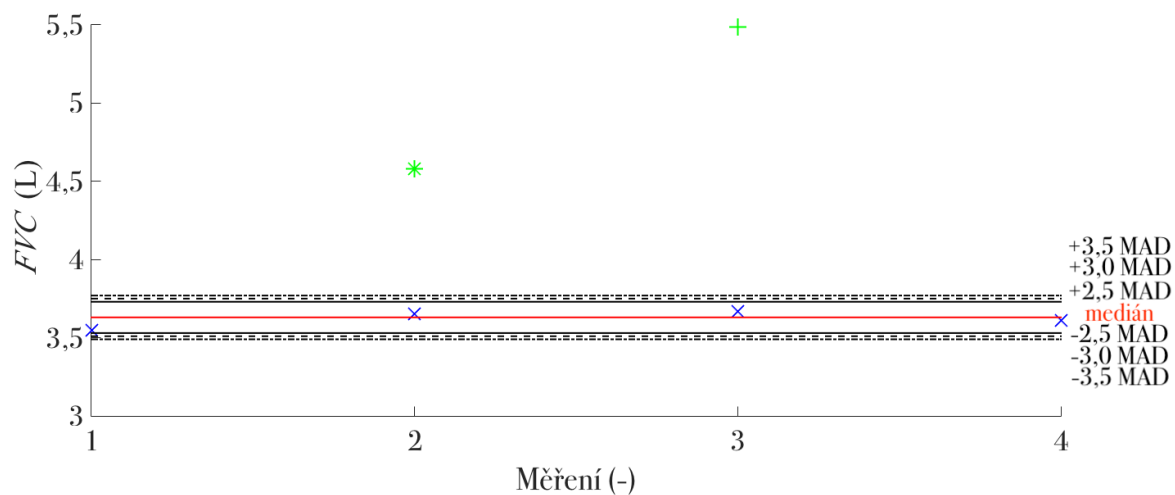
Obrázek G.49: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 17.



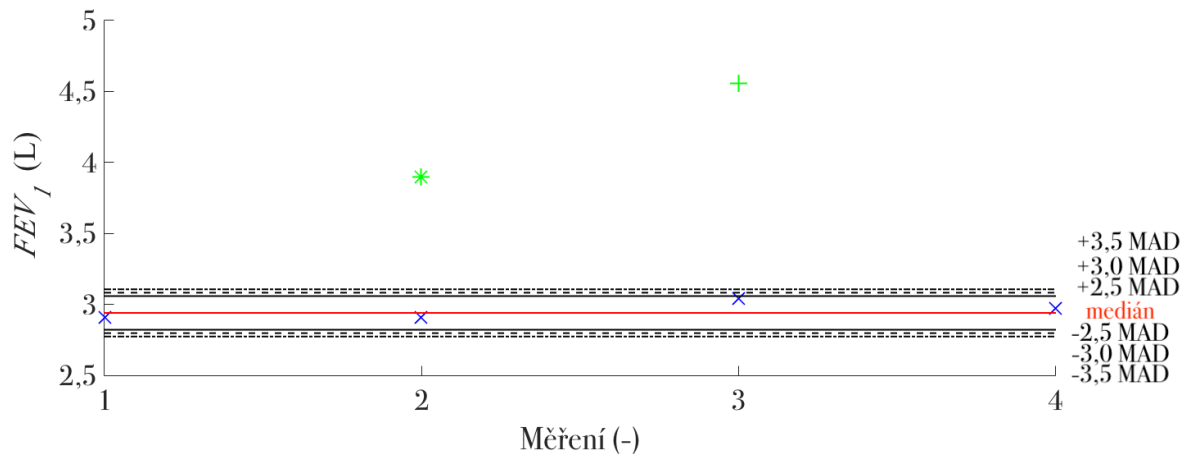
Obrázek G.50: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 17.



