

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SMĚROVACÍ PROTOKOL PRO SÍTĚ MANET ZOHLEDŇUJÍCÍ
POŽADAVKY NA KVALITU SLUŽEB

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. PAVEL VAJSAR

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

SMĚROVACÍ PROTOKOL PRO SÍŤE MANET ZOHLEDŇUJÍCÍ POŽADAVKY NA KVALITU SLUŽEB

MANET ROUTING PROTOCOL WITH QUALITY OF SERVICE SUPPORT

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. PAVEL VAJSAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D.

BRNO 2014

ABSTRAKT

V poslední době dochází k rapidnímu nárůstu mobilního provozu díky novým mobilním zařízením (chytré telefony, tablety, modemy). To má za následek, že dostupná kapacita poskytovatelů mobilních služeb přestává být dostačující. Pro poskytovatele to znamená nemalé investice do sítě, které by zvýšily její kapacitu. V kontrastu s tím na jedné straně souvisí ziskovost těchto investic pro poskytovatele a na druhé straně je spokojenost uživatelů, kteří využívají placenou službu. Cílem je tedy nalézt vyváženost mezi investicemi a spokojeností zákazníků při využívání širokopásmového připojení k síti Internet skrze poskytovatele mobilních služeb. Tato práce poskytuje studii, která se zabývá subjektivním vnímáním a spokojeností uživatelů s daným typem služby. Práce je zaměřena na hodnocení využívání webových služeb v různých podmínkách a s různým obsahem na koncových zařízeních. Získané výsledky poskytují detailní informace pro subjektivní vnímání kvality ze strany uživatele a určují prahy kvality a saturace pro dosažení spokojenosti koncových uživatelů. Získaná data dále poskytují základ pro návrh tří predikčních modelů pro predikci hodnoty MOS (pro notebook a pro mobilní zařízení) a pro predikci akceptability.

KLÍČOVÁ SLOVA

Subjektivní vnímání, mobilní síť, webové služby, klíčové indikátory, hodnocení, predikce, model

ABSTRACT

The web and mobile web traffic is growing rapidly due to service accessibility in densely populated areas and massive usage of smart hand held devices (smartphones, pads and Internet dongles). This is a challenge for mobile operators and service providers, because it forces systematically increasing network throughput capacity and in parallel to keep this investment on profitable basis. On the other side, the user satisfaction with mobile broadband service should be considered as well, in order to balance the user expectations and mobile operator investments. Our work provides extensive QoE study for different conditions in sense of mobile web service, web content, network conditions and end user device. Finally, the obtained results create basis for more dimensional overview of mobile web QoE and allow to recognize quality and saturation thresholds based on network parameters. Further, obtained data provide base for design three prediction models for prediction of MOS (one for notebook, one for mobile device) and acceptability.

KEYWORDS

Quality of Experience, mobile network, web services, key performance indicator, assessment, prediction, model

VAJSAR, Pavel *Směrovací protokol pro síť MANET zohledňující požadavky na kvalitu služeb*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 130 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Směrovací protokol pro síť MANET zohledňující požadavky na kvalitu služeb“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu dizertační práce doc. Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. a doc. Ing. Karolu Molnárovi, Ph.D. za odbornou pomoc během zpracování práce. Dále bych rád poděkoval kolegům Ing. Jiřímu Hoškovi, Ph.D. dále Dr. Michalovi Riesovi za konzultace a podnětné návrhy k práci.

Dále bych rád poděkoval své rodině a partnerce za podporu trpělivost při tvorbě této práce.

Brno

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této doktorské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	12
1 Subjektivní vnímání kvality služby	14
1.1 Úvod do hodnocení subjektivního vnímání kvality služby	14
1.1.1 Faktory ovlivňující subjektivní vnímání služby	17
1.2 Metody pro hodnocení subjektivního vnímání a získání relevantních výsledků	19
1.2.1 MOS stupnice pro hodnocení subjektivního vnímání kvality .	20
1.2.2 Hodnocení z pohledu akceptability	21
1.2.3 Metoda ACR (Absolute Category Rating)	22
1.2.4 Metoda DCR (Degradation Category Rating)	23
1.2.5 Metoda PC (Pair Comparison)	23
1.2.6 Zhodnocení a výběr metody	24
1.3 Dostupné typy mobilních sítí a jejich základní parametry	25
1.3.1 Webové služby v prostředí mobilních sítí	26
1.3.2 Reálné parametry sítě získané měřením	27
1.3.3 Vliv zpoždění na vnímání kvality	29
1.3.4 Stanovení klíčových parametrů pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby	31
2 Metodika pro testování subjektivního vnímání kvality	33
2.1 Obsah určený pro testy	33
2.2 Skupina účastníků testování	34
2.3 Podmínky, prostředí a zařízení určené pro testování	35
2.4 Způsob hodnocení jednotlivých testů	38
2.5 Sestavení jednotlivých testů a scénářů	42
2.6 Profil skupiny účastníků	44
3 Platforma pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby	46
3.1 Dostupná řešení a metody	46
3.1.1 Dostupná platforma pro subjektivní hodnocení kvality webové služby	48
3.2 Návrh architektury platformy pro subjektivní hodnocení	49
3.2.1 Hodnotící a řídicí centrum	49
3.2.2 Centrální databázový systém	53
3.3 Realizace platformy pro subjektivní hodnocení	54
3.3.1 Hodnotící a řídicí centrum	55

3.3.2	Struktura centrálního databázového systému	59
3.3.3	Realizace emulátoru webových služeb	63
3.3.4	Parametry bezdrátové sítě pro připojení koncových zařízení	66
4	Získané výsledky z testování subjektivního vnímání kvality webové služby	69
4.1	Analýza dat získaných z hodnocení subjektivního vnímání kvality pro notebook	69
4.2	Analýza dat získaných z hodnocení subjektivního vnímání kvality pro mobilní zařízení	75
4.3	Vyhodnocení závislosti mezi kvalitou MOS a akceptabilitou pomocí metody PCA	79
4.4	Určení prahů kvality MOS a bodů saturace kvality	82
5	Predikce vnímání kvality a akceptability	84
5.1	Vstupní data a použitá metoda	85
5.2	Návrh predikčních modelů	87
5.3	Výpočet a vlastnosti koeficientů pro predikční modely	90
5.4	Parametry a hodnocení predikčních modelů	92
5.5	Přesnost a struktura predikčních modelů	95
5.6	Zhodnocení predikčních modelů	100
6	Závěr	102
	Literatura	104
	Literatura	111
	Seznam publikací autora práce	111
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	114
	Seznam příloh	116
	A Seznam všech kombinací dílčích testů	117
	B Doplnující grafy zobrazující závislosti konkrétního obsahu na ostatních parametrech sítě	118
	B.1 Hodnocení na notebooku	118
	B.2 Hodnocení na mobilním zařízení	119
	C Vyhodnocení závislosti mezi akceptabilitou a kvalitou	124

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Rozdíl mezi QoE a QoS.	15
1.2	Skupiny faktorů ovlivňující hodnocení.	17
1.3	ACR metoda.	22
1.4	DCR metoda.	23
1.5	PC metoda.	24
1.6	Průběh přenosu dat.	27
1.7	Vliv zpoždění na výsledné MOS	30
2.1	Účastník testu.	35
2.2	Doporučená vzdálenost pro sledování.	36
2.3	Rozložení jednotlivých pracovišť.	37
2.4	Úvod do hodnocení.	39
2.5	Dotazník zobrazený před zahájením testu.	40
2.6	Informace před zahájením testu.	41
3.1	Architektura systému.	49
3.2	Jednotlivé bloky systému TAC.	50
3.3	Sekvence testu.	51
3.4	Zjednodušené schéma databázové struktury.	54
3.5	Struktura projektu.	55
3.6	Struktura aplikační složky projektu.	56
3.7	Diagram toku aplikace a přechodů.	58
3.8	Struktura centrálního databázového systému.	60
3.9	Vnitřní struktura emulátoru webových služeb.	66
4.1	Celkové hodnocení kvality webové služby (různá počáteční zpoždění).	70
4.2	Celkové hodnocení akceptability webové služby (různá počáteční zpoždění).	71
4.3	Hodnocení kvality pro různý typ webového obsahu (počáteční zpoždění 0s).	72
4.4	Hodnocení akceptability pro různý typ webového obsahu (počáteční zpoždění 0s).	73
4.5	Celkové hodnocení kvality pro scénář webové služby (různá počáteční zpoždění).	75
4.6	Celkové hodnocení akceptability pro scénář webové služby (různá počáteční zpoždění).	76
4.7	Hodnocení kvality pro různý typ webového obsahu (zpoždění 0s).	77
4.8	Hodnocení akceptability pro různý typ webového obsahu (zpoždění 0s).	78
4.9	PCA analýza jednotlivých komponent pro notebook.	80
4.10	PCA analýza jednotlivých komponent pro mobilní zařízení.	81

5.1	Model pro predikci MOS (mobilní zařízení).	97
5.2	Model pro predikci MOS (notebook).	98
5.3	Model pro predikci celkové akceptability.	99
B.1	Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "zpravodajství"(idnes.cz).	118
B.2	Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "sociální sítě"(facebook.com).	119
B.3	Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "nakupování"(aukro.cz).	120
B.4	Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "zpravodajství"(idnes.cz).	121
B.5	Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "sociální sítě"(facebook.com).	122
B.6	Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "nakupování"(aukro.cz).	123
C.1	Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro notebook (různá počáteční zpoždění).	124
C.2	Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro notebook (různý webový obsah).	125
C.3	Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro mobilní zařízení (různá počáteční zpoždění).	126
C.4	Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro mobilní zařízení (různý webový obsah).	127
D.1	Model pro predikci MOS (mobilní zařízení).	128
D.2	Model pro predikci MOS (notebook).	129
D.3	Model pro predikci celkové akceptability.	130

SEZNAM TABULEK

1.1	Průměrné reálné rychlosti internetu v mobilních sítích	28
2.1	Velikost webových služeb	33
2.2	Požadavky na osvětlení pro prostředí	36
2.3	Profil skupiny účastníků	45
3.1	Parametry přístupového bodu Mikrotik RouterBoard 433.	67
4.1	Rozdíly v hodnocení různého obsahu za stejných podmínek pro notebook	74
4.2	Rozdíly v hodnocení různého obsahu za stejných podmínek pro mobilní zařízení	79
4.3	Subjektivní práh kvality a saturace kvality	83
5.1	Koeficienty a parametry pro jednotlivé predikční modely.	93
5.2	Parametry pro jednotlivé koeficienty predikčních modelů.	95
A.1	Seznam testů	117

ÚVOD

Oblast mobilních telekomunikací a obzvláště pak koncových zařízení určených pro telekomunikační účely prochází nepřetržitým růstem. Ten je dán nejen stále zvyšujícím se výkonem koncových zařízení, ale i požadavky na přenos stále rostoucího objemu dat. Koncová mobilní zařízení již dávno nejsou pouze terminály pro uskutečnění telefonního hovoru, ale jsou to již plnohodnotná multimediální zařízení s vysokým výkonem. Vezmeme-li do úvahy takovéto zařízení s aktivní službou mobilního internetu, tak je patrné, že při využití možností, které dané zařízení nabízí lze přenést několika násobně více datového provozu než tomu bylo doposud. Jestliže tento fakt umocníme tím, že poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb dále nabízejí zařízení s vloženou SIM kartou, skrze které se lze připojit do sítě Internet prostřednictvím počítače, tak lze očekávat, že objem datové provozu v těchto sítích rychle roste. Dá se předpokládat, že mezi rokem 2011 až 2016 se provoz zvýší 18krát. Další předpoklad hovoří o tom, že v roce 2016 bude z pohledu datového provozu převažovat provoz z koncových zařízení, která jsou připojena bezdrátově. Studie udávají že se tento poměr bude blížit k 61% a zbýlých 39% bude tvořit provoz ze zařízení, která jsou připojena do sítě Internet pevným, kabelovým spojením. Přičemž v roce 2011 ještě stále převažovala zařízení s pevným kabelovým připojením v poměru 55 ku 45 procentům [9]. Tento fakt je výzvou pro poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb a pro celý telekomunikační trh. Zároveň tento fakt představuje vysoké náklady na modernizaci a zvýšení kapacity stávajících mobilních sítí. Nejedná se pouze o zvyšování pokrytí, ale i o investici a nasazení nových technologií. Na druhé straně stojí jejich návratnost. Je tedy nutné zvolit kompromis mezi investicemi a dopadem na koncové uživatele. Jestliže investice do rozvoje sítě jsou z pohledu poskytovatele nízké, tak se tento fakt dříve či později projeví na nespokojenosti koncových uživatelů. Naopak vysoké investice sice zaručí určitou míru spokojenosti, ale prodlouží návratnost a případný zisk z investic. Mezi těmito dvěma póli je nutné nalézt kompromis, který zaručí návratovost těchto investic a zároveň určitou míru spokojenosti koncových uživatelů (zákazníků).

Z toho důvodu začíná být "Subjektivní vnímání kvality" neboli zkráceně QoE z anglického názvu "Quality of Experience" diskutovaný a rozšířený pojem jak v oblasti výzkumu, tak i v oblasti zájmu poskytovatelů mobilních telekomunikačních služeb. Hodnocení subjektivního vnímání kvality pomáhá najít kompromis mezi vynaloženými investicemi do síťové infrastruktury a mírou spokojenosti koncových uživatelů. Tato práce je výsledkem spolupráce mezi poskytovatelem telekomunikačních služeb a univerzitou, jejímž cílem je vyhodnotit subjektivní vnímání kvality koncových uživatelů na různé typy služeb a na různý obsah. Mezi cílené služby byly zařazeny webové služby, stahování souborů různé velikosti do koncového zařízení, nahrání

souborů na server a dále sledování online videa a vysílání [3]. Každá z těchto oblastí má svá specifika. Tato práce se zabývá pouze hodnocením subjektivního vnímání kvality pro webové služby.

Celá práce je rozdělena na několik hlavních částí. Jako první je uvedem popis použité metodiky pro sestavení a vyhodnocení jednotlivých testovacích scénářů a testů. Následuje popis skupiny účastníků pro testování, kteří prováděli jednotlivé testy. Pro uskutečnění testů bylo nutné provést návrh systému, který by umožnil efektivně jednotlivé testy provádět na notebooku a zároveň i na mobilním zařízení. Další kapitola se zabývá tímto návrhem a popisem navrženého řešení a použitých technologií. Jednotlivé testy byly zaměřeny na subjektivní vnímání webové služby s určitými parametry, kde jako výstupní hodnota pro následné vyhodnocení výsledků je zvolena stupnice MOS v rozsahu od 1 do 5. Jako další měřitelný parametr bylo navrženo hodnocení akceptability, která značí ochotu koncového uživatele službu s takovými parametry využívat i v běžném denním životě a případně za službu platit. Akceptabilita představuje z pohledu hodnocení subjektivního vnímání kvality rozšíření pro všechny doposud používané metody v této oblasti. Výsledkem provedených měření je rozsáhlá množina dat. Další navazující část této práce se zabývá analýzou těchto dat a jejich vyhodnocením. Jelikož je prostředí telekomunikačních technologií a služeb velice dynamické a rychle se mění, tak se poslední část této práce zabývá návrhem matematických modelů pro predikci hodnot MOS a akceptability na základě známých (změřených) vstupních hodnot dostupné šířky pásma¹ a počátečního zpoždění i pro hodnoty, pro které nebylo reálné měření provedeno. Tím se prodlužuje aktuálnost provedeného výzkumu v této oblasti. Měření, navržená metodika, počet osob a množství získaných dat jsou v oblasti testování subjektivního vnímání kvality unikátní. Tento fakt podtrhuje i zpětná vazba z významných mezinárodních konferencí. V roce 2013 byla část této práce prezentována na konferenci IEEE Globecom v Atlantě ve Spojených státech [2]. Další část této práce byla následně prezentována na konferenci IEEE International Conference on Communications (ICC) v Sydney v Austrálii [1].

¹Pojem dostupná šířka pásma je použit v následujícím textu a pro digitální telekomunikační systémy vyjadřuje maximální propustnost sítě v daný okamžik v bitech za sekundu.

1 SUBJEKTIVNÍ VNÍMÁNÍ KVALITY SLUŽBY

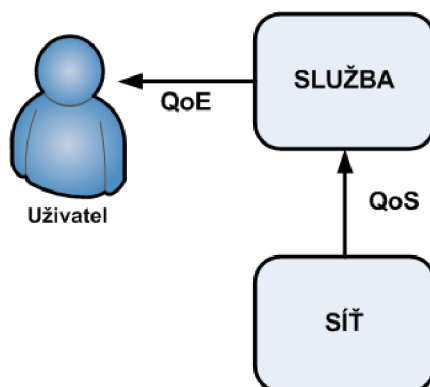
Označení QoE je zkratkou z anglického výrazu Quality of Experience, což lze doslovně přeložit jako "kvalita zážitku". Doslovný překlad v tomto případě není zcela vypovídající, a proto je vhodné použít český ekvivalent "subjektivní vnímání kvality". Subjektivní vnímání kvality může být hodnoceno na stupnici MOS, viz kapitola 1.2.1 a vyjadřuje hodnocení dané služby z pohledu koncového uživatele, neboli člověka, který danou službu využívá. Nejedná se o objektivní parametr, který hodnotí danou službu na základě specifikovatelných parametrů, ale o to, jak na konkrétního člověka působí konkrétní služba. Lze tedy dostat velice rozdílná hodnocení stejné služby od různých koncových uživatelů. To je ovlivněno faktory, ve kterých dochází k tomuto hodnocení, způsobem vnímání koncového uživatele, jeho návyky a zkušenostmi. Tyto faktory ovlivňující hodnocení jsou uvedeny v kapitole 1.1.1. Pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby bylo již navrženo několik různých metod, kdy každá z nich je vhodná pro rozdílné typy hodnocení a pro různý typ hodnoceného obsahu. Více o těchto dostupných metodách je uvedeno v kapitole 1.2. Problematika řešená v této oblasti je velice široká a existuje celá řada metod pro různé typy obsahu. Následující kapitola 1.1, kde je popsána související práce v této oblasti je tedy z důvodu rozsahu omezena na subjektivní vnímání kvality webových služeb.