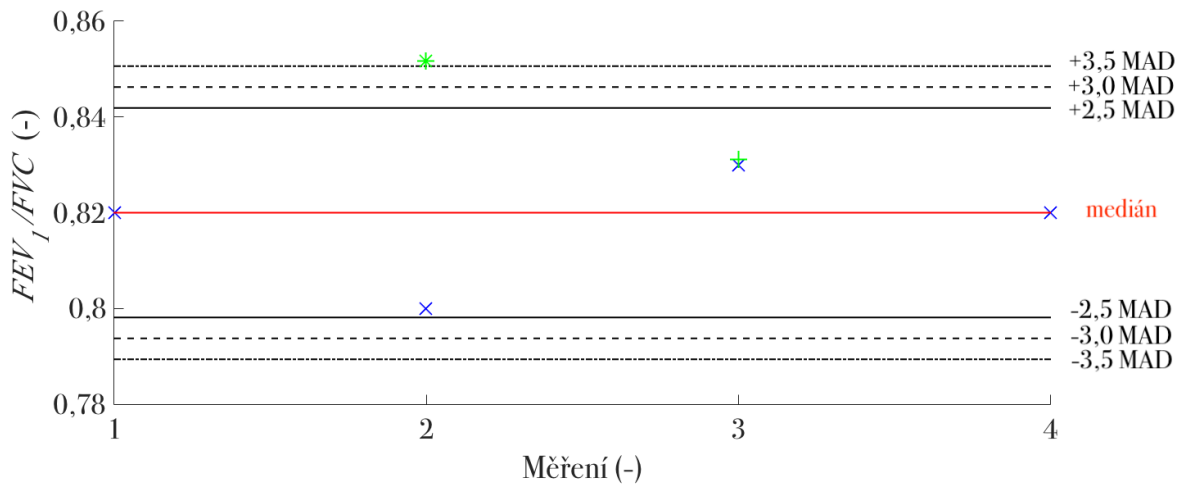
Obrázek G.51: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 17.



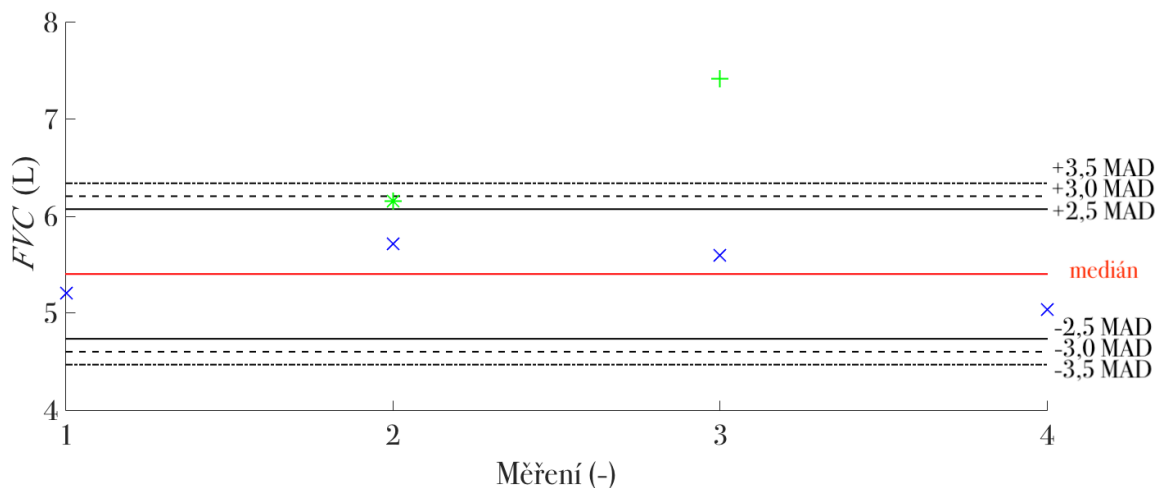
Obrázek G.52: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 18.



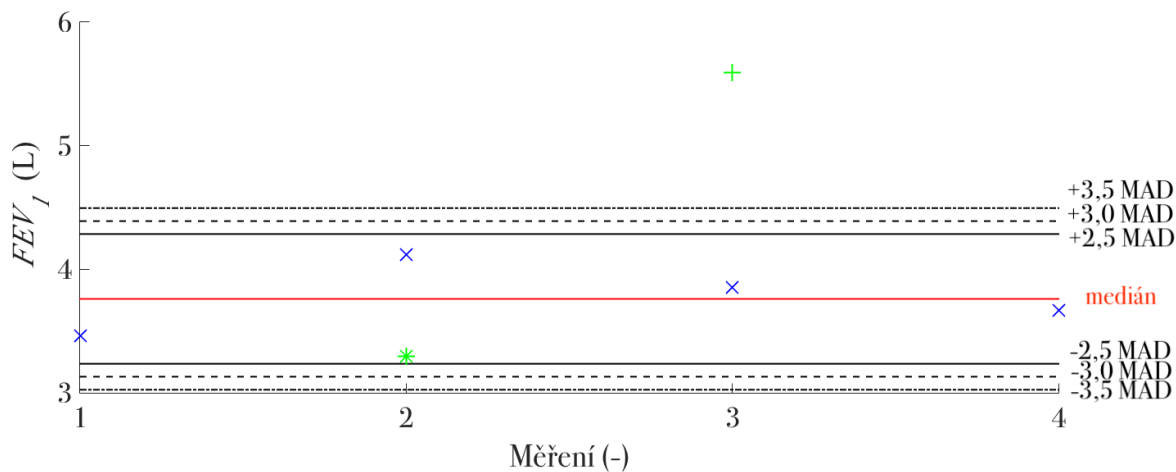
Obrázek G.53: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 18.



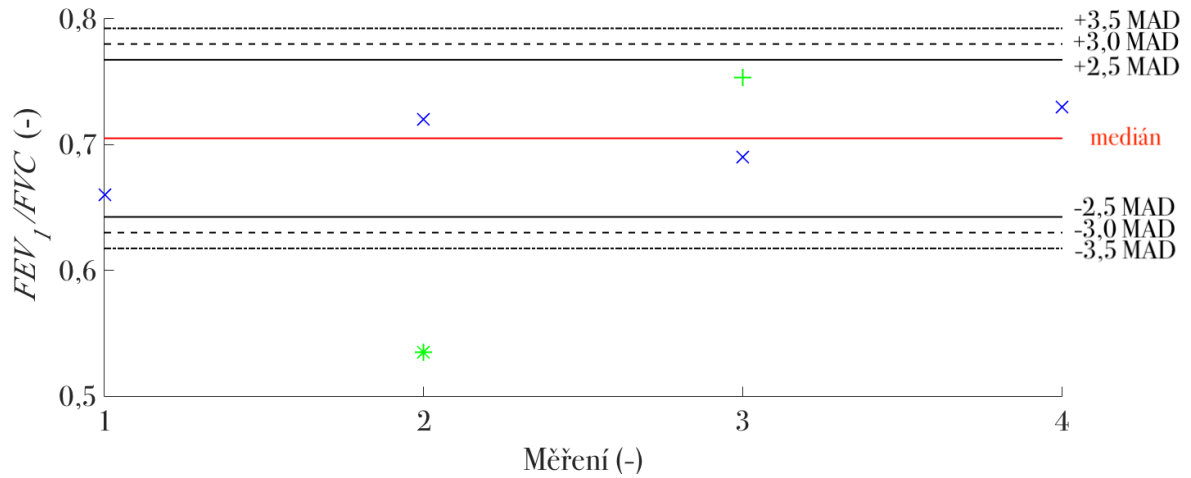
Obrázek G.54: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 18.