1.1 Úvod do hodnocení subjektivního vnímání kvality služby

Základní metody používané v této oblasti již existují řadu let. Doporučení ITU-T Rec. dávají základ pro tuto oblast. Doporučení jsou již stará několik let a jsou určena pro systémy a zařízení, která byla dostupná v té době. Z tohoto důvodu již doporučení nejsou zcela použitelná pro dnešní prostředí telekomunikačních sítí. Stejně jako tato práce, tak i ostatní související práce můžou tyto doporučení považovat za základ, který může být dále modifikován pro konkrétní potřeby. Subjektivní hodnocení může být aplikováno na různé typy služeb, ať jsou to webové služby, neboli přenos dat z webového serveru do prohlížeče, nebo stahování souborů, tak třeba i online sledování videa. Dále záleží na síťovém prostředí, ve kterém dochází k přenosu dat pro jednotlivé služby. Mezi tato prostředí například patří různé typy přenosových sítí, které lze obecně rozdělit na pevné drátové sítě a bezdrátové sítě případně mobilní sítě. Zde tedy existuje několik možných kombinací v podobě obsah versus prostředí. Tím vzniká rozsáhlá oblast souvisejících prací pro hodnocení subjektivního vnímání kvality.

Zkratka QoE bývá v některých případech spojována s QoS (Quality of Service - QoS), které spolu částečně souvisejí. Jak již bylo řečeno, tak QoE reprezentuje čistě subjektivní hodnocení z perspektivy uživatele, neboli osoby využívající daný typ služby. Hodnocení QoE se nebere jako objektivní (měřitelný) parametr, který určuje parametry služby nebo systému jako celku, ale závisí na řadě faktorů, které ovlivňují výsledné vnímání. Jako příklad lze uvést doporučení ITU-R Rec E.800 [23], které poskytuje obecný přehled, jak různé faktory mohou ovlivňovat hodnocení subjektivního vnímání kvality služby v oblasti telekomunikací z pohledu dostupnosti a spolehlivosti služby. Například již zmíněná dostupnost a spolehlivost představuje objektivní parametry služby a souvisí s dílčími stavy sítě, které lze objektivně vyjádřit (změřit). Tato oblast objektivních parametrů spadá právě do oblasti hodnocení kvality služby (Quality of Service - QoS). Mezi objektivní parametry lze dále zařadit například vyjádření ztrátovosti paketů v síti hodnotou PER (Packet Error Rate), zpoždění, čas potřebný pro navázání spojení, atd. Velká část výzkumu v oblasti telekomunikací je zaměřena právě na objektivní hodnocení kvality konkrétní sítě a na zlepšování těchto parametrů. Tím lze docílit zlepšení parametrů služby, která je skrze tuto síť poskytována. Hodnocení kvality služby prostřednictvím objektivních parametrů ale nedává přímé informace o subjektivním vnímání služby jako celku koncovým uživatelem [25], [6].

Hodnocení subjektivního vnímání kvality vychází z kvalitativního vyhodnocení telekomunikačního systému a aplikací jako celku, který přesahuje hodnocení systému pouze na základě jeho dílčích objektivních vlastností, které jsou využívány zejména pro definici hodnocení obecné kvality služby. Hodnocení subjektivního vnímání jde dál, směrem ke koncovému uživateli a odráží celkovou "uživatelskou spokojenost" [15], [25].



Obr. 1.1: Rozdíl mezi QoE a QoS.

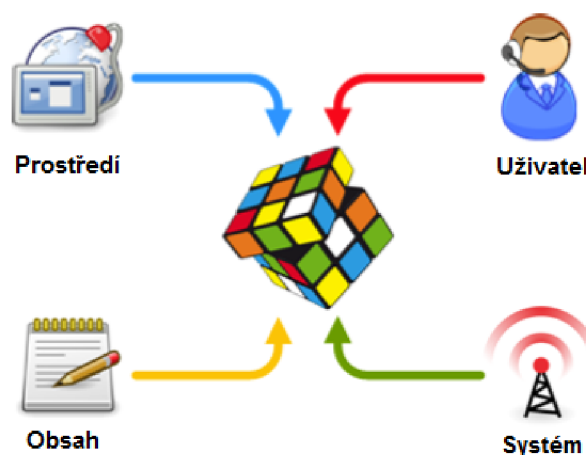
Z obrázku je patrné, že hodnocení založené na objektivních parametrech služby je více důležité z pohledu komunikace a technického řešení daného systému, kde lze přesně definovat parametry systému. Naopak hodnocení subjektivního vnímání kvality přísluší koncovému uživateli, které je určitou mírou ovlivněno právě zajištěním jisté kvality služby (QoS), ale také dalšími subjektivními a netechnickými faktory, viz kapitola 1.1.1.

Cílem této práce je získat výsledky subjektivního vnímání kvality webových služeb v prostředí mobilní sítě. Současných technologií používaných pro mobilní komunikaci existuje několik řešení (GSM, UMTS, LTE), které ve svém základu poskytují koncovému uživateli stejnou službu, ale proces poskytování této služby je odlišný. Z pohledu hodnocení kvality není důležité, které z těchto řešení je použito, ale je důležité jak je příslušný obsah doručen koncovému uživateli. S jakou kvalitou, rychlostí a v jaké formě. Od tohoto se následně odvíjí vnímání služby koncovým uživatelem. Přístup k webovým službám je běžnou aktivitou využívání internetového připojení. Z tohoto důvodu je důležitá rychlost doručení požadovaného obsahu. Z pohledu objektivní analýzy doby doručení obsahu lze použít QoS parametry, které definují vlastnosti přenosové cesty. Tyto parametry mají následně vliv na subjektivní hodnocení [11]. Spolu s přístupem k webovým službám patří mezi další významné využívání připojení zejména stahování a nahrávání souborů a prohlížení online videa. Ranné studie, které se zabývají QoE využívaly pro vyhodnocení pouze tříbodovou stupnici [5], [44], kterou vyjadřovali subjektivní spokojenost koncových uživatelů. Pozdější studie vycházely z tohoto tříbodového hodnocení, které rozšířily o další dva body a tím vznikla pětibodová stupnice MOS [52], [24]. Nejnovější práce v této oblasti [17], [55], [27] již využívají pro vyhodnocení výsledků MOS stupnici. Pro získání výsledků je nutné zvolit metodu, která zaručí určitou míru věrohodnosti a další využitelnosti výsledků. Metod existuje několik a jsou blíže posány v kapitole 1.2. Nejnovější studie, jako je např. [14], popisují využití modifikované metody ACR, která byla původně navržena pro subjektivní hodnocení služeb založených na přenosu hlasu a videa. Pro tento účel bylo dále přijato doporučením ITU-T Rec. E.800 [23], které definuje metody pro hodnocení služeb založených na protokolu IP. Metody popsané v ITU-T doporučeních jsou založeny na přímém hodnocení od koncového uživatele. Dále existují metody, které k získání požadovaných výsledků přistupují odlišným způsobem a to na základě určení hodnoty, které je provedeno z objektivních parametrů sítě. Výzkumné práce [30] [33] uvádějí, jak získat vztah mezi subjektivním hodnocením (QoE) a objektivními parametry sítě (QoS). Diskutabilní je přesnost získané vazby, která nemusí být použitelná pro různé typy obsahu a podmínky v síti. Pro testování subjektivního vnímání kvality se ve velké míře využívalo laboratorní prostředí, kde ITU-T doporučení specifikují parametry tohoto prostředí [17], [23]. Testy provedené v laboratorních podmínkách omezují vliv konkrétního

prostředí a mohou mít tak dopad na celkové hodnocení. V reálném prostředí může na koncového uživatele působit několik dalších vlivů prostředí v daný okamžik, viz kapitola 1.1.1. Tento fakt je ověřen ve smyslu, že je důležité, aby účastník byl v prostředí, které nejvíce odpovídá jeho dennímu životu. Tím lze dosáhnout více přesného hodnocení [36], [53], [54]. Dále výsledky uvedené v [48] ukazují rozdíly v hodnocení pro účastníky, kteří testy prováděli v laboratorních podmínkách a pro účastníky, kteří testy prováděli mimo laboratorní podmínky. Pro všechny metody je společné to, že je nutné provádět testy v prostředí, které je kontrolovatelné a nedochází v něm k nepředvídatelným jevům, které by ovlivnily hodnocení. Dále je nutné pro testování zajistit takové vybavení, které odpovídá parametrům dostupných zařízení a služeb používaných v reálné síti [10].

1.1.1 Faktory ovlivňující subjektivní vnímání služby

Výsledné hodnocení kvality může být ovlivňováno celou řadou faktorů [15]. Tyto faktory mohou mít technický základ, ale mohou být také i netechnického původu, jako například působení konkrétního obsahu na psychiku koncového uživatele. Faktory lze rozdělit do 4 hlavních skupin, které jsou zobrazeny na následující obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Skupiny faktorů ovlivňující hodnocení.

- **Prostředí** - představuje skutečnou situaci v níž se daná mobilní datová služba využívá. Prostředí, ve kterém dochází ke sledování příslušné služby má již samo o sobě velký vliv na výsledné hodnocení subjektivního vnímání kvality. Mezi tyto vlivy prostředí lze například zařadit osvětlení, nebo pozorovací vzdálenost od koncového zařízení. Dále sociální a kulturní vlivy prostředí ovlivňují vnímání služby, kde záleží na typu a účelu prohlížení doručeného obsahu.

-
- **Uživatel** - vzhledem k tomu, že QoE je o vnímání aplikace nebo služby tak, jak byla systémem doručena koncovému uživateli, tak výsledné hodnocení může být ovlivněno vnitřním, ať už psychickým nebo fyzickým, stavem uživatele, jako osoby, tak i dále jeho očekáváním, které bylo vázané na konkrétní typ služby. Očekávání o určité službě značně ovlivňuje výsledné hodnocení a tvoří vnitřní referenci uživatele pro vnímání doručené služby. Sociální a demografický profil a případná zkušenost z minulosti s podobným typem služeb má dále vliv na výsledné subjektivní hodnocení.
 - **Systém** - systém představuje technické vybavení, kterým je doručována a využívána daná služba. Vlastnosti tohoto systému jako celku ovlivňují výsledné hodnocení subjektivního vnímání. S pohledu mobilních komunikací je brán systém jako celek skládající se z koncového zařízení a sítě pro přenos dat. Vlastnosti koncového zařízení i sítě mohou mají vliv na výsledné vnímání služby. Mezi tyto vlastnosti z pohledu koncového zařízení patří například rozlišení displeje, velikost zařízení, rychlost odezvy na jednotlivé požadavky, atd.. Dále lze zahrnout parametry datové sítě určené pro doručení požadovaného obsahu, které jsou definovány v rámci QoS (zajištění potřebné kvality služby). Mezi tyto parametry lze například zařadit dostupnou šířku pásma pro konkrétní službu, zpoždění v síti, atd.. Tyto parametry mají vliv na doručení obsahu směrem k uživateli. Dále zde hraje roli nastavení sítě a firewallů, kde může docházet k filtraci určitého typu služby a tím k degradaci klíčových parametrů přenosu. To se následně projeví na výsledném hodnocení subjektivního vnímání.
 - **Obsah** - doručení obsah v rámci služby je jeden z dalších faktorů. Pro účely získání výsledků z hodnocení lze tento faktor částečně eliminovat výběrem vhodného obsahu pro konkrétní testy. Pro tento účel lze použít jeden z dostupných nástrojů pro monitoring nejnavštěvovanějších webových služeb [1] a pro účely hodnocení v uměle vytvořených podmínkách použít informace z těchto nástrojů. Jestliže dochází k hodnocení na obsahu, který z nějakého důvodu není koncovému uživateli příjemný, tak se tato skutečnost negativně projeví na získaných výsledcích. To platí i v opačném případě, kdy obsah služby může výsledky ovlivnit pozitivně a uživatel se v takovém případě spíše zaměří na obsah než na ostatní parametry služby. Důležité je zvolit co nejvíce neutrální obsah služby.

1.2 Metody pro hodnocení subjektivního vnímání a získání relevantních výsledků

V současné době existuje několik metod, jakým způsobem hodnotit kvalitu služby. Tyto metody mohou být rozděleny do dvou skupin, kde první jsou metody pro subjektivní hodnocení a druhá skupina jsou metody pro objektivní hodnocení. Množství dostupných metod se neustále zvyšuje, kde jednotlivé metody jsou navrženy na míru konkrétnímu prostředí, obsahu a požadovanému způsobu vyhodnocení výsledků. Pro vyhodnocení výsledků pro skupinu subjektivních metod byla navržena stupnice, která odpovídá spokojenosti účastníka se službou. Tato stupnice se nazývá MOS (Mean Opinion Score) a je popsána v kapitole 1.2.1. Zpočátku byla navržena pro vjemové posouzení QoS koncovým uživatelem. Tato stupnice byla definována v doporučení ITU-T Rec. E800 [23]. Následně byla rozšířena a doplněna v doporučeních ITU-T Rec. P.810 a P.833 [20]. Metody definované v těchto ITU-T doporučeních byly ve svém počátku navrženy pro hodnocení subjektivního vnímání služeb založených na přenosu zvuku (hlasu).

Doporučení ITU-T dále definují metody pro objektivní hodnocení. Lze uvést například doporučení ITU-T Rec. P.861 [21], které definuje PSQM (Perceptual Speech Quality Measure), což je metoda pro objektivní hodnocení kvality hlasu v pásmu 300 až 3400 Hz. Tato metoda může být použita pro hodnocení různých kodeků, různých vstupních úrovní pro rozdílný bitový tok. Dále lze uvést doporučení ITU-T Rec. P.862 [22], které definuje metodu PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality) a doporučení ITU-T Rec. G.107 a ITU-T Rec. G.108 [19], která zavádí tzv. E-Model. Tento model je užitečný zejména pro plánování systému pro přenos hlasu, kde se do modelu zadají parametry systému a ten na základě hodnoty R faktoru odvodí přibližnou míru spokojenosti koncových uživatelů s přenosem. Hodnota R faktoru může nabývat hodnot od 0 do 100, kdy hodnota nad 50 se považuje za akceptovatelnou. Hodnota R faktoru je následně přepočítána na hodnotu MOS. Využití E-Modelu je jednou z metod jak nalézt vazbu závislosti mezi objektivními parametry systému a subjektivním vnímáním kvality systému. Bohužel použití E-Modelu dává pouze teoretické hodnoty, které se mohou od reálných hodnot MOS značně lišit a je použitelný pouze pro systémy založené na přenosu zvuku (hlasu).

Velká skupina metod definovaných v ITU-T doporučeních se zaměřuje na hodnocení videa. Jako jednu z nejvíce rozšířených lze uvést metodu definovanou v ITU-T Rec. P.910 [27]. Metoda spočívá ve výběru účastníků pro hodnocení, hodnocení probíhá v prostředí, které je taktéž definováno v doporučení. Pro samotné vyhodnocení výsledků je potřeba vlastní systém, který vyhodnotí získané výsledky. Tento systém již není v doporučení definovaný a není jeho součástí. Pro objektivní vyhodnocení

subjektivního vnímání kvality videa je v doporučení definován ukazatel PSNR (Peak Signal to Noise Ratio). Ukazatel vyjadřuje poměr mezi silou užitečné informace vůči množství šumu.

Výše uvedená doporučení se zabývají hodnocením subjektivním a objektivním hodnocením kvality především pro přenosy založené na zvuku (hlasu) a videa a jsou již poměrně zastaralá. Pro hodnocení v dnešních podmínkách již nejsou dostačující. Vznik nových modifikovaných metod je tedy opodstatněný. Bohužel tak vzniká roztržitost a nejednotný přístup k hodnocení. Co mají v převážné části nové metody společného, tak je to, že jsou založeny na hodnocení získaném skrze průzkum na skupině účastníků. Výše uvedená doporučení nedefinují hodnotící metody pro hodnocení subjektivního vnímání kvality webových služeb v prostředí mobilních sítí, ale lze z těchto doporučení definovat základ, který lze aplikovat i na toto specifické prostředí a vytvořit tak další modifikaci základní metody.

1.2.1 MOS stupnice pro hodnocení subjektivního vnímání kvality

MOS stupnice byla původně navržena pro hodnocení kvality hlasu a videa. Jelikož je důležité převést subjektivní vnímání konkrétní služby do takové podoby, která bude jednoznačně odpovídat subjektivnímu vnímání člověka a zároveň tato hodnota bude jednoznačná a jasně definována pro pozdější vyhodnocení kvality. Ve své podstatě vyjadřuje hodnocení zda daná služba byla "výborná" nebo "velice špatná" z pohledu koncového uživatele. Těmto stavům vnímání na stupnici MOS odpovídají číselné hodnoty od 1 do 5. Stupnice je tedy definována pěti hodnotami, kde hodnota 1 říká, že daná služba byla subjektivně vnímána koncovým uživatelem jako "velice špatná/-nedostačující" a naopak hodnota 5 říká, že daná služba byla vnímána jako "výborná". Kdy přesně je toto hodnocení provedeno záleží na použité metodě v rámci testování. Jednotlivé stupně od 1 do 5 mají svůj slovní ekvivalent, který není přesně definován a může se lišit pro konkrétní způsob použití. Pro využití této stupnice byly zvoleny následující ekvivalenty pro jednotlivé stupně.

- 5 - výborná kvalita,
- 4 - chvalitebná kvalita,
- 3 - dobrá kvalita,
- 2 - dostačující kvalita,
- 1 - velice špatná/nedostačující kvalita.

Během subjektivního hodnocení jsou využity pouze celé hodnoty z MOS stupnice, ale lze se setkat i s desetinným vyjádřením MOS. To zejména při definování systému, jehož parametrem může být stanovení minimální požadované hodnoty MOS například na hodnotu 3,7 MOS. Tato hodnota má své opodstatnění a bude vysvětlena v kapitole 4.4. Jednotlivé konkrétní hodnoty lze použít pro srovnání služeb a lze definovat práh "spokojenosti" koncových uživatelů. Tento práh ve své podstatě udává procento spokojených koncových uživatelů, kde toto procento roste s vyšší hodnotou MOS. Důležité je brát stále v úvahu okolní podmínky a všechny faktory (viz kapitola 1.1.1), které působily v době měření hodnoty MOS [73].

Oblast QoE není jediná, kde může být stupnice použita. Dále se často se využívá pro hodnocení funkce jednotlivých kodeků pro kódování zvuku a videa pro přenosy. Jelikož některé kodeky využívají komprese, která snižuje kvalitu, tak MOS definuje hranici, kdy je zvolená míra komprese ještě stále na přípustné hranici.

1.2.2 Hodnocení z pohledu akceptability

Stupnice MOS dává ve většině případů postačující ohodnocení systému z pohledu subjektivního vnímání. Na základě analýzy v oblasti hodnocení bylo zjištěno, že MOS hodnocení není zcela dostačující pro určení toho, zda by účastník, který se s takovou službou setkal v průběhu testování, byl ochoten takový typ služby používat v běžném každodenním životě. Vysoká hodnota MOS během hodnocení nemusí zcela jasně vypovídat o tomto faktu. Z pohledu poskytovatele služby není pak zcela jasné k jaké hodnotě MOS by měl systém směřovat, aby si zajistil určitý počet zákazníků pro danou službu. Z toho důvodu byla dále naržena stupnice pro hodnocení akceptability.

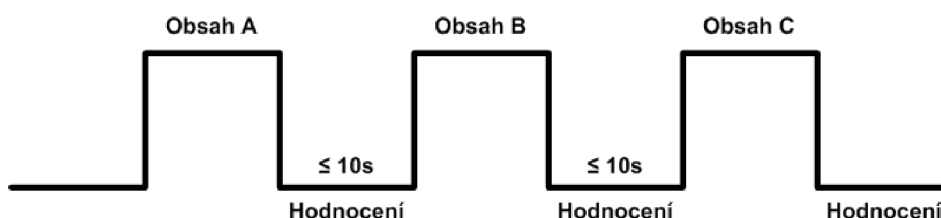
Stupnice pro hodnocení akceptability je ve své podstatě velice jednoduchá a obsahuje pouze dvě hodnoty a to "Ano" nebo "Ne". Hodnota "ano" vyjadřuje spokojenost z pohledu uživatele se službou s ohledem na to, zda by za tuto službu platil. Naopak hodnota "ne" vyjadřuje nespokojenost.

Akceptabilita souvisí se subjektivním vnímáním kvality. V případě služby s kvalitními parametry, to je s dostatečnou šířkou pásma a nízkým zpožděním roste hodnocení MOS a tím se i zvyšuje počet koncových uživatelů, kteří by byli ochotní službu využívat v každodenním životě a tomuto odpovídá akceptabilita. Pro poskytovatele je to velice důležitá informace pro optimalizaci sítě a zajištění tak potřebných parametrů sítě, aby nedocházelo k nežádoucímu faktoru z pohledu poskytovatele, což je ubývání zákazníků. Z toho pohledu je pro poskytovatele mobilních služeb hodnocení na základě akceptability důležitým ukazatelem, který pomáhá určit procento spokojených zákazníků ve spojení s hodnotou MOS. V případě zavedení hodnocení

na základě akceptability se jedná o nový a rozšířený přístup, který nebyl doposud publikován a není obsažen v žádném z ITU-T doporučení a který dává získaným výsledkům další rozměr.

1.2.3 Metoda ACR (Absolute Category Rating)

Metoda ACR je založena na skutečnosti, že obsah pro testování je zobrazen jednou a následně je bezprostředně po ukončení testování hodnocen. Tato metoda se také nazývá SSM (Single Stimulus Method). Metoda, jenž je definována v doporučení ITU-T Rec. P.910 [27] je široce používána jako základ hodnotících metod kvality různých typů obsahů v oblasti telekomunikací [69]. Obrázek 1.3 zobrazuje průběh hodnocení založený na této metodě.



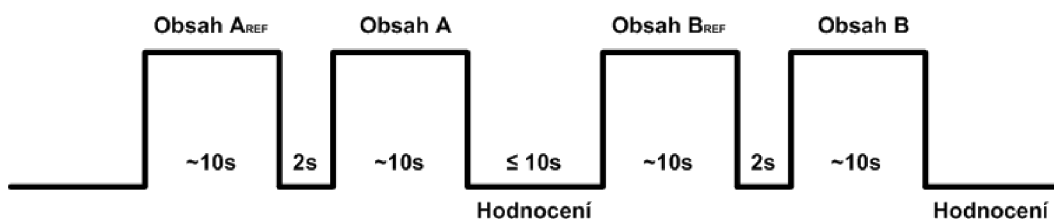
Obr. 1.3: ACR metoda.

Hodnotící obsah je účastníkovi hodnocení spuštěn na dobu trvající 10s, po uplynutí této doby dojde k přerušení zobrazování obsahu a zobrazí se fáze hodnocení. Subjektivní hodnocení je provedeno na stupnici MOS od 1 do 5 (viz kapitola 1.2.1). Hodnota udává míru spokojenosti s testovanou službou a hodnota jedna značí nespokojenost naopak hodnota pět značí spokojenost účastníka s testovnou službou. Metoda definuje, že čas na ohodnocení by měl být stanoven na 10s. Tento čas je doporučený a může být změněn pro konkrétní potřeby testování.

Během této metody je důležitá posloupnost jednotlivých testů z pohledu kvality. Jelikož se kvalita jednotlivých testů mění v závislosti na dostupné šířce pásma a zpoždění pro daný test, tak by tato posloupnost měla být vhodně zvolena. Hodnocení subjektivní kvality pro test s příslušnými parametry je ovlivněno testem hodnoceným v předchozím testu. Jestliže test následuje po testu, který měl velice špatnou kvalitu, tak hodnocení následujícího testu bude vyšší, než kdyby následoval po testu s velmi vysokou kvalitou. Tento efekt lze eliminovat opakováním jednoho testu ve scénáři a vhodně zvolit posloupnost jednotlivých testů.

1.2.4 Metoda DCR (Degradation Category Rating)

Metoda DCR (Degradation Category Rating) je založena na prezentaci obsahu v páru. S touto metodou se lze v některé literatuře setkat pod názvem DSIS (Double Stimulus Impairment Scale). Metoda je založena na tom, že je účastník hodnocení nejdříve seznámen s referenčním obsahem, který je zobrazen po dobu přibližně 10s, následuje krátká pauza (2s) a následně je zobrazen obsah, který je určen pro hodnocení. Tento obsah je taktéž zobrazen po dobu 10s. Poté se přechází k hodnocení. Hodnocení pro metodu DCR je stejně jako v případě metody ACR založeno na pěti stupňovém MOS hodnocení (viz kapitola 1.2.1). Postup hodnocení subjektivního vnímání kvality pro metodu DCR je zobrazen na obrázku 1.4.

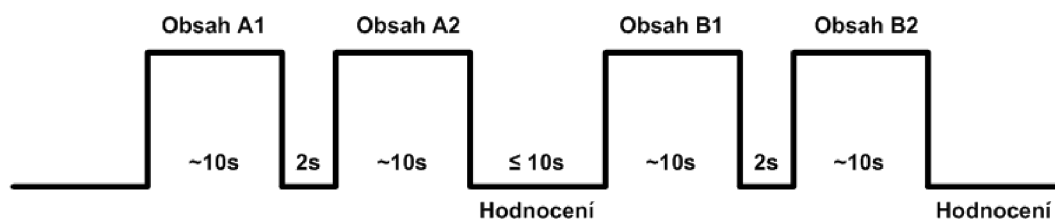


Obr. 1.4: DCR metoda.

Oproti metodě ACR (viz podkapitola 1.2.3), je zde částečně eliminován vliv posloupnosti jednotlivých testů v rámci jednoho testovacího scénáře, jelikož je před každým hodnocením vložen referenční obsah. Nežádoucí vliv této metody je, že prodlužuje dobu hodnocení a snižuje počet efektivních testů z důvodů vkládání referenčního obsahu. Hodnocení jednotlivých testů je sice totožné s metodou ACR pomocí MOS, ale pro odlišení této metody se používá spíše výraz DMOS (Degradation MOS). Z důvodu zobrazování referenčního obsahu je výsledné hodnocení DMOS citlivější než v případě ACR metody.

1.2.5 Metoda PC (Pair Comparison)

Metoda PC (Pair Comparison) je založena na prezentaci obsahu v páru. Tato metoda je opět definována v doporučení ITU-T Rec. P.910 [27]. V případě metody PC není tento pár definován jako referenční obsah, za kterým následuje obsah určený k hodnocení. Metoda PC definuje tento pár jako dvojici po sobě jdoucích testů, kde každý z testů má rozdílné parametry pro načtení obsahu. Účastník testování porovnává subjektivní kvalitu těchto dvou po sobě jdoucích testů. Průběh subjektivního hodnocení pomocí metody PC je zobrazen na následujícím obrázku 1.5.



Obr. 1.5: PC metoda.

Jak je patrné na obrázku 1.5, tak jedna hodnotící sekce je složena ze dvou testů. Každý z těchto testů trvá přibližně 10s a je oddělen mezerou o délce trvání 2s. To je z důvodu, aby účastník testu zaregistroval, že dochází ke změně podmínek. Výsledné hodnocení v případě metody PC není pomocí MOS stupnice, ale účastník v 10s dlouhé době, která následuje po sekvenci dvou testů volí, který ze dvou zobrazených obsahů vnímá subjektivně lépe. Zde se opět dostáváme k problému, kdy pořadí jednotlivých testů může ovlivnit výsledné hodnocení. Z tohoto důvodu je nezbytné volit jednotlivé sekvence jako všechny možné kombinace dostupných testů, které jsou určeny pro subjektivní hodnocení.

Tato metoda poskytuje přímé srovnání dvou různých testů. Touto metodou lze dosáhnout jemného rozlišení v rámci jedné sekvence a dosáhnout tak citlivějšího hodnocení oproti metodě ACR. Jelikož je výsledné hodnocení založené na subjektivním porovnání dvou testů, tak za použití této metody nezískáme absolutní a měřitelné hodnocení pro jednotlivé testy, ale pouze relativní hodnotu. Tato skutečnost vede k časově mnohem náročnějšímu vyhodnocení výsledků získaných metodou PC oproti metodám ACR a DCR, což je její nevýhoda.

1.2.6 Zhodnocení a výběr metody

Výše uvedené podkapitoly popisují jednotlivé metody, které jsou dostupné pro hodnocení subjektivního vnímání určitého typu obsahu. Všechny tyto metody jsou definovány v doporučení ITU-T Rec. P.910 [27]. Jako základ pro další práci byla zvolena metoda ACR (Absolute Category Rating) a to z několika důvodů. Výsledkem hodnocení za použití této metody jsou přímo hodnoty MOS, což je výhodné hlavně z pohledu konečného vyhodnocení výsledků. Tyto výsledky již odpovídají měřitelné stupnici a není nutný žádný další přepočítání, jako je tomu u metody PC (Pair Comparison). V porovnání s metodou DCR (Degradation Category Rating) je metoda ACR méně časově náročná, z důvodu že účastníkovi testu není zobrazován referenční obsah. Výhodou je, že za stejný čas může být testováno větší množství dílčích testů a získán tak větší počet výsledků pro shodnou skupinu účastníků testování. Z

pohledu přesnosti metody je důležité vhodně zvolit posloupnost jednotlivých testů uvnitř každého testovacího scénáře a každý dílčí test několikrát opakovat. S tím, že by konkrétní test měl vždy následovat po testu s rozdílnou kvalitou, tzn. že jednou konkrétní test následuje po testu s lepší kvalitou a následně po testu s horší kvalitou. Tímto postupem lze eliminovat chybu, která může za použití této metody vznikat. Z pohledu implementace v prostředí emulátoru webových služeb se tato metoda dále jeví jako výhodná z pohledu algoritmické náročnosti a času potřebného pro implementaci metody.

1.3 Dostupné typy mobilních sítí a jejich základní parametry

Cílem této práce je zabývat se subjektivním vnímáním kvality webových služeb v prostředí mobilních sítí. Tyto sítě oproti pevné drátové síti nebo bezdrátové síti mají svá specifika. Mobilní sítě se již rozvíjejí několik posledních desetiletí a v současné době je nejvíce běžnou a dostupnou technologií tzv. 3G síť. Pokrytí 3G sítí není na území České republiky stoprocentní, a proto se lze v řídce osídlených oblastech setkat se sítěmi typu 2G, které pro datové přenosy používají technologii GPRS případně rychlejší technologii EDGE. Sítě třetí generace jsou postaveny na standardu UMTS (Universal Mobile Telecommunication System), který existuje v několika verzích a existuje k němu několik rozšíření. Mezi tato rozšíření patří například HSDPA (High Speed Download Packet Access) s maximální teoretickou rychlostí stahování až 14.4Mbps, HSUPA (High Speed Upload Packet Access), HSPA+ (High Speed Packet Access Enhanced) s maximální teoretickou rychlostí stahování 54Mbps. Výhodou UMTS sítí je, že jsou navrženy tak, aby byly schopny přenášet větší objem dat a zajišťovali potřebnou kvalitu služby. Během návrhu této technologie byl proto kladen důraz na to, aby komunikace měla spolehlivý charakter, což není v případě bezdrátové komunikace, kde častěji dochází k chybovosti přenosu, triviální úkol. Během návrhu celého systému UMTS tedy musela být brána v potaz omezená šířka pásma, vyšší zpoždění přenosu a další problémy. S tímto vším se snaží technologie UMTS vypořádat. Důležitý parametr sítí UMTS je teoretická rychlost přenosu, která se pohybuje v rozmezí 384 kbps až 2 Mbps v závislosti na rychlosti pohybu koncového zařízení (terminálu).

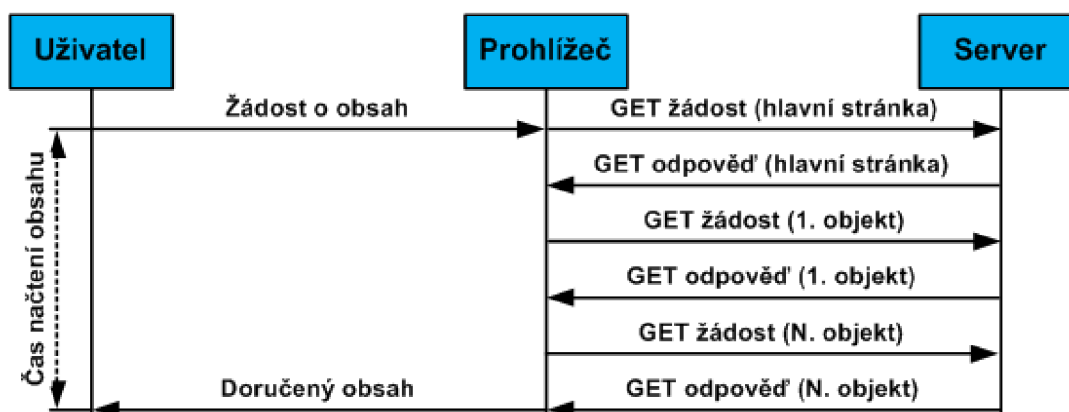
Pro sítě druhé generace (2G sítě) tvoří základ pro datové přenosy technologie GPRS (General Packet Radio Service). Tato technologie je v současné době na území České republiky dostupná všude, kde je dostupné pokrytí GSM (Global System for Mobile Communication). Jako první integrovala spojení na základě přepojování paketů, což nebylo možné realizovat před příchodem této technologie. To umožnilo efektivnější

správu a využití dostupné šířky pásma. Přenosová rychlost závisí na počtu přidělených slotů poskytovatelem mobilních služeb. Teoreticky může být těchto slotů přiděleno až 8, ale v praxi se za dobrých podmínek můžeme reálně setkat s přidělením 4 + 2 sloty, kde jsou 4 sloty pro směr k účastníkovi (download) a 2 sloty směrem od účastníka (upload). Přenosová rychlost pro jeden slot je dále určena použitým kódovacím schématem CS1 až CS4. Maximální teoretická rychlost pro přenos v jednom slotu může dosáhnout hodnoty 21.4 kbps při použití kódovacího schématu CS4. Jestliže tedy budeme uvažovat ideální podmínky, tak maximální teoretická rychlost v síti s podporou GPRS může dosáhnout hodnoty 171.2 kbps. Skutečná reálná rychlost v rámci jednoho slotu se ale pohybuje od 6 kbps do 17 kbps a při počtu 4 standardně přidělovaných slotů pro download se můžeme dostat na reálnou rychlost řádově nižší oproti teoretické rychlosti.

Rozšířením technologie GPRS je technologie EDGE, která stejně jako GPRS využívá základní přístup v podobě alokovaných slotů pro oba směry přenosu. V případě technologie EDGE je navýšení přenosové rychlosti dáno způsobem modulace a rozšířením počtu kódovacích schémat ze 4 na 13. Z toho důvodu vzrostla teoretická přenosová rychlost pro jeden slot na 59.2 kbps. Uvažujeme-li opět ideální případ alokace 8 slotů zároveň, tak teoretická přenosová rychlost může dosáhnout hodnoty až 473.6 kbps. Dále v případě EDGE závisí na rychlosti pohybu koncové stanice, vzdálenosti od vysílače a okolních podmínkách během přenosu. Jestliže uvažujeme standardní kombinaci přidělení 4 + 2 slotů a vliv těchto podmínek, tak se lze dostat na reálné rychlosti v rozmezí 100-150 kbps. Oproti technologií GPRS jde o značné navýšení rychlosti, ale oproti sítím třetí generace je rychlost stále řádově nižší. Lze tedy pozorovat rozdílné podmínky pro přenos v různých oblastech pokrytí.

1.3.1 Webové služby v prostředí mobilních sítí

Webové služby v prostředí mobilní datové sítě umožňují koncovému uživateli přistupovat k webovému obsahu. K tomuto přístupu je použit webový prohlížeč a je zde tedy nezbytné, aby koncové zařízení disponovalo takovýmto webovým prohlížečem. Součástí prohlížeče je pole pro zadávání adresy serveru, ze kterého má být načten webový obsah. Při přenosu obsahu webových služeb se z pohledu sítě jedná o asymetrický, neperiodický (nárazový) datový provoz. Technologie UMTS implementuje protokol RLC (Radio Link Control), který má za cíl zajištění určitých parametrů požadované kvality služby. Protokol RLC zvyšuje spolehlivost založenou na ARQ mechanismu. Pro potřeby webových služeb je dále důležitá přítomnost protokolu TCP, který dále pomáhá zlepšovat parametry přenosu pomocí eliminace chyb. Detailní popis těchto technologií je nad rámec této práce a další informace lze dohledat v příslušné literatuře.



Obr. 1.6: Průběh přenosu dat.