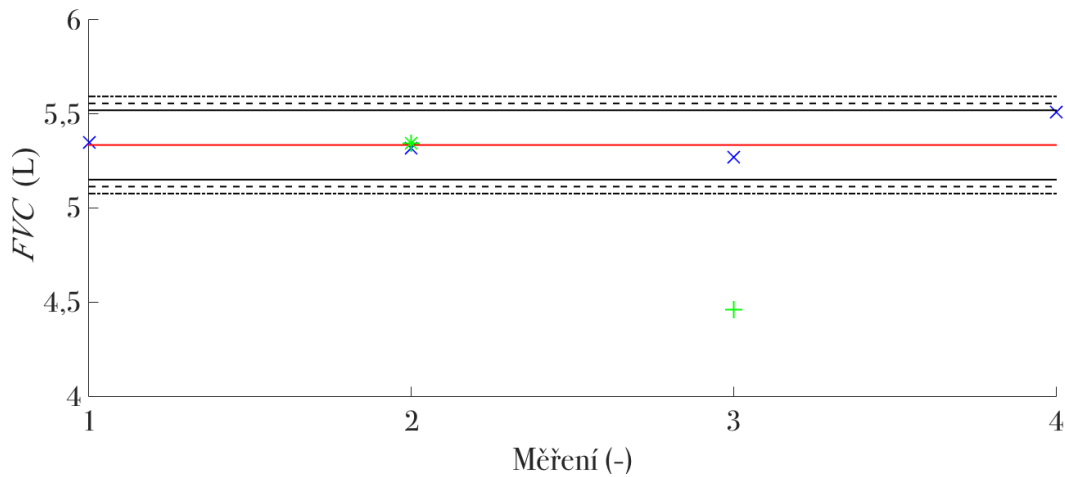
Obrázek G.55: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 20.



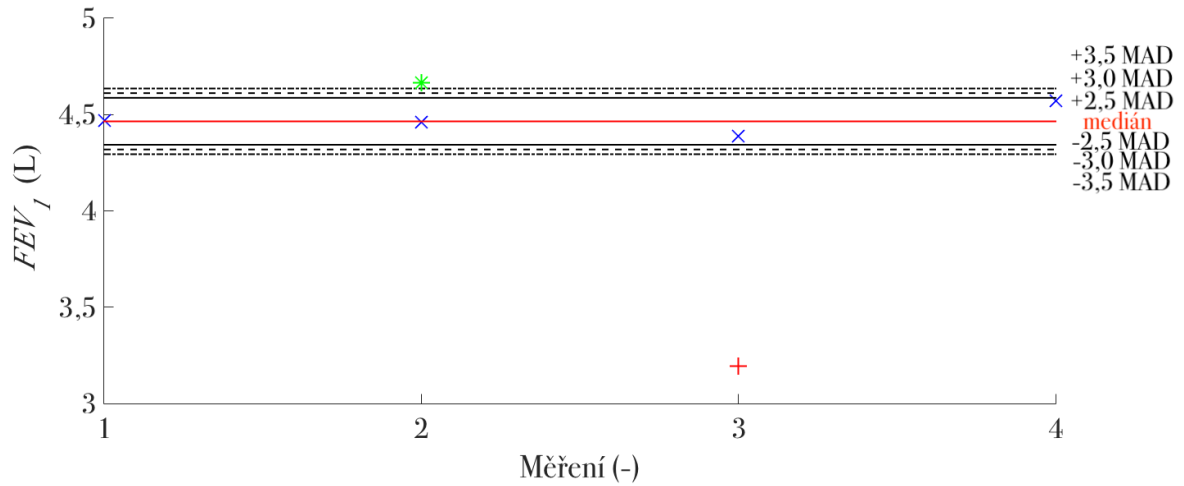
Obrázek G.56: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 20.