Obrázek 1.6 zobrazuje průběh komunikace mezi uživatelem webovým serverem. Celá komunikace je zahájena po zadání příslušné webové adresy do prohlížeče, kdy dojde k odeslání žádosti webovému serveru (nebo WAP bráně). Velikost doručovaného obsahu je různá v závislosti na typu a obsahu webové služby. V případě použití moderních webových prohlížečů je možné částečně eliminovat množství přenesených dat tzv. "cachováním" jednotlivých objektů v rámci webové služby. Tento přístup funguje tak, že při první návštěvě webové služby dojde k uložení statických objektů do vyrovnávací paměti prohlížeče. Mezi tyto objekty patří například logo webové služby a další grafické prvky použité v rámci služby. Při každé další návštěvě se nejprve ověří, zda není požadovaný objekt již načten ve vyrovnávací paměti z předchozí návštěvy. Jestliže ano, tak se objekt přečte z vyrovnávací paměti a není již dále přenášen prostřednictvím sítě. Jestliže webová služba má spíše statický charakter, tak tato funkce podstatně sníží množství přenesených dat. V případě spíše dynamického charakteru webové služby, kdy je obsah při každé návštěvě různý, se její efektivita snižuje. Tento jev bylo nutné brát v úvahu během provádění jednotlivých testů, jelikož by tato funkce z velké míry ovlivnila výsledné hodnocení.

1.3.2 Reálné parametry sítě získané měřením

Tabulka 1.1 zobrazuje průměrné rychlosti mobilního internetu rozdělené podle poskytovatelů na území České republiky. Hodnoty jsou získané ze serveru DSL.cz [13]. Server DSL.cz poskytuje aplikaci pro měření rychlosti připojení, která je dostupná i pro mobilní zařízení. Hodnoty uvedené v tabulce jsou získány právě prostřednictvím této služby. Aplikace je dostupná pro nejrozšířenější platformy mobilního operačního systému iOS (Apple iPhone) a Android a dále je dostupná také jako webová apli-

kace. Počet všech měření, ze kterých byly uvedené rychlosti získány byl **890 026**. Tento počet zahrnuje jak měření prostřednictvím webové aplikace portálu DSL.cz, tak měření v prostředí stažené mobilní aplikace pro iOS nebo Android. Počet měření prostřednictvím webové aplikace byl **843 294** a počet měření prostřednictvím mobilní aplikace byl **46 732**.

Tab. 1.1: Průměrné reálné rychlosti internetu v mobilních sítích

Sít	Rychlost [kbps]	Měsíční změna	Meziroční změna
O2 GPRS/EDGE	111	-12%	5%
T-Mobile GPRS/EDGE	110	-1%	-21%
Vodafone GPRS/EDGE	103	-1%	2%
O2 CDMA	717	2%	16%
U:fon CDMA	596	-5%	42%
O2 3G	1826	-3%	2%
T-Mobile 3G	2426	-1%	50%
Vodafone 3G	2667	3%	110%
Mobilní internet celkem	1348	9%	146%

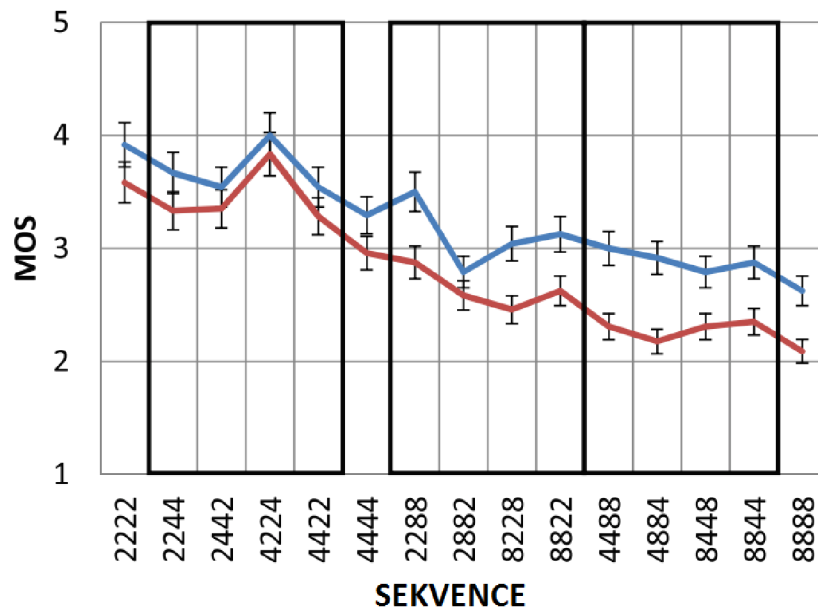
Tyto hodnoty, spolu s hodnotami velikostí jednotlivých webových stránek slouží jako základ pro zvolení škály rychlostí pro hodnocení subjektivního vnímání kvality webové služby. V tabulce 1.1 je patrný rozdíl v rychlostech pro mobilní připojení skrze technologii EDGE/GRPS a skrze 3G. Tento rozdíl je několikanásobný. Rychlejším připojením jsou pokryty zejména města a místa, kde je zvýšený počet koncových uživatelů, naopak méně osídlená místa se musí spokojit pouze v pomalejším připojení. Dále v tabulce není rozlišeno, zda bylo měření provedeno prostřednictvím GPRS nebo EDGE, přičemž rozdíl v rychlosti pro obě tyto technologie je značný, viz kapitola 1.3. Ve spojení s velikostí jednotlivých webových služeb je toto rozlišení mezi GPRS a EDGE důležité, protože může významně ovlivnit čas potřebný pro načtení obsahu.

1.3.3 Vliv zpoždění na vnímání kvality

Majoritní vliv na vnímání kvality dané webové služby má dostupná šířka pásma, viz kapitola 1.3.1. Toto lze definovat jako obecný předpoklad. Čím je dostupná šířka pásma nižší, tím dochází k prodloužení doby načítání příslušného obsahu a tím ke snížení kvality služby. Další a velice podstatný vliv na vnímání kvality má zpoždění obecně.

Studie uvedené v literatuře [60], [74], [14] demonstrují vliv zpoždění na výsledné hodnocení. Studie [14] navíc bere v úvahu typ obsahu. Výsledkem je zjištění, že na služby jako je web a VoIP jsou uživatelé více přísní z hlediska zpoždění. Hodnocení subjektivního vnímání kvality je tak přísnější než v případě stahování souborů, kde je již očekáváno, že příslušná operace bude určitý čas trvat. Z pohledu webových služeb a VoIP se naopak očekává velice rychlá reakce a kontinuita během používání služby, proto zde dochází ke zhoršení MOS hodnocení při nárůstu zpoždění a tím i čekání na požadovaný obsah. Další studie provedená na Technické univerzitě v Berlíně [60] ještě říká, že není dostatečně přesné zaměřit se pouze na zpoždění načítání pouze jedné stránky, ale je nutné zaměřit se na celou sekvenci načítání, které může obsahovat několik dílčích stránek. Studie porovnává vnímání kvality webové služby, která je přístupná skrze webový prohlížeč pro různá zpoždění. Zpoždění je zde definováno, jako součet zpoždění mezi navázáním spojení mezi klientem (webovým prohlížečem) a serverem, a plné načtení webového obsahu. Zpoždění je počítáno od doby, kdy koncový uživatel odeslal na server požadavek o načtení dat až po dobu, kdy je požadovaný obsah kompletně stažen a zobrazen ve webovém prohlížeči. V rámci jednoho testu nebyla testována pouze jedna stránka ale celá sekvence. Po testu sekvence jako celku následovalo ohodnocení celkové kvality prostřednictvím stupnice MOS, viz kapitola 1.2.1.

Testovací sekvence byla sestavena ze 4 dílčích testovacích stránek. Každá z těchto stránek obsahovala 11 objektů, kdy pouze jeden z nich byl relevantní a po kliknutí na něj došlo k přesměrování na další stránku. Před načtením každé z dílčích stránek bylo definováno zpoždění, které mohlo nabývat hodnot 2, 4 nebo 8 sekund. Celková doba načítání byla dále závislá na pozici relevantního objektu na stránce. Navržené testovací scénáře byly kombinací těchto dílčích zpoždění, kde každá stránka v testovací sekvenci měla jiné počáteční zpoždění. Další proměnnou byla pozice správného odkazu na stránce. Odkaz představuje z pohledu webové stránky objekt. Každá stránka byla složena z jedenácti objektů a správný odkaz byl buď na páté pozici (viz brázek 1.7 modrý průběh), nebo byl na deváté pozici z jedenácti (viz brázek 1.7 červený průběh).



Obr. 1.7: Vliv zpoždění na výsledné MOS

Jak vidět v grafu 1.7, který je převzat z literatury [60], tak hodnocení MOS vychází lépe pro sekvence, kde byl objekt na pátém místě z jedenácti. Horizontální osa zobrazuje sekvenci definovaných zpoždění pro 4 po sobě jdoucí stránky. Z grafu je vidět, že pozice relevantního objektu ovlivňuje hodnocení až do výše 0.8 MOS, což je již poměrně vysoká hodnota. Dle předpokladu s rostoucím celkovým maximálním zpožděním klesá výsledná hodnota MOS z hodnoty cca 4 MOS až na hodnotu 2 MOS pro sekvenci čtyř maximálních zpoždění 8888 a pro pozici objektu devět. Studie je zaměřena přímo na vnímání zpoždění a ukazuje, jak toto zpoždění ovlivňuje vnímání kvality. Z pohledu hodnocení je tedy nutné brát v úvahu toto počáteční zpoždění, ke kterému v reálných sítích dochází. Na druhé straně práce nebere v úvahu vliv dostupné šířky pásma což je další klíčový parametr pro vnímání kvality. Studie uvádí, že účastníci testování byli připojeni DSL linkou o rychlosti 16 Mbps a více, což je nepřesná definice a dostupná šířka pásma nebyla monitorována, takže nelze vyloučit, že výsledky mohly být ovlivněny i dostupností šířky pásma, která mohla kolísat a mohla do výsledného hodnocení kvality vnést chybu. Jedním z vhodných řešení by bylo provést monitoring dostupné šířky pásma během provádění jednotlivých testů.

1.3.4 Stanovení klíčových parametrů pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby

Jak je vidět z dosavadní vědecké práce, tak jsou dostupná šířka pásma a zpoždění pro vnímání subjektivní kvality klíčovými parametry, obzvláště co se týče webových služeb a služeb založených na kontinuálním získávání obsahu. Na základě skutečností uvedených v kapitole 1.3.2 byly zvoleny následující hodnoty pro dostupnou šířku pásma:

- 1024kps,
- 512kps,
- 256kps,
- 128kps,
- 64kps,
- 32kps.

Jednotlivé rychlosti jsou zvoleny, tak aby pokryly reálné rychlosti, které jsou dostupné na území České republiky skrze sítě druhé i třetí generace. Na základě informací uvedených v tabulce 1.1 je patrné, že je možné přenášet data i rychlostí přesahující 1024 kbps, což je maximální zvolená hodnota. Vzhledem k velikosti jednotlivých webových stránek, které jsou použity pro testování, by při zvolení vyšší rychlosti došlo pouze k zanedbatelnému zrychlení a tím k nízké variaci výsledků a bodu saturace. Navíc by zvolením další vyšší rychlosti došlo k navýšení počtu testovacích scénářů. Z těchto důvodů nebyla rychlost nad 1024 kbps zahrnuta do testování. Z pohledu poskytovatele mobilního připojení je dalším klíčovým bodem při používání webových služeb koncovými zákazníky délka počátečního navázání spojení, které může dle informací od příslušného operátora trvat až několik sekund v závislosti na použité technologii mobilní datové sítě. Po konzultaci se zástupci poskytovatele mobilních služeb v České republice byly pro testovací účely zvoleny hodnoty počátečního zpoždění v následující škále:

- 0s,
- 1s,
- 3s,
- 5s,
- 7s,
- 11s,
- Ns,
- Error.

Hodnota Ns signalizuje, že po odeslání požadavku o příslušný obsah dojde k zobrazení ikony přesýpacích hodin, které signalizují činnost na pozadí, která odpovídá procesu navazování spojení, tento proces ale trvá nekonečnou dobu a je jen na účastníkovi testování, jak dlouho bude ochoten čekat. Tato doba čekání by ale neměla překročit definovanou dobu, která je uvedena v doporučeních ITU-T. Hodnota *Error* signalizuje, že se navázání spojení nepodaří realizovat a účastníkovi testování je zobrazena chybová stránka.

2 METODIKA PRO TESTOVÁNÍ SUBJEKTIVNÍHO VNÍMÁNÍ KVALITY

Následující kapitola popisuje metodiku, která byla navržena pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby (QoE). Navržená metodika musí splňovat několik důležitých bodů pro úspěšné vyhodnocení výsledků. Prvním z těchto bodů je, že musí být použitelná pro celý rozsah navržených testovacích scénářů a dílčích testů. To znamená, že každý test musí být proveditelný za dodržení všech podmínek metodiky. Metodika musí brát v úvahu širokou škálu faktorů, které by mohly ovlivnit průběh testování a mohly by mít dopad na výsledky jednotlivých testů. Popis skupin faktorů je detailněji uveden v kapitole 1.1.1. Je nutné tyto faktory analyzovat a věnovat jim zvýšenou pozornost, aby byly vždy zajištěny konzistentní podmínky. Metodika musí dále definovat způsob hodnocení pro získání měřitelných výsledků a postup pro vyhodnocení a stanovení závěrů z měření. Použitá metodika pro hodnocení QoE vychází z doporučení ITU-T Rec. P.910 [27]. Toto doporučení poskytuje základ pro návrh metodiky testování webových služeb. Navržená metodika z toho doporučení přebírá metodu hodnocení ACR (Absolute Category Rating) [27] a metody pro určení prahu spokojenosti, viz kapitola 1.2.3. Pro kvantitativní určení míry spokojenosti je použita stupnice MOS, viz kapitola 1.2.1

2.1 Obsah určený pro testy

Volba obsahu pro jednotlivé testy byla založena na informacích získaných z nástroje pro monitoring nejnavštěvovanějších webových služeb [1]. Byly zvoleny služby, kde každá z těchto služeb má rozdílný typ obsahu. Pro testování subjektivního vnímání kvality služby byly zvoleny tři webové servery a jak je vidět v následující tabulce 2.1, tak mají řádově rozdílnou velikost úvodní stránky s obsahem.

Tab. 2.1: Velikost webových služeb

Název	Adresa	Typ	Velikost [kB]
iDnes	http://www.idnes.cz	zpravodajství	518
Aukro	http://www.aukro.cz	prodej	145
Facebook	http://www.facebook.com	sociální síť	0.89

Z pohledu typu obsahu je nejvíce objemný obsah ze zpravodajské webové služby. To je dáno převážně tím, že služba obsahuje několik obrázků na titulní stránce spolu

s reklamou a množstvím textu. Na druhém místě je webová služba nabízející aukční prodej. Uvodní stránka této webové služby obsahuje rozcestník pro jednotlivé kategorie zboží a několik obrázků. Oproti zprovozdajské webové službě je celkový objem přenášených dat několikanásobně menší. Webová služba zaměřena na sociální síť má jasně nejnižší nároky na šířku pásma pro přenos a její úvodní stránka má velikost pouze 0.89 kB. Tento rozdíl je dán vysokou mírou optimalizace webového obsahu, jelikož je služba velice populární. V případě sociálních sítí se může následně měnit velikost přenesených dat v závislosti na typu obsahu, který je v rámci služby prohlížen. Z pohledu poskytovatele mobilního připojení je tedy důležité, jak jsou optimalizované nejvíce populární webové služby, jelikož přenos většího objemu dat zvyšuje nároky na dostupnou šířku pásma a tím celkové náklady na provoz sítě.

2.2 Skupina účastníků testování

Z pohledu skupiny účastníků, kteří se podílejí na testování existuje několik přístupů. První a více běžný způsob je oslovit určitou skupinu lidí a jednotlivé testy provést s touto skupinou v kontrolovatelném prostředí. Druhým způsobem je tzv. "crowdsourcing"[16]. Tato metoda spočívá ve vytvoření systému pro hodnocení, který je vzdáleně přístupný. Účastníci testování jsou anonymní uživatelé tohoto systému, kteří se sami vzdáleně připojí a vykonávají testy. Tyto testy provádění v reálném prostředí, které odpovídá jejich dennímu životu v libovoné době, což zaručí plnou koncentraci na prováděné testování. Výhodou tohoto přístupu je fakt, že účastníci provádějí testy dobrovolně, a proto je takový přístup levný. Další výhodou je, že každý účastník může pocházet z jiného místa a z jiné sociální skupiny, takže výsledky jsou získány na různorodé skupině lidí. Nevýhodou tohoto řešení je doba, kterou může trvat získání potřebného počtu výsledků a dále komplexnost systému pro hodnocení, který musí brát v úvahu celou řadu aspektů. Počínaje od volby obsahu pro různá geografická místa až po důkladné ověření toho, že získané výsledky jsou spolehlivé.

Při volbě klasické metody výběru účastníků testování je nutné, zajistit minimální počet osob, které budou provádět testy. Je to z toho důvodu, aby výsledky testování měly vypovídající hodnotu. Doporučený i minimální počet účastníků je definován v doporučení ITU-R Rec. P.910 [27]. Doporučení definuje, že skupina účastníků by měla být v rozmezí od 4 do 40, kde čtyři účastníci je absolutní minimum. Jako doporučená hodnota se uvádí 15 účastníků. Doporučení dále říká, že v průběhu testování by měl být přítomen tým odborníků, který zajišťuje hladký průběh hodnocení a průběžně analyzují výsledky testů. Tato metoda s sebou nese vyšší náklady na odměny

pro jednotlivé účastníky, ale její výhodou je zaručené získání potřebných výsledků v předem definovaném čase a kontrolovatelné prostředí během testování. Z těchto důvodů byla zvolena právě tato klasická metoda výběru účastníků.

Podmínka pro klasickou metodu byla splněna a v průběhu testování byl vždy přítomen moderátor testů, odborník na emulátor a analýzu výsledků z průběžného testování. Tím byl vždy zajištěn hladký průběh testování. Moderátorova úloha byla skupině účastníků objasnit cíl a průběh testování a důkladně je seznámit s zařízením určeným pro test. Moderátor byl přítomen po celou dobu testu a zodpovídal případně dotazy účastníků.



Obr. 2.1: Účastník testu.

Na obrázku 2.1 je zobrazen účastník testu, který provádí testování na notebooku. Na obrázku je dále patrné mobilní zařízení, které je připraveno pro další skupinu. K notebooku je připojen modem se SIM kartou pro simulaci připojení skrze poskytovatele mobilních služeb.

2.3 Podmínky, prostředí a zařízení určené pro testování

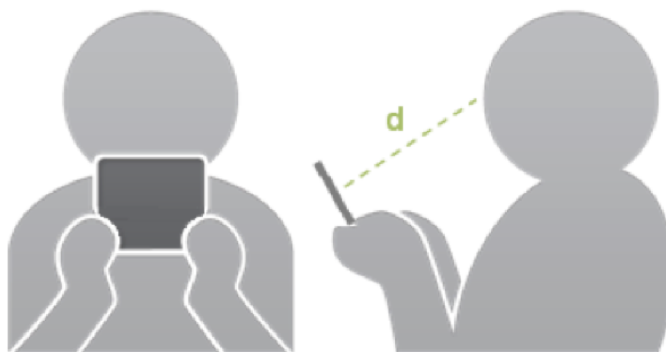
Z pohledu metodiky ovlivňuje výsledky testování celá řada faktorů (viz kapitola 1.1.1), mezi které patří i prostředí pro testy určené. Doporučení ITU-R specifikují

obecné podmínky a požadavky na prostředí, které by mělo být zachováno během provádění jednotlivých testů [18], [27]. Podmínky se týkají jak prostředí tak i zařízení, na kterém jsou testy prováděny. Základní požadavky na vlastnosti jasu obrazovky ve spojení s osvětlením v místnosti pro hodnocení kvality jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 2.2: Požadavky na osvětlení pro prostředí

Poměr jasu mezi neaktivní částí obrazovky a částí s maximálním jasnem	< 0,02
Maximální jas	> 200cd/m ²
Dodatečné osvětlení dopadající na obrazovku (hodnota se měří v kolmém směru vůči obrazovce)	< 200 lux

Dále by se během hodnocení kvality při provádění dílčích testů měla dodržet vzdálenost přibližně 40cm mezi obrazovkou se zobrazeným obsahem pro testování a očima účastníka. Tato vzdálenost je doporučena pro správné vnímání obsahu jednotlivých testů. Vzdálenost se může měnit v závislosti na použitém rozměru obrazovky, kde při podstatně menším rozměru může vzdálenost klesat nebo naopak růst při větším rozměru obrazovky, viz obrázek 2.2.

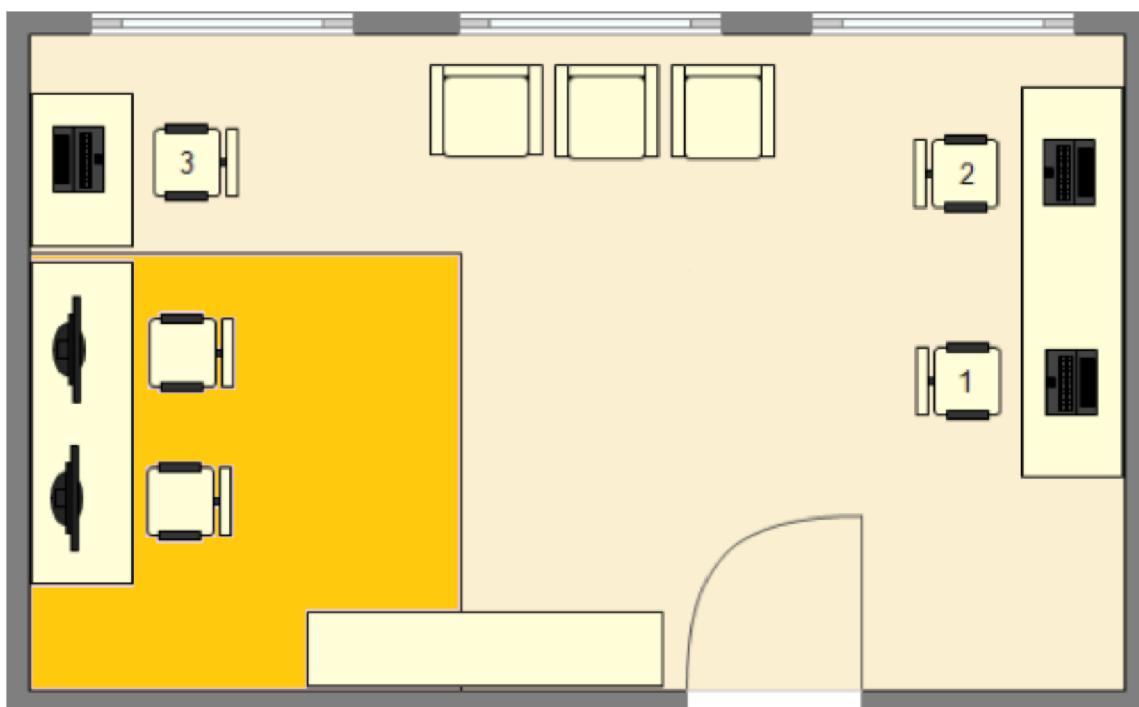


Obr. 2.2: Doporučená vzdálenost pro sledování.

Doporučení ITU-T se primárně zabývá laboratorním prostředím pro provádění testů, které je kontrolovatelné. Bohužel toto prostředí často není pro účastníky testů přirozeným prostředím, ve kterém se denně pohybují. Tato skutečnost má vliv na výsledné hodnocení. Potencionálním rozdílem v hodnocení kvality mezi laboratorním a reálným prostředím se věnuje studie [54].

Z důvodů potřeby kontrolovaného prostředí byla zvolena laboratoř, jako místo pro provedení jednotlivých testů. Laboratoř byla uzpůsobena tak, aby splňovala výše

uvedené požadavky. Disponovala třemi místy určenými pro hodnocení. Tyto místa byla obsazena jednotlivými účastníky, kteří vždy prováděli hodnocení zároveň. Dále bylo v místnosti dohledové centrum, kde docházelo k průběžné analýze získaných výsledků a monitorování správné funkčnosti všech komponent systému navrženého pro hodnocení subjektivního vnímání kvality. Rozložení místnosti a jednotlivých pracovišť je patné na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Rozložení jednotlivých pracovišť.

Jednotlivé testy byly prováděny na dvou typech zařízení - notebook a mobilní zařízení (smartphone). Obě zařízení vždy disponovala SIM kartou od poskytovatele mobilních služeb pro navození pocitu, že se jedná o reálné připojení do mobilní sítě poskytovatele. V případě notebooku se jednalo o modem připojený do usb portu. Ve skutečnosti bylo připojení přesměrováno skrze bezdrátovou síť do prostředí navrženého emulátoru webových služeb. Přesměrování datového přenosu i funkce emulátoru byla pro účastníky hodnocení naprosto transparentní. Detailní informace o použité technologii a emulátoru webových služeb jsou uvedeny v kapitole 3

Koncová zařízení byla vždy stejná na všech třech pracovištích z důvodu zachování konzistentních podmínek hodnocení. Pro potřeby hodnocení byl zvolen 3x stejný notebook a 3x stejné mobilní zařízení. Jako notebook byl zvolen Lenovo X201 s následujícími parametry:

-
- Procesor Intel Core i3 i3-330M / 2.13 GHz (Dual-Core),
 - paměť 2GB RAM,
 - pevný disk 250GB - Serial ATA-300 - 5400.0 rpm,
 - operační systém Microsoft Windows 7 Professional,
 - displej TFT o velikosti 12.1 palce,
 - rozlišení displeje 1280x800 (WXGA),
 - grafická karta Intel HD Graphics.

Jako druhý typ koncového zařízení bylo zvoleno mobilní zařízení značky Samsung Galaxy Nexus. Toto zařízení disponuje operačním systémem Android [2] v jeho čisté podobě. Operační systém je bez dalších úprav provedených výrobcem, to zajišťuje jistou míru spolehlivosti a rychlé odezvy systému. Z tohoto důvodu bylo zvoleno právě toho zařízení jehož parametry jsou následující:

- Procesor Dual-core 1.2 GHz Cortex-A9,
- paměť 1GB RAM,
- interní paměť 16GB,
- operační systém Android 4.0,
- displej o velikosti 4.65 palce,
- rozlišení displeje 720x1280,
- grafický procesor PowerVR SGX540.

Zařízení a prostředí bylo zvoleno tak, aby se vliv prostředí nebo používání zařízení určených pro jednotlivé testy negativně neprojevil do hodnocení. Podmínky prostředí byly v souladu s podmínkami definovanými v ITU-T doporučení a dále byl kladen důraz na eliminaci dalších neočekávaných rušivých faktorů, ke kterým by mohlo dojít v průběhu testování. Z pohledu jednotlivých koncových zařízení byla zvolena taková zařízení, která opět splňují parametry definované v ITU-T doporučeních a jejich ovládání je navíc plynulé a intuitivní. Aby dále došlo k maximální eliminaci individuálních negativních vlivů, jako jsou například preference k určitému typu operačního systému. Tak z toho důvodu byl notebook vybaven operačním systémem Windows a mobilní zařízení systémem Android. Oba tyto systémy patří mezi nejvíce používané a nejvíce rozšířené ve své oblasti.

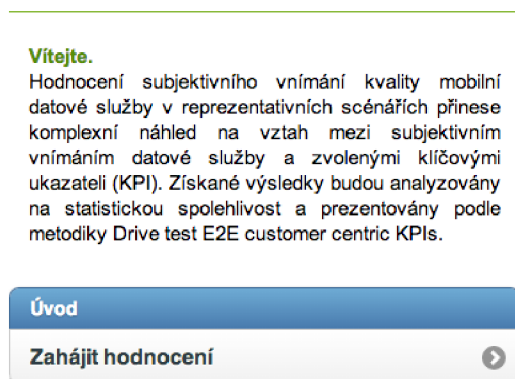
2.4 Způsob hodnocení jednotlivých testů

Hodnocení jednotlivých testů vychází z metody ACR (Absolute Category Rating), které je detailně popsána v kapitole 1.2.3. Hodnocení probíhá tak, že testovaný ob-

sah je zobrazen jednou a následně je hodnocen, teprve poté dochází k zobrazení dalšího obsahu pro hodnocení. Informace o způsobu hodnocení jsou účastníkům vždy předány před začátkem hodnocení. Tyto informace předává moderátor, který je přítomný v průběhu celého hodnocení. Odpovědi jsou automaticky ukládány do centrálního databázového systému. Rozhraní pro hodnocení má několik částí, které jsou zobrazeny na obrázcích 2.4, 2.5, 2.6. Průběh každého hodnocení je přesně definovaný.

- První co uvidí účastník na displeji zařízení, tak je úvodní část. Zde je zobrazen informativní text o tom co je cílem hodnocení, kterého se účastní. V průběhu zobrazení tohoto textu dostává paralelně informace od moderátora, kdy se dozvídá, jakým způsobem by měl jednotlivé testy hodnotit a další informace o průběhu. Tato úvodní část je zobrazena na obrázku 2.4.

Rozhraní pro subjektivní hodnocení kvality (QoE - Quality of Experience)



Obr. 2.4: Úvod do hodnocení.

- Po přechodu z úvodní obrazovky následuje dotazník (viz obrázek 2.5), kde účastník vybere vždy jednu z předdefinovaných odpovědí na několik otázek. Tyto odpovědi jsou zcela anonymní. Jednotlivé otázky jsou zaměřeny na obecné informace jako je pohlaví, věk, vzdělání, typ používaného mobilního zařízení a na typ mobilní služby, kterou využívá (operátor).

Jediná otázka, u které nejsou předdefinované odpovědi a je potřeba odpověď napsat je otázka na věk účastníka. U otázky týkající se operátora se dále zjišťuje zda účastník má tarif z předplaceným kreditem, nebo zda využívá služby operátora paušálně, to znamená, zda platí pravidelně měsíční poplatek za využívání služby.

Pohlaví:

Muž

Žena

Věk:

Vzdělání:

Středoškolské

Vysokoškolské

Doktorské

Typ zařízení:

Klasický mobil

Smartphone

Operátor:

O2 - paušál

O2 - kredit

Vodafone - paušál

Vodafone - kredit

T-Mobile - paušál

T-Mobile - kredit

Něco jiného

Uložit dotazník a pokračovat

Obr. 2.5: Dotazník zobrazený před zahájením testu.

- Po vyplnění dotazníku a odeslání odpovědí následuje první test z celého scénáře pro testování, viz obrázek 2.6. Na obrázku je zobrazeno zadání scénáře, které účastníkovi popisuje co se bude testovat a jak má postupovat při ohodnocení kvality a akceptability.

Pole pro hodnocení kvality a akceptability je před samotným zahájením testu šedé a není aktivní. Před zahájením testu není proto možné vybrat žádnou z odpovědí. To je opatření proti tomu, aby účastník testu neohodnotil test před jeho spuštěním. Po stisku tlačítka "Zahájit test" dojde k otevření nové záložky v prohlížeči s příslušným webovým obsahem, na které dochází k provádění testu

Zadání scénáře:

Ohodnoťte prosím celkovou kvalitu mobilní datové služby pro nahrání souboru. Kliknutím na tlačítko „Zahájit test“ se v nové záložce spustí testovaná úloha. Kliknutím na jednu ze zobrazených ikon se spustí automatické nahrávání souboru. Po skončení anebo opuštění úlohy se překliknutím na předchozí záložku vraťte zpět a proveďte hodnocení celkové kvality služby do hodnotícího formuláře.

Prosím ohodnoťte celkovou kvalitu služby v průběhu zadané úlohy:

5 - Výborná

4 - Chvalitebná

3 - Dobrá

2 - Dostatečná

1 - Nedostatečná

Představte si, že používáte placenou mobilní službu. Byli jste s její kvalitou spokojeni?

Ano

Ne

Zahájit test

Obr. 2.6: Informace před zahájením testu.

příslušného obsahu s nastavenými síťovými parametry emulátorem webových služeb. V okamžiku spuštění testu se tlačítko "Zahájit test" na původní záložce změní na "Uložit hodnocení a pokračovat" a pole pro hodnocení kvality a akceptability se aktivují. Po dokončení testu je nutné vrátit se zpět na záložku, ze které byl test spuštěn. Pro pokračování dalším testem je nutné, aby účastník zadal subjektivní hodnocení testu (MOS) a akceptabilitu. V případě nevyplnění se hodnocení nepodaří uložit a testování nebude pokračovat. Účastník je o této skutečnosti informován upozorněním, že je nutné odpovědět na příslušnou otázku vyplněním hodnocení.

Doba testování každého účastníka byla zvolena na 30 minut. Tato doba byla zvolena na základě prvních testů, kdy bylo zjištěno, že během této doby je účastník na hodnocení soustředěn. Pro dobu vyšší než uvedených 30 minut soustředěnost klesá a výsledky hodnocení přestávají mít konzistentní charakter. Jednotlivé dílčí testy již nejsou časově omezené a záleží na účastníkovi, jak dlouho bude konkrétní test provádět. Záleží i na jeho trpělivosti pro scénáře s nízkou dostupnou šířkou pásma, kdy se webový obsah načítá pomalu. Zde záleží na účastníkovi, zda bude čekat, až se celý obsah načte, nebo zda ukončí test tím, že zavře záložku s webovým obsahem, test ohodnotí a přejde k dalšímu.

2.5 Sestavení jednotlivých testů a scénářů

Scénář definuje sadu, ve které je obsaženo několik testů. Z pravidla je to 26 nebo 27 testů v jednom testovacím scénáři. Účastník testu začíná testovat scénář a během této doby může otestovat všechny testy v daném scénáři ještě před uplynutím stanovené doby pro testování (30 minut). V tomto případě dojde automaticky na pozadí k načtení dalšího testovacího scénáře a pokračuje se v testování až do vypršení časového limitu určeného pro test. V opačném případě se může stát, že účastník nestihne otestovat všechny testy v daném scénáři a tento scénář je následně označen v systému pro hodnocení jako nekompletní. V prostředí centrálního databázového systému dochází průběžně ke kontrole a následně jsou sestaveny nové scénáře, ve kterých jsou obsaženy testy, které se nepodařilo dokončit v předešlých testováních, aby se docílilo toho, že každý test bude otestován tolikrát, kolik je požadováno. Jednotlivé testy a scénáře byly sestaveny s ohledem na typ zařízení, typ obsahu a příslušné síťové parametry.

- Typ zařízení:
 - Notebook,
 - mobilní zařízení (smartphone).
- Typ webového obsahu:
 - Zpravodajství (idnes.cz),
 - sociální sítě (facebook.com),
 - internetové nakupování (aukro.cz)
- Síťové parametry:
 - Šířka pásma (různá pro každý test),

-
- Počáteční zpoždění sestavení spojení mezi klientem a serverem (konečné, nekonečné skončení vypršením časovače a chybovou stránkou, chyba načítání).

Scénáře sestavené pro testování webových služeb byly stejné pro obě zařízení (notebook i mobilní zařízení). Jako počáteční zpoždění bylo definováno několik hodnot, kterých může počáteční zpoždění nabývat. Definice jednotlivých zpoždění je uvedena v kapitole 1.3.4. Jelikož je několik definovaných zpoždění a několik definovaných hodnot šířky pásma, tak by mohlo vzniknout velké množství různých kombinací, z tohoto důvodu byly kombinace voleny následujícím způsobem:

- Pro zpoždění 0s bylo provedeno 20 jednotlivých hodnocení pro každý webový obsah pro všechny šířky pásma:

$$\text{Hodnocení} * \text{šířka pásma} * \text{obsah} * \text{zpoždění} = 20 * 6 * 3 * 1 = 360 \quad (2.1)$$

- Pro zpoždění 1, 5 a 11s bylo provedeno 15 jednotlivých hodnocení pro každý webový obsah a pro šířky pásma 32, 128 a 512 kbps:

$$\text{Hodnocení} * \text{šířka pásma} * \text{obsah} * \text{zpoždění} = 15 * 3 * 3 * 3 = 405 \quad (2.2)$$

- Pro zpoždění 3 a 7s bylo provedeno 15 jednotlivých hodnocení pro každý webový obsah a pro šířky pásma 64, 256 a 1024 kbps:

$$\text{Hodnocení} * \text{šířka pásma} * \text{obsah} * \text{zpoždění} = 15 * 3 * 3 * 2 = 270 \quad (2.3)$$

- Pro zpoždění nekonečno sekund a pro chybu načítání webového obsahu bylo definováno 40 testů. Pro zpoždění nekonečno sekund bylo definováno 20 testů, které byly rovnoměrně rozloženy mezi jednotlivé typy webového obsahu. Pro zpoždění ukončené chybou načítání bylo definováno dalších 20 testů, kterým odpovídala nejnižší přenosová rychlost.