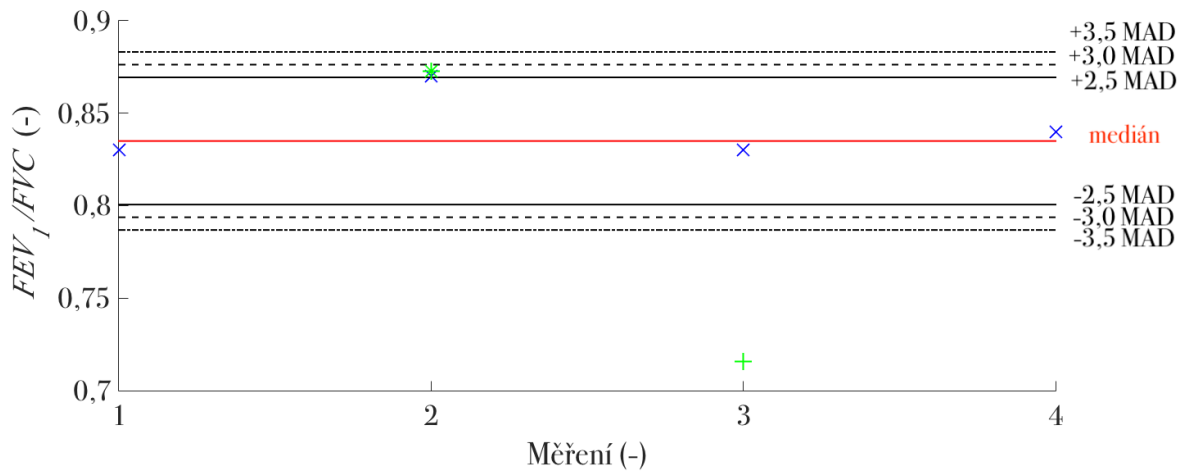
Obrázek G.57: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 20.



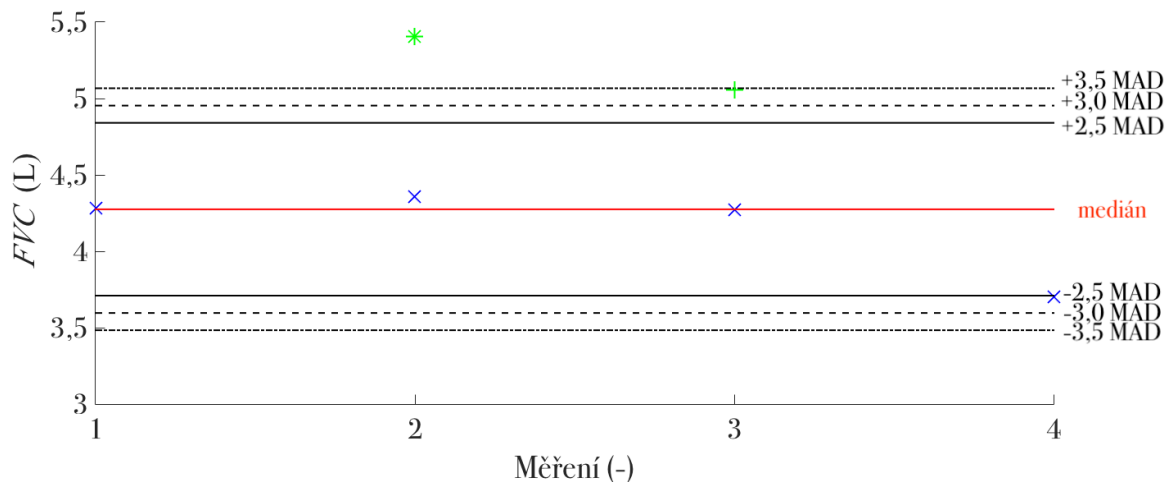
Obrázek G.58: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 21.