Pro hodnocení subjektivního vnímání kvality webových služeb bylo tedy definováno **1075** jednotlivých testů. Jelikož se hodnocení provádí na dvou různých koncových zařízeních, tak celkový počet jednotlivých testů je **2150**. Tyto testy byly následně rozděleny do skupin, které odpovídají jednotlivých scénářům.

2.6 Profil skupiny účastníků

Podmínkou pro získání relevantních výsledků bylo nutné vytvořit skupinu lidí, kteří se zúčastní testování. Doporučení ITU-T definuje požadavky, které se více méně vztahují pouze na počet lidí ve skupině. V doporučení ITU-R Rec. P.910 [27] je definován minimální a doporučený počet osob, které mají provádět testování. Horní hranice je 40 osob, ale tato hranice je spíše doporučena a není to striktní omezení pro maximální počet osob. V tomto případě lze říci, že čím více osob se testování zúčastní, tak tím více budou získané výsledky přesné. Nevýhodou vysokého počtu osob je složitá a časově náročná koordinace.

Při výběru jednotlivých osob do skupiny bylo v první řadě cíleno na studenty, kterým byla nabídnuta účast na testování v rámci projektu probíhajícího na univerzitě. Jejich studium je technicky zaměřeno, a proto mají mnohem více zkušeností s tímto typem technologií. Tento fakt zaručuje, že jednotlivé testy prováděné studenty dávají přesné a více kritické výsledky. Pro poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb tvoří tak nejvíce kritickou skupinu zákazníků. Z důvodu účasti velkého počtu studentů na testování byl tak pokryt nejhorší možný scénář z pohledu náročného zákazníka.

Jelikož bylo žádoucí, aby se testů zúčastnili i lidé, kteří nepocházejí z řad studentů, tak byl vytvořen systém veřejné poptávky, který měl přilákat jednotlivé účastníky testování z řad lidí mimo univerzitu. Poptávka po těchto potencionálních účastnících probíhala formou nabídky na veřejných serverech a za účast na testování byla každému účastníkovi vyplacena menší odměna z rozpočtu projektu. Celkový počet účastníků, který se ve finále podílel na testování byl 194, což představuje velkou skupinu a tím i velké množství získaných dat pro analýzu. Účastníci byli dále rozděleny podle toho, jestli prováděli testování na notebooku, nebo na mobilním zařízení. Profil této skupiny je zobrazen v tabulce 2.3.

Z rozdělení je patrné, že ze 194 účastníků jich hodnotila více než polovina na mobilním zařízení. Toto rozdělení je dáno tím, že mobilní zařízení s aktivní datovou službou se stávají v poslední době velice populární. Z tohoto důvodu byla větší skupina určena pro mobilní zařízení. Dále ve skupině převládají studenti, kteří tyto technologie využívají v denním životě. Nízký věkový průměr byl dán tím, že větší část ze všech účastníků je z řad studentů. Dále je také patrné, že velká část z účastníků využívá mobilní služby formou paušálu oproti menší skupině využívající předplacenou službu. Z pohledu velikosti skupiny se v tomto případě jedná o unikátní testování. Publikace zabývající se QoE, která je dále zaměřena na porovnání výsledků získaných v laboratoři s výsledky z reálného prostředí popisuje tři studie. Pro každou studii byla zvolena skupina osob o velikosti 26, 32 a 17 osob s věkovým průměrem do 35.42 let [54]. Publikace zabývající se vlivem zpoždění a doby

Tab. 2.3: Profil skupiny účastníků

	Notebook	Mobilní zařízení (smartphone)
Věk	23,15 (min: 18, max: 31)	22,51 (min: 17, max: 46)
Pohlaví	14 žen, 72 mužů	26 žen, 82 mužů
Skupina	61 studentů, 25 placených	82 studentů, 26 placených
Status	25 pracujících, 61 studentů	26 pracujících, 82 studentů
Vzdělání	35 středoškolské, 51 vysokoškolské	60 středoškolské, 48 vysokoškolské
Typ mobilního zařízení	34 klasický, 52 smartphone	50 klasický, 58 smartphone
Typ služby	18 O2 paušál, 5 O2 kredit, 25 Vodafone paušál, 6 Vodafone kredit, 16 T-Mobile paušál, 6 T-Mobile kredit	25 O2 paušál, 5 O2 kredit, 17 Vodafone paušál, 18 Vodafone kredit, 28 T-Mobile paušál, 11 T-Mobile kredit

čekání na požadovaný obsah v mobilních sítích použila pro testy skupinu o 51 lidech [74]. Publikace, která je zaměřena na analýzu vlivu zpoždění během načítání webového obsahu provedla testy se skupinou o 25 lidech [60]. Počet osob v uvedených příkladech je několikanásobně nižší, což dokazuje rozsah provedených testů.

3 PLATFORMA PRO HODNOCENÍ SUBJEKTIVNÍHO VNÍMÁNÍ KVALITY SLUŽBY

Pro hodnocení subjektivního vnímání kvality bylo nutné disponovat systémem, který je schopen dynamicky měnit potřebné síťové parametry. Změna klíčových parametrů se musí provádět na pozadí bez jakéhokoliv dalšího zásahu uživatele. Jakýkoliv další zásah, který by se prováděl během testování by mohl ovlivnit hodnocení a mohlo by docházet ke zkreslení výsledků, což je nežádoucí jev. Cílem bylo tedy navrhnout takové prostředí, které bude transparentně na pozadí nastavovat příslušné síťové parametry, aniž by se o tom uživatel dozvěděl. Tato změna parametrů musí být časově velmi rychlá, aby nedocházelo k dalšímu nežádoucímu zpoždění během testování, které by mohlo opět negativně ovlivnit výsledky testů. Po stanovení podmínek na daný systém byla provedena analýza dostupných řešení a současné práce v této oblasti, viz kapitola 3.1. Po této analýze bylo následně rozhodnuto a přistoupeno k tomu, že potřebný systém pro hodnocení subjektivního vnímání kvality bude navržen a následně realizován, tak aby splnil všechny klíčové požadavky.

3.1 Dostupná řešení a metody

V předchozí kapitole 1.2, byly popsány metody, které je možné použít jako základ pro hodnocení subjektivního vnímání kvality. Pro realizaci samotného hodnocení je nutné zvolenou metodu implementovat v rámci celé platformy, která umožní provádět jednotlivé testy a shromažďovat výsledky z hodnocení. S tím souvisí klíčová vlastnost platformy a to je nastavení potřebných síťových parametrů (počáteční zpoždění, dostupná šířka pásma) pro konkrétní test v rámci jednoho scénáře.

Pro modelování chování sítě za určitých podmínek jsou dostupné nástroje, které jsou schopné síť a její parametry simulovat. Mezi takovéto simulační nástroje patří například prostředí OPNET Modeler [43], které je schopné simulovat několik druhů různých typů sítí včetně pokročilé konfigurace provozu v síti. Dalším zástupcem této kategorie je prostředí NS3 (Network Simulator) [41]. Všechny tyto nástroje jsou velice robustní a pro jejich používání je potřeba množství znalostí. Tato prostředí mají však velký potenciál pro simulaci standardních typů sítí, topologií a provozu, kdy není potřeba příliš velký zásah do již existujícího síťového modelu. Pro jakékoliv úpravy, nebo návrhy vlastních simulačních modelů je nutné znát prostředí jako celek, které je velice komplexní. Hledání případných chyb je časově náročné a volně dostupná podpora v podobě návodů a řešení dílčích problémů je pouze omezená. Nevýhodou simulačního prostředí bývá jeho nepřesnost, jelikož použité algoritmy

jsou založeny na určité predikci a matematické analýze. Podmínky v reálném prostředí mohou být odlišné, obzvláště v případě bezdrátového prostředí, kde přenos dat ovlivňuje celá řada nepředvídatelných faktorů [12], [5].

Další oblastí jsou nástroje, které jsou schopné emulovat síť. To znamená, vytvořit kontrolovatelné prostředí s určitými parametry. To umožňuje měnit reálné parametry sítě v závislosti na konfiguraci daného emulátoru. Takový přístup je podstatně levnější variantou oproti změně cílové infrastruktury v závislosti na požadavku na konkrétní podmínky. Vrstva, která zajišťuje emulaci parametrů sítě může být konfigurována například pro daný typ dostupné šířky pásma, zpoždění a nebo degradaci některých parametrů sítě. Pro potřeby emulace síťového prostředí existují tři základní skupiny emulátorů:

- Emulátory virtuální sítě,
- emulátory linky,
- hybridní emulátory.

Popis jednotlivých skupin a jejich zástupci jsou uvedeny v literatuře [42]. Nejblíže požadavkům na systém pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby jsou emulátory linky. Tyto emulátory umožňují konfiguraci síťových parametrů jako je zpoždění, ztrátovost a šířka pásma. Mezi nejvýznamnější zástupce této kategorie patří Dummynet [50], NISTNet [40], WANem [62] a TCS (Traffic Control Subsystem) [34] v prostředí Linuxu.

Všechny tyto emulátory pracují na podobném principu. Po přijetí paketu na příslušném rozhraní dochází k jeho analýze. Na základě této analýzy jsou aplikována příslušná pravidla, která jsou definována emulátorem linky. Těchto pravidel může být celá řada. Po aplikaci a splnění všech pravidel je následně paket předán na příslušné rozhraní a odeslán.

Jeden z klíčových požadavků na systém je konfigurace délky trvání počátečního zpoždění. Toto zpoždění je definováno jako čas, který je potřeba k sestavení spojení mezi klientem a serverem. Následně po sestavení spojení dochází k výměně dat mezi klientem a serverem. V případě webové služby to je zpoždění od zadání požadavku klientem (zadání webové adresy do prohlížeče) a následným přijetím prvního objektu webové služby. To je specifický požadavek na emulátor, který nepodporuje žádný z výše uvedených. Dále je nutné disponovat kontrolovatelným prostředím, které je schopné ukládat výsledky jednotlivých testů. Za použití některého z výše uvedených nástrojů by bylo nutné takovou funkcionalitu dodělat nad rámec základní funkcionality nástroje.

3.1.1 Dostupná platforma pro subjektivní hodnocení kvality webových služeb

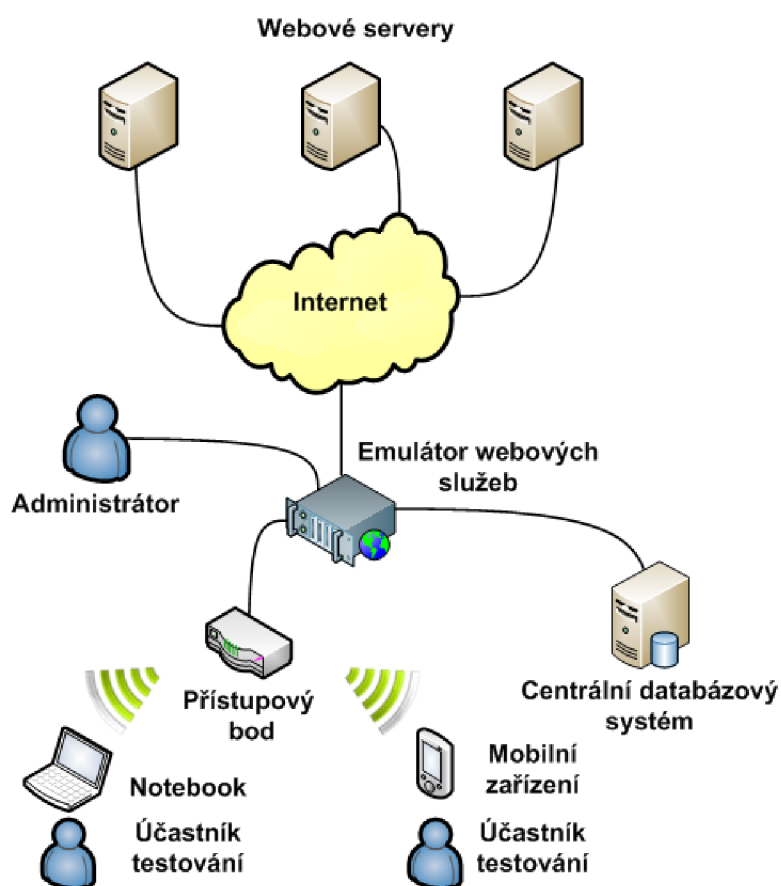
Jak již vyplývá z kapitoly 3.1, tak žádný již dostupný nástroj nelze použít bez dodatečného rozšíření a modifikace pro provedení testů subjektivního vnímání kvality. Ke stejnému závěru dospěla i výzkumná skupina z Institutu informačních technologií rakouské univerzity, kde pro potřeby hodnocení začali vyvíjet platformu, která by zajistila všechny potřebné funkce [46].

Navržená platforma má za cíl snížení potřebného času pro návrh a provedení jednotlivých testů zaměřených na hodnocení webových služeb. Její použití je možné jak v laboratorních podmínkách, tak v reálném prostředí. Návrh platformy má za základ doporučení ITU-T Rec. BT.500 [18] a ITU-T Rec. P.910 [27]. Výhodou této platformy je, že jednotlivé testy lze provádět na zařízeních, které obsahují webový prohlížeč a mají přístup k internetu. Jednotlivé testy, logika platformy a ukládání výsledků funguje na serveru a platforma umožňuje vzdálený přístup přes protokol HTTP a rozhraní HTML5 nebo Adobe Flash. Tyto technologie neboli rozhraní lze využít na všech dnes podporovaných zařízeních, takže odpadá omezení v použití platformy pouze pro některá zařízení.

Platforma umožňuje skrze webovou službu hodnotit pouze omezený typ obsahu, který je uměle vytvořen a neodpovídá tak reálné situaci. Skrze webové rozhraní je možné nadefinovat typ obsahu, který musí být vložen ručně, to znamená, že v případě návrhu scénářů a jednotlivých testů musí být každý tento test definován zvlášť a nelze testovat subjektivní vnímání kvality na libovolném reálném obsahu. Navržená platforma nedisponuje žádným emulátorem síťových parametrů a vše je řešeno pouze na aplikační vrstvě. Což je použitelné pro vlastní obsah, ale v případě hodnocení subjektivního vnímání kvality reálné webové služby v reálném čase je toto řešení nevyhovující. Dále nepodporuje nastavení počátečního zpoždění, které simuluje navázání spojení mezi klientem a serverem, což je v případě této práce důležitou vlastností.

3.2 Návrh architektury platformy pro subjektivní hodnocení

Cílem této kapitoly je popis navržené architektury. Celá architektura se skládá z několika bloků, které spolu vzájemně komunikují. Jádrem celého systému je síťový emulátor, který tvoří bránu do sítě Internet. Emulátor je řízený hodnotícím a řídicím centrem TAC (TiMo Assessment Centre). K emulátoru je připojen přes síťové rozhraní bezdrátový přístupový bod, který poskytuje připojení pro koncové body do sítě Internet. Součástí celé architektury je rozsáhlý databázový systém, který slouží jako úložiště pro testovací scénáře a zároveň jako úložiště pro výsledky všech provedených testů.

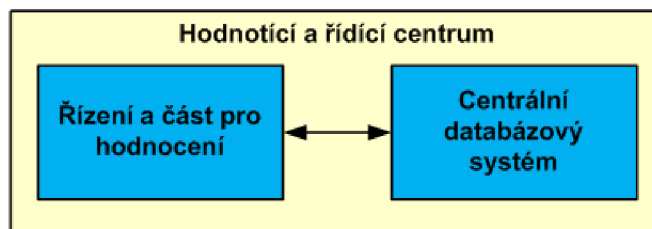


Obr. 3.1: Architektura systému.

3.2.1 Hodnotící a řídicí centrum

Hodnotící a řídicí centrum (TAC) se skládá ze dvou základních bloků, viz obrázek 3.2. Hodnotící a řídicí část řídí emulátor, kterému nastavuje potřebné parametry na

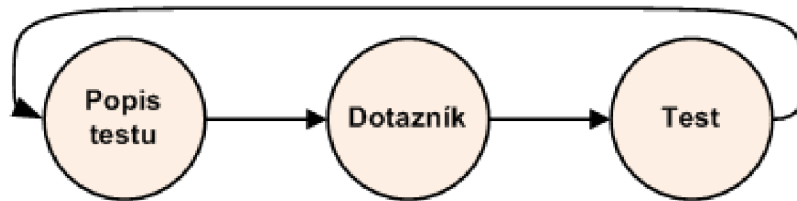
základě aktuálního testu. Druhou a nedílnou součástí TAC je centrální databázový systém. Z pohledu realizace představují oba bloky procesy, které běží na stejném systému.



Obr. 3.2: Jednotlivé bloky systému TAC.

Hodnotící centrum poskytuje grafické rozhraní pro hodnocení a testování jednotlivých scénářů a část pro řízení emulátoru. Parametry pro testované scénáře jsou čteny z centrálního databázového systému. Práce s uživatelským rozhraním se dělí do tří kroků, kterými se prochází během každého testování, viz obrázek 3.4. Pro zahájení testu je rozbrazen stručný popis následujících kroků. Tento popis dává základní informace účastníkovi testování o tom, jak celý proces úspěšně zvládnout. Jsou to pouze základní informace, protože před zahájením každého testu je přítomný moderátor, který každému účastníkovi testování detailně vysvětlí celý proces od ovládnutí daného zařízení až po informace a podmínky, které by měly být dodrženy během celého testu. Po přečtení úvodních informací a počátečním školení následuje dotazník. Dotazník obsahuje 5 základních anonymních otázek o pohlaví, věku, vzdělání, typu mobilního zařízení a používaného typu mobilní služby. Po vyplnění všech položek dochází k přechodu k samotnému testování. Po zahájení testování dojde ke spuštění časovače a načtení potřebných síťových parametrů, které mají být aplikovány pro konkrétní test. Načtení síťových parametrů je provedeno z centrálního databázového systému. Mezi tyto parametry patří popis testu, šířka pásma pro downlink, šířka pásma pro uplink a velikost počátečního zpoždění. Zahájení testu se provede stiskem tlačítka ("Zahájit test") na displeji. Následně dojde k aplikaci potřebných síťových parametrů v emulátoru, spustí se nové okno prohlížeče s konkrétním obsahem a přichází fáze, kdy účastník testování hodnotí kvalitu. Po stisku tlačítka "Zahájit test" se provede několik důležitých kroků, které souvisejí s nastavením všech potřebných parametrů v emulátoru pro mobilní služby. Tyto kroky jsou prováděny na pozadí a pro účastníka testování jsou zcela transparentní. Mezi tyto kroky patří:

- Generování skriptu, který slouží pro nastavení vlastností emulátoru,
- kopírování skriptu do emulátoru prostřednictvím SSH [66],
- spuštění skriptu a nastavení potřebných parametrů emulátoru,



Obr. 3.3: Sekvence testu.

- otevření nového okna v prostředí webového prohlížeče s příslušnou adresou pro testování.

Detailnější pohled na implementaci jednotlivých kroků je uveden v následující kapitole 3.3. Uživatelské rozhraní pro hodnocení jednotlivých scénářů je navrženo jako webová aplikace, která je spuštěna uvnitř webového prohlížeče. Tato část aplikace pro svůj běh využívá knihovnu jQuery Mobile [64]. Výhodou této knihovny je, že je postavena na programovacím jazyce JavaScript, který přináší několik následujících výhod pro programování klientských webových aplikací [58].

- Poskytuje možnosti optimalizace pro mobilní zařízení - tato vlastnost je velice důležitá z toho důvodu, že jedno z používaných zařízení pro hodnocení kvality je právě mobilní zařízení (smartphone) s operačním systémem Android. Knihovna JQuery Mobile poskytuje komponenty uživatelského rozhraní pro takovýto typ zařízení spolu s implementací událostí, které jsou vyvolány dotykem na displej.
- Nezávislost na platformě operačního systému - výsledné rozhraní může být spuštěno na jakémkoliv z běžně rozšířených operačních systémů. Ať už se jedná o operační systém určený pro mobilní zařízení, nebo operační systém určený pro počítače.
- Rychlost provádění skriptů uvnitř prohlížeče - aplikace založené na JavaScriptu jsou velice rychlé. Pro jejich vývoj není potřeba žádné speciální prostředí. Pro vývoj stačí běžně dostupný webový prohlížeč, který slouží jako běhové prostředí aplikace a textový editor pro vývoj.
- Podpora HTML5 [68] a CSS3 [67] - tyto dvě technologie se stávají velice populární v oblasti vývoje webových aplikací. Usnadňují a sjednocují vývoj webových aplikací, dále přinášejí podstatné zlepšení vizuálního pojetí komponent a rozšiřují jejich funkcionalitu. Knihovna jQuery Mobile podporuje obě tyto technologie.

Spolu s jQuery Mobile existuje celá řada dalších rozšiřujících knihoven. Z tohoto pohledu jQuery Mobile patří mezi nejvíce používanou. Disponuje velice přehlednou a rozsáhlou dokumentací, která je důležitá pro rychlý vývoj a hledání chyb. Z tohoto důvodu byla zvolena právě tato knihovna. Licence, pod kterou je jQuery Mobile poskytované je open source a zcela zdarma. Aplikace postavené na této knihovně lze spouštět na počítači i mobilním zařízení. Jelikož testy probíhaly na notebooku a mobilním zařízení, tak stačilo vyvinout pouze jednu aplikaci pro obě zařízení. Z tohoto pohledu došlo ke značné úspoře času oproti řešení, kdy by se po každý typ zařízení musela vyvinout vlastní aplikace.

Jelikož JavaScript a knihovna jQuery Mobile slouží pouze pro vývoj klientských aplikací bylo potřeba dále zvolit technologii, která bude použita pro obsluhu požadavků z klientské aplikace a bude provádět řízení a komunikaci mezi klientem a emulátorem webových služeb a centrálním databázovým systémem. Pro vývoj serverové části aplikace bylo zvoleno PHP [65]. Jeho popularita, rozsáhlá dokumentace a podpora byla opět jednou z hlavních výhod. Tato technologie je podporována většinou běžně používaných operačních systémů, včetně Linuxu a souvisejících variant vycházejících z Unixových systémů (např. HP-UX, Solaris and OpenBSD). Další jeho výhodou je fakt, že je PHP podporováno velkou skupinou webových serverů. Jelikož se jedná o serverovou technologii, tak pro svůj běh potřebuje právě webový server. Technologie PHP integruje komunikaci s několika databázovými systémy, což z pohledu implementace bylo velice důležité. Součástí celého řešení je centrální databázový systém, který je postaven na MySQL [37] databázi a právě PHP zajišťuje komunikaci s tímto systémem. Z centrálního databázového systému čte potřebné informace, které předává klientské aplikaci a naopak klientská aplikace předává data aplikaci vytvořené v PHP, která je následně do databáze ukládá. Technologie PHP je stejně jako jQuery Mobile poskytováno pod bezplatnou licenci, která umožňuje tuto technologii používat bez jakýchkoliv poplatků a omezení.

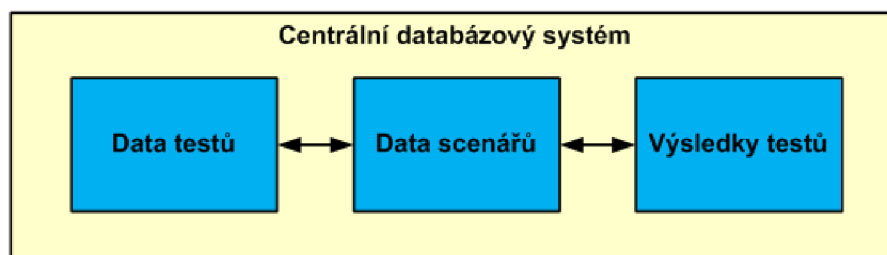
Jak již bylo zmíněno, tak PHP pro svůj běh vyžaduje webový server. Pro tyto účely byl zvolen HTTP Apache Server [63]. Jedná se opět o nejrozšířenější webový server, který je dostupný pro několik platforem operačních systémů a jeho počátky sahají již do roku 1996. Webový server Apache poskytuje velké množství webových služeb včetně CGI, SSL, virtuálních domén a dalších. Lze ho dále rozšířit o dodatečnou funkcionalitu prostřednictvím rozšiřujících modulů. Poskytuje jednoduchou konfiguraci a ve spolupráci s technologií PHP se jedná a velmi výkonné a rychlé řešení [61]. Jako alternativa k webovému serveru Apache existuje několik dalších řešení, která nejsou tak rozšířena, nebo naopak jsou určena pro podnikové enterprise řešení, kde roste jejich složitost, obtížná konfigurace a mění se licenční podmínky [38] [39] [31]. V případě webového serveru Apache je licence opět volná a zdarma.

3.2.2 Centrální databázový systém

Druhou částí hodnotícího a řídicího centra (TAC) je centrální databázový systém. Centrální databázový systém je serverový proces, který je spuštěn v prostředí operačního systému na stejném serveru jako ostatní procesy. V prostředí je vždy spuštěna pouze jedna instance, která je sdílena mezi ostatními běžícími procesy, které žádají o přístup k datům. Každý proces, který chce číst, nebo zapisovat do centrálního databázového systému, musí vytvořit své vlastní spojení. Skrze toto spojení je pak možné s databázovým serverem komunikovat. Ten v sobě sdružuje všechny konfigurace scénářů a parametry testů, výsledky dotazníků a zároveň výsledky všech provedených testů. Všechna potřebná data jsou tedy uložena centrálně na jednom místě. To usnadňuje jejich správu a následnou analýzu.

Centrální databázový systém je založen na platformě MySQL [37]. Tato platforma nabízí uchování dat v podobně relačního systému. Dále poskytuje přístup několika uživatelů zároveň. Proces, který se snaží číst nebo zapisovat je také uživatel. To je tedy výhodné z toho pohledu, že k centrálnímu databázovému systému může být připojeno několik procesů zároveň. Pro administraci struktury databáze a příslušných dat lze využít nástroj, který poskytuje uživatelské rozhraní pro snadnější obsluhu. Pro tento účel bylo použito rozhraní phpMyAdmin [45]. Databázová platforma MySQL je opět široce používaná technologie, která poskytuje vše co bylo pro daný projekt potřeba. S tím souvisí velmi dobrá dokumentace a podpora.

Struktura dat uvnitř centrálního databázového systému je sada tabulek, které musí splňovat určitá pravidla. Tabulky jsou vzájemně závislé a jsou propojeny vazbami. Vazby a pravidla pro tvorbu struktury databáze se definují jako normální formy [57]. Základem celé struktury jsou tabulky, které definují jednotlivé scénáře, příslušné testy a výsledky. Každý scénář obsahuje několik testů. Pro účely testování to bylo vždy 26 nebo 27 testů v rámci jednoho scénáře. Každý z těchto testů je definován síťovými parametry, které odpovídají danému testu, jako je např. šířka pásma pro downlink a uplink, nebo délka počátečního zpoždění. Pro ukládání výsledků jednotlivých testů slouží tabulka ("Results"). V té jsou výsledky uloženy pod jednotlivými identifikátory ID. Řádek tabulky obsahuje v základu identifikátor účastníka (náhodné číslo), identifikátor příslušného testu a scénáře a zvolenou odpověď. Detailnější popis struktury databázového systému je uveden v kapitole 3.3.2.



Obr. 3.4: Zjednodušené schéma databázové struktury.

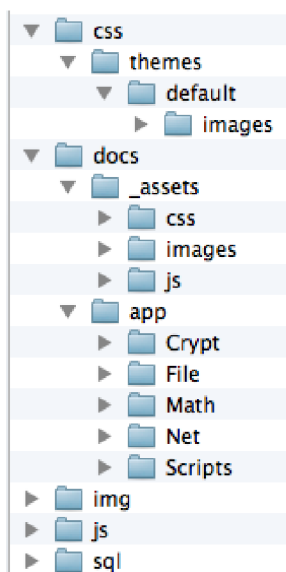
3.3 Realizace platformy pro subjektivní hodnocení

Realizace celé platformy pro hodnocení vychází z předem stanovených požadavků na celý systém. Cílem bylo vytvořit takový systém, který dokáže co nejdříve emulovat chování mobilní sítě za stanovených podmínek. Provádět realizaci takového řešení přímo v prostředí mobilní sítě je technicky náročné a nese s sebou řadu problémů. V první řadě je to skutečnost, že by mohlo dojít k ohrožení poskytování služeb ostatním zákazníkům. Dále je problém s přístupem k potřebným systémům z pohledu oprávnění jelikož se jedná o rozsáhlý systém pod správou velké organizace. Navíc nemohlo být zajištěno, že by síť a ostatní části důležité pro testování byly kontrolovatelné. To znamená, že by nebylo možné mít kontrolu nad všemi událostmi, které vznikají a které mohou ovlivňovat výsledné testování.

Z tohoto důvodu byla pro účastníky testování vytvořena iluze. V mobilním zařízení byla vložena SIM karta s indikátorem signálu a ikonou aktivního datového připojení na hlavním panelu. V případě notebooku byl v USB portu připojen modem s vloženou SIM kartou s aktivním datovým připojením přes mobilní síť. Ve skutečnosti byl pro účely testování provoz na mobilním zařízení i notebooku přesměrován skrze bezdrátové rozhraní do lokální bezdrátové sítě založené na standardu 802.11. Dále pak do navrženého emulátoru webových služeb, který zajišťoval definované síťové parametry. Iluze byla dále utvrzena moderátorem testování, který na úvodním školení popsal způsob a technologii připojení jako připojení přes mobilní síť. Z pohledu účastníků testování byla tedy zcela skryta skutečnost, že je provoz následně přesměrován do lokální bezdrátové sítě. V opačném případě by mohlo dojít ke zkreslení výsledného hodnocení.

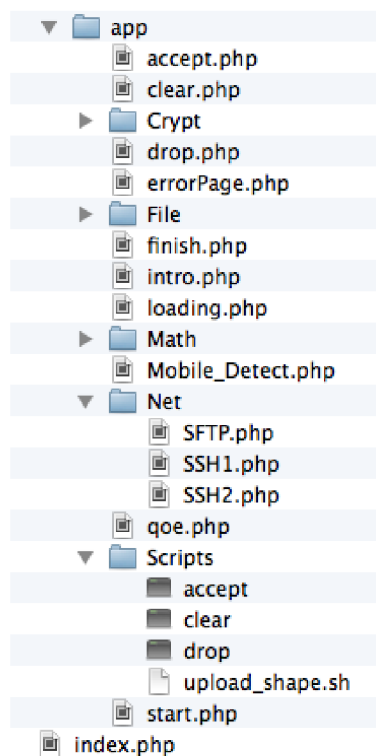
3.3.1 Hodnotící a řídicí centrum

Hodnotící a řídicí centrum je komplexní systém, který poskytuje uživatelské rozhraní pro subjektivní testování. Toto uživatelské rozhraní je jedna z jeho částí. Popis celé architektury z pohledu jednotlivých bloků je uveden v kapitole 3.2.1. Z pohledu realizace je nutné rozlišit jak klientskou tak i serverovou část platformy. Tomu odpovídá i rozdělení zdrojového kódu celého projektu. Zdrojové kódy jsou uloženy v projektové složce s pevnou strukturou, kde každá složka má svůj význam.



Obr. 3.5: Struktura projektu.

Celá struktura je zobrazena na obrázku 3.5. Složka *css* obsahuje soubory, které jsou součástí knihovny jQuery Mobile. Jsou to soubory zejména pro definici vzhledu hlavních komponent knihovny. Stejně tak následující složka *docs* je z části součástí této knihovny, kde v podsložce *_assets* jsou definice vzhledu pomocných komponent a jejich chování. Složka *app* obsahuje zdrojové kódy samotného hodnotícího a řídicího centra. Obrázky, které jsou použity v uživatelském rozhraní hodnotícího a řídicího centra jsou následně uloženy ve složce *img*, složka *js* obsahuje jádro celé knihovny jQuery Mobile. Jsou zde obsaženy soubory, které definují provázání jednotlivých komponent, událostí a vykreslování. Složka *sql* obsahuje pomocné skripty pro práci s daty v centrálním databázovém systému. Hlavní logika celého řešení je obsažena ve složce *app* a její detailní struktura je patrná na obrázku 3.6. Parametry síťového emulátoru jsou nastavovány na základě událostí, které jsou vyvolány v prostředí klientské části aplikace v prostředí webového prohlížeče. Na základě spuštění nebo vyvolání určité události dojde k připojení přes zabezpečený kanál prostřednictvím SSH k síťovému emulátoru, který tvoří bránu do sítě Internet.



Obr. 3.6: Struktura aplikační složky projektu.

Hlavním vstupem do aplikace je soubor *index.php*, kde jsou zobrazeny úvodní informace před zahájením testování. Dále je zde definováno spojení na ostatní použité knihovny, základní rozložení uživatelského rozhraní. Dále je zde provedeno navázání spojení s centrálním databázovým systémem.

```
$connection = mysql_connect("ADDR" ,"qoe" ,"PASS" );  
mysql_select_db("qoe" , $connection );  
mysql_set_charset(" utf8 " );
```

Po přečtení úvodních informací a přechodu k samotnému testování dojde k přesměrování aplikace do souboru *start.php*. Jelikož je testování anonymní, ale pro potřeby zpracování je nutné mít ve spojení všechny testy a úvodní dotazník, který účastník testování vyplnil, tak se nejprve vygeneruje náhodný identifikátor, který je účastníkovi testování přidělen po celou dobu testování.

```
$_SESSION[ 'user_id ' ] = uniqid ( );
```

Tento identifikátor je ukládán spolu s výsledky do centrálního databázového systému. Jako první se pro účastníka testování zobrazí dotazník, který obsahuje ně-

kolik základních otázek. Na vyplnění dotazníku je libovolně dlouhý čas. Moderátor přítomný během testování dohlíží, aby čas strávený vyplňováním dotazníku nebyl neúměrně dlouhý. Dále se v této fázi nastaví emulátor do výchozího stavu, tzn. že se odstraní všechna nastavení pro omezení šířky pásma a zpoždění, která zde mohla zůstat po předchozím testování.

```
function run_script($destination_ip , $password , $script_name )
{

    set_include_path(get_include_path().PATH_SEPARATOR.'phpseclib');
    $ssh = new Net_SSH2($destination_ip);
    if (!$ssh->login('root' , $password)) {
        exit('Login Failed');
    }

    $command = 'sh/opt/lampp/htdocs/qoe/docs/app/Scripts/'
        . $script_name;
    $ssh->exec($command);
}
```

Pro vykonání tohoto úkolu je použita výše uvedená funkce s parametry, které jsou nutné pro připojení k emulátoru webových služeb a název skriptu, který má emulátor spustit. Aplikace obsahuje několik předdefinovaných skriptů, které se negenerují automaticky. Skripty jsou obsaženy ve složce *Scripts*, viz obrázek 3.6. Skript pro inicializaci parametrů emulátoru je jedním z nich a nese název *clear*. Nastavení parametrů emulátoru webových služeb je provedeno následujícím příkazem, kde třetí parametr, který definuje název skriptu může být nahrazen jakýmkoliv názvem existujícího skriptu. A to buď předdefinovaným skriptem, nebo automaticky generovaným skriptem.

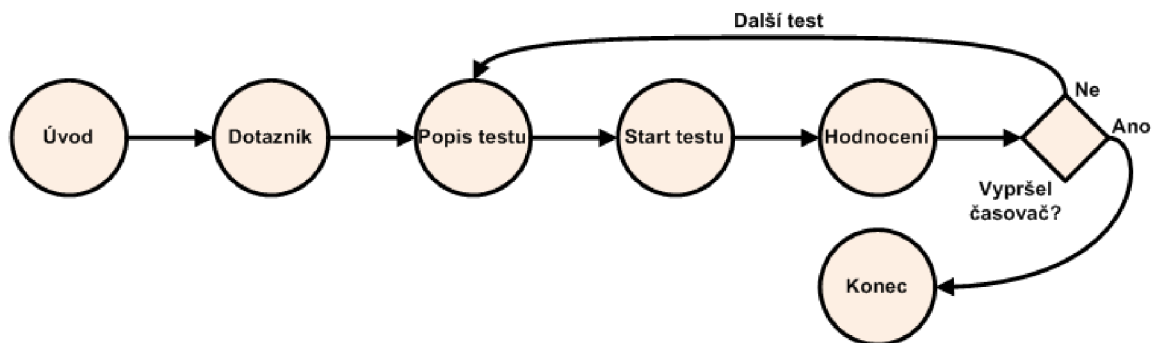
```
run_script("ADDR" , "PASS" , "clear");
```

Po vyplnění dotazníku a odeslání dochází k samotné fázi testování, která je již časově omezena. Proto tedy dochází ke spuštění časovače.

```
$_SESSION['CREATED'] = time();
```

Účastníkovi testování je přidělen testovací scénář moderátorem před samotným testováním. Testovací scénář obsahuje několik dílčích testů, které postupně účastník testování prochází (testuje). Diagram toku aplikace, od spuštění až do konce

testování je patrný na následujícím obrázku 3.8



Obr. 3.7: Diagram toku aplikace a přechodů.