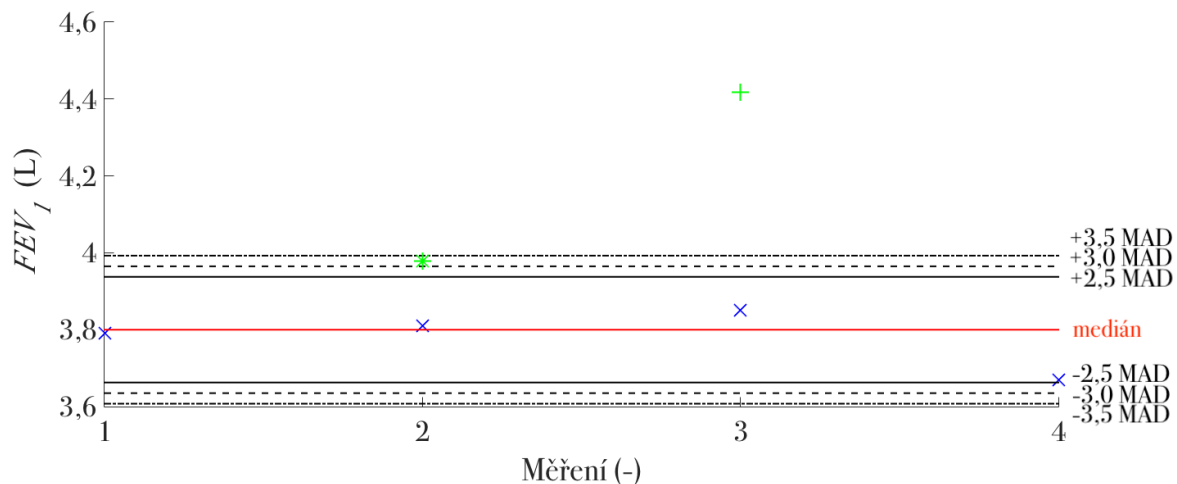
Obrázek G.59: Graf parametru FEV_1 získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 21.



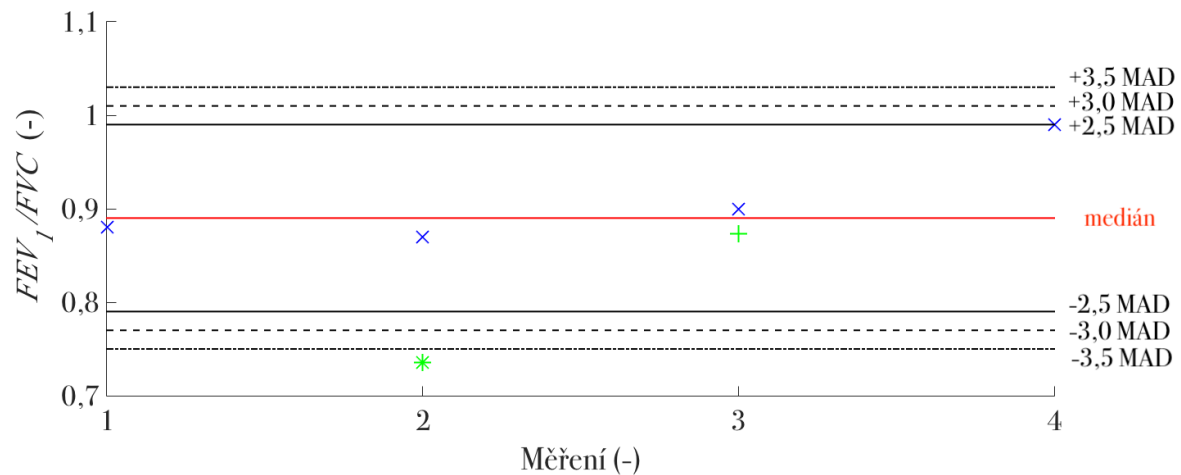
Obrázek G.60: Graf parametru FEV_1/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 21.



Obrázek G.61: Graf parametru FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 22.



Obrázek G.62: Graf parametru FEV₁ získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 22.



Obrázek G.63: Graf parametru FEV₁/FVC získaného z odděleného měření standardní spirometrie a spirometrického měření realizovaného pomocí EIT na základě vztahu 3.3 pro probanda 22.

H Obsah přiloženého CD

- Diplomová práce.pdf
- Zadání diplomové práce.pdf
- Název diplomové práce.pdf
- Title of thesis.pdf
- Abstrakt.pdf
- Abstract.pdf
- Klíčová slova.pdf
- Key words.pdf
- Skripty