Celý proces od spuštění požadovaného testu má několik dílčích kroků. Tyto dílčí kroky jsou vykonávány na pozadí a jsou pro účastníka testování naprosto transparentní. Po stisku příslušného tlačítka dojde k otevření nové záložky s příslušným obsahem pro test. V té době jsou již emulátorem webové služby nastavené potřebné parametry. Dílčí kroky prováděné na pozadí jsou následující:

- Z centrálního databázového systému dojde k přečtení potřebných síťových parametrů,
- na základě získaných parametrů se vygeneruje skript, který je uložen v paměti serverové části řídicí a hodnotící aplikace,
- řídicí a hodnotící aplikace vytvoří zabezpečené spojení s emulátorem webových služeb,
- skript obsažený v paměti přenese do emulátoru a uloží jej do spustitelného skriptu,
- provede spuštění skriptu uvnitř emulátoru a tím dojde k nastavení potřebných síťových parametrů.

Po dokončení testování konkrétního testu v rámci celého scénáře se účastníkovi testování zobrazí formulář pro ohodnocení kvality. Po provedení hodnocení se přechází k dalšímu testu, kde se tyto kroky opakují. Hodnocení každého testu se ukládá do centrálního databázového systému. Pro každý test je důležitý generovaný skript. Generování skriptu provádí následující funkce.

```
function generate_script($filename, $down_speed, $up_speed,
    $bd_dev0, $bd_dev1)
{
    ...
}
```

Název výstupního skriptu je závislý na vstupních parametrech funkce a obsahuje identifikátor uživatele s časovou značkou. To usnadňuje případné hledání chyb. Výsledný skript je dále pod stejným názvem uložen na pevný disk. Mezi vstupní parametry funkce patří definice rozhraní, na které mají být příslušné parametry aplikovány. Skrze tyto parametry se definují LAN a WAN rozhraní. Tyto rozhraní musí následně existovat v prostředí emulátoru webových služeb.

Délku testování konkrétního účastníka hlídá časovač. Po vypršení časovače dojde k ukončení testování a k přesměrování na stránku s poděkováním za provedení testu. Délka testování je v následující ukázce kódu definována proměnnou *test_period*. Jestliže časovač dosáhne hodnoty definované v této proměnné, tak dojde k ukončení testu a k přesměrování.

```
if (time() - $_SESSION['CREATED'] > $test_period)
{
    header('Location: finish.php');
}
```

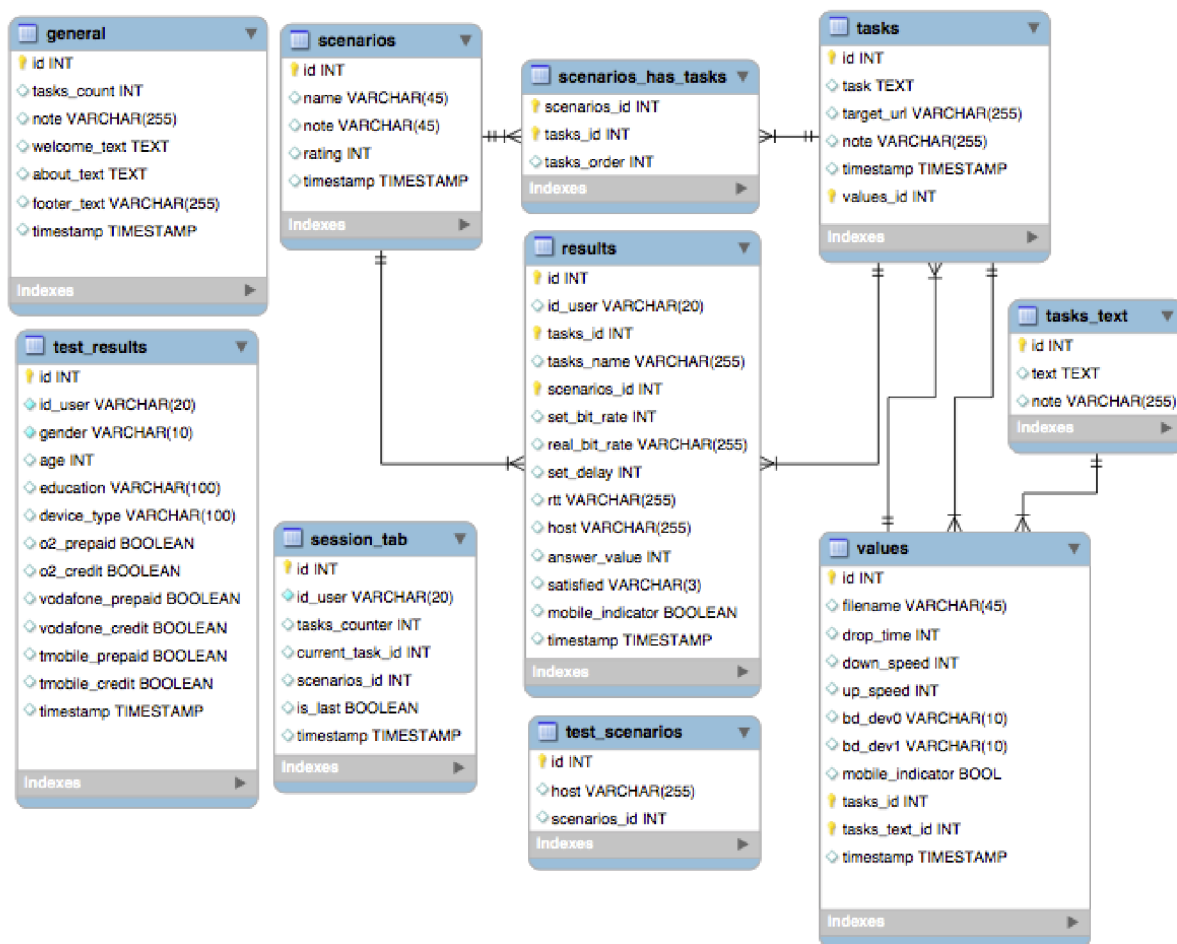
Další složky v adresářové struktuře, jako je *Crypt*, *File*, *Math* a *Net*, slouží pro uložení dalších souborů, které jsou nezbytné pro vykonání výše popsané funkcionality. Části zdrojového kódu, které jsou v této kapitole uvedeny představují pouze zlomek z implementace celého systému a jejich detailní popis je nad rámec této práce.

3.3.2 Struktura centrálního databázového systému

Centrální databázový systém (CDS) slouží jako úložiště celé platformy pro hodnocení subjektivního vnímání kvality služby. Struktura je navržena tak, aby do tohoto úložiště bylo možné vložit počáteční nastavení jednotlivých testů. Testy shromáždít do skupin, které se nazývají scénáře. Tyto informace jsou průběžně čteny během dílčích fází testování. Každý scénář obsahuje 26 nebo 27 dílčích testů. Dále centrální databázový systém obsahuje další pomocná data pro běh celého systému, jako jsou například různé texty v hlavičkách a patičkách uživatelského rozhraní, nebo popisky tlačítek. Pak také pomocná data, která jsou ukládána v průběhu testování pro účely správného chodu systému a případnému návratu do původního stavu, kdyby došlo

k přerušení testování v důsledku výpadku nějaké části systému, nebo v případě, kdy účastník testování omylem zavře celý prohlížeč.

Třetí a nejvíce důležitá oblast dat jsou výsledky jednotlivých testů. Výsledky se ukládají do vlastní struktury s ohledem na to získat co nejvíce parametrů pro pozdější vyhodnocování výsledků. Spolu s výsledky testů jsou do této struktury ukládány i odpovědi všech dotazníků. Z uložené struktury je následně možné vytvořit spojení mezi výsledky dotazníku a všemi testy pro jednoho účastníka testování. Toto spojení je provedeno anonymním identifikátorem, který je přidělen každému účastníkovi testování. Celá struktura centrálního databázového systému je uvedena na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Struktura centrálního databázového systému.

Centrální databázový systém je založený na platformě MySQL [37] a jeho návrh se řídil jednotlivými normálními formami, které se používají při návrhu struktur databázových systémů. Neprátné odchylky od těchto norem jsou dány specifickými

požadavky pro daný systém a to hlavně pro fázi vyhodnocování a analýzy získaných výsledků. Celá struktura se skládá z následujících tabulek.

- **general** - tabulka pro uložení obecných dat jako je úvodní text, text v hlavičce a patičce uživatelského rozhraní a další pomocná data.
- **results** - tabulka pro ukládání hodnocení jednotlivých testů v rámci scénáře. Tabulka obsahuje 13 sloupců.
 - **id_user** - identifikátor účastníka testování, který se generuje na začátku hodnocení. Je to náhodně generovaná sekvence čísel a písmen.
 - **tasks_id** - identifikátor testu, který byl testován.
 - **tasks_name** - název testu, který byl testován. Lze ho dohledat na základě identifikátoru, který je uložen ve sloupci *tasks_id*, zde je ale vložen pro potřeby a urychlení výsledné analýzy dat.
 - **scenarios_id** - indentifikátor testovacího scénáře, který byl testován. Jedná se o testovací scénář, který byl přiřazen moderátorem testování.
 - **set_bit_rate** - definuje šířku pásma, která byla nastavena emulátorem pro daný typ testu.
 - **real_bit_rate** - během každého testu dochází k měření přenosové rychlosti, která se následně ukládá do toho sloupce. Jedná se o průměrnou přenosovou rychlost během testu.
 - **set_delay** - počáteční nastavené zpoždění, které simuluje zpoždění pro navázání spojení mezi klientem a serverem.
 - **rtt** - udává zpoždění odezvy testovaného serveru, toto zpoždění se měří během testu.
 - **host** - adresa serveru, vůči kterému se test provádí.
 - **answer** - hodnocení kvality testu, pole může nabývat číselné hodnoty MOS od 1 do 5.
 - **satisfied** - spokojenost neboli akceptabilita testovaného subjektu s aktuálními podmínkami, které jsou nastaveny během testu. Mezi možné odpovědi patří ano/ne.
 - **mobile_indicator** - identifikátor zařízení, na kterém byl test proveden. Hodnota může být 0 nebo 1. Hodnota 0 odpovídá notebooku a hodnota 1 mobilnímu zařízení.
 - **timestamp** - datum a čas kdy byl test proveden.
- **scenarios** - tabulka obsahuje definici jednotlivých testovacích scénářů.
 - **id** - identifikátor scénáře.
 - **name** - jméno scénáře.

-
- **rating** - udává číslo, kolikrát již byl daný scénář testován. To umožňuje lepší přehled nad tím, jaké scénáře má moderátor přidělovat pro testování.
 - **scenarios_has_tasks** - pouze pomocná tabulka pro vytvoření vazby mezi scénáři a jednotlivými testy.
 - **session_tab** - pouze pomocná tabulka, která je použita pro uložení pomocných dat systému. Data v této tabulce nejsou vyhodnocována.
 - **tasks** - tabulka obsahuje sadu definovaných testů s obecnými informacemi. Konkrétní parametry jednotlivých testů jsou definovány v tabulce *values*.
 - **task** - definuje název testu, který je složen ze tří částí. První část definuje jméno testovaného obsahu, druhá část definuje šířku pásma pro daný test a třetí část definuje velikost počátečního zpoždění. Název testu může vypadat například takto: *idnes_32kb_5s*. Název říká, že se bude testovat webový obsah na *http://www.idnes.cz*, pro test bude nastavena šířka pásma 32 kbps a počáteční zpoždění před načítáním obsahu bude 5s.
 - **target_url** - hodnota specifikuje cílovou adresu, která se spustí při zahájení testu.
 - **task_text** - specifikuje popisný text k testům. Tabulka obsahuje popisný text jak pro notebooky, tak zvlášť pro mobilní zařízení.
 - **test_results** - tabulka ukládá výsledky získané z dotazníků. Jsou zde uloženy informace o tom, jestli účastník testu byl muž nebo žena, jeho věk, zda vlastní klasické mobilní zařízení nebo smartphone a jaký typ služby využívá (operátor, kredit vs paušál).
 - **test_scenarios** - tabulka obsahuje záznam o tom, jaký testovací scénář je přiřazen jednotlivým účastníkům testování. Toto přiřazení provádí moderátor testování, který před každým testováním nastaví jednotlivým účastníkům testu příslušné testovací scénáře.
 - **host** - název zařízení, na kterém bude spuštěn příslušný scénář.
 - **scenario_id** - přiřazený scénář konkrétnímu zařízení. Konkrétní scénář volí moderátor a hodnotu upravuje před každým testováním v závislosti na tom, jaké scénáře je potřeba testovat.
 - **values** - tabulka obsahuje parametry pro jednotlivé testy. Pro každý test jsou
-

v této tabulce obsaženy dva záznamy, neboli dvě sady hodnot. Jedna sada je pro notebook a druhá sada je pro mobilní zařízení.

- **filename** - specifikuje část názvu skriptu, který se bude generovat pro nastavení parametrů emulátoru. K tomuto názvu je pak následně připojen identifikátor účastníka testování a časová značka, kdy byl skript generován. Pod tímto názvem je následně skript vytvořen v prostředí emulátoru webových služeb.
- **drop_time** - specifikuje dobu v sekundách od začátku testu, po které má dojít k výpadku spojení. Výchozí hodnota je 0, která definuje, že k výpadku spojení během testování nedojde.
- **down_speed** - specifikuje dostupnou šířku pásma pro test pro linku směrem k účastníkovi testování. Hodnota je uvedena v kbps.
- **up_speed** - specifikuje dostupnou šířku pásma pro test pro linku směrem od účastníka testování. Hodnota je uvedena v kbps.
- **bd_dev0** - specifikuje název WAN rozhraní emulátoru webových služeb.
- **bd_dev1** - specifikuje název LAN rozhraní emulátoru webových služeb.
- **mobile_indicator** - specifikuje typ koncového zařízení. Určuje, zda je sada parametrů určena pro notebook (hodnota 0), nebo zda je určena pro mobilní zařízení (hodnota 1).
- **tasks_id** - specifikuje identifikátor testu, pro který je sada hodnot určena.
- **task_text_id** - specifikuje indentifikátor popisného textu k aktuálnímu testu.
- **timestamp** - časová značka vytvoření záznamu.

3.3.3 Realizace emulátoru webových služeb

Emulátor webových služeb je komplexní řešení, které má několik částí, které spolu vzájemně spolupracují. Řešení emulátoru webových služeb je postavené na platformě Linux a konkrétně na distribuci Ubuntu [8]. Jedná se o volně dostupnou platformu, která poskytuje řadu možností. Pro podporu dílčích bloků a jednotlivých funkcí emulátoru webových služeb byly použity některé z dostupných nástrojů pro tuto platformu za účelem dosažení všech funkcí, které se od emulátoru očekávají. Mezi tyto funkce patří zejména:

- Nastavení požadované šířky pásma pro definované rozhraní,
- nastavení počátečního zpoždění simulující délku navázání zpoždění mezi klientem a serverem v mobilních sítích,

-
- ukončení spojení v definovaném čase,
 - zachycení a vyhodnocení datového provozu na pozadí během jednotlivých testů.

Emulátor webových služeb je řízený skripty, to znamená, že všechny požadované vlastnosti se definují uvnitř skriptu, který se spustí a tím dojde k nastavení všech síťových parametrů. Struktura celého systému je zobrazena na obrázku 3.1.

Změnu šířky pásma pro linku směrem k účastníkovi testu (downlink) provádí Wonder Shaper [7]. Je to název pro skript, který sdružuje sadu příkazů spadajících pod systémovou část platformy linux. Skupina těchto nástrojů se nazývá Linux Traffic Control [34] a umožňuje pokročilou práci s datovým provozem. Důležitým nástrojem je *filtr*, který provádí klasifikaci jednotlivých paketů. Filtr umožňuje řadit provoz do několika výstupních front. V systému může být použit jeden nebo několik takovýchto filtrů. Dalším důležitým nástrojem je *qdisc*, který řídí plánování zdrojů pro jednotlivé pakety, neboli provádí přímo řazení do příslušných front. Bez tohoto nástroje by nebylo možné odesílat žádné pakety. Mezi další vlastnosti Linux Traffic Control patří správa tříd, kdy jednotlivé datové jednotky je možné přiřazovat do tříd. Nástroj *qdisc* pak umí s těmito třídami pracovat. Nastavení požadované šířky pásma se tedy provádí kombinací těchto nástrojů [6].

Emulátor webových služeb používá pro nastavení potřebné šířky pásma několik dílčích kroků. V následujícím textu budou uvedeny pouze ty nejdůležitější z nich. První je, že se nejprve odstraní veškerá nastavení, které zde mohla být z minulosti. Pro tento účel se použije nástroj *qdisc* s parametrem *del*.

```
/sbin/tc qdisc del dev $DEV root 2> /dev/null > /dev/null  
/sbin/tc qdisc del dev $DEV ingress 2> /dev/null > /dev/null
```

Hodnota *\$DEV* je proměnná a obsahuje název rozhraní, pro které se má krok provést. Tato hodnota je předána pomocí parametrů při volání skriptu. Nejdůležitější úlohou je pak nastavení potřebné šířky pásma na rozhraní, které je v základu provedeno následujícím způsobem.

```
tc qdisc add dev $DEV handle ffff: ingress  
tc filter add dev $DEV parent ffff: protocol ip prio 50  
u32 match ip src \ 0.0.0.0/0 police rate ${DOWNLINK} kbit  
burst 10k drop flowid :1
```

První příkaz vytvoří pro dané rozhraní tzv. "*ingress policer*", který hlídá, že nedojde k překročení požadované šířky pásma, která se specifikuje v druhém příkazu. Proměnné *\$DEV* a *\$DOWNLINK* specifikují rozhraní a dostupnou šířku pásma,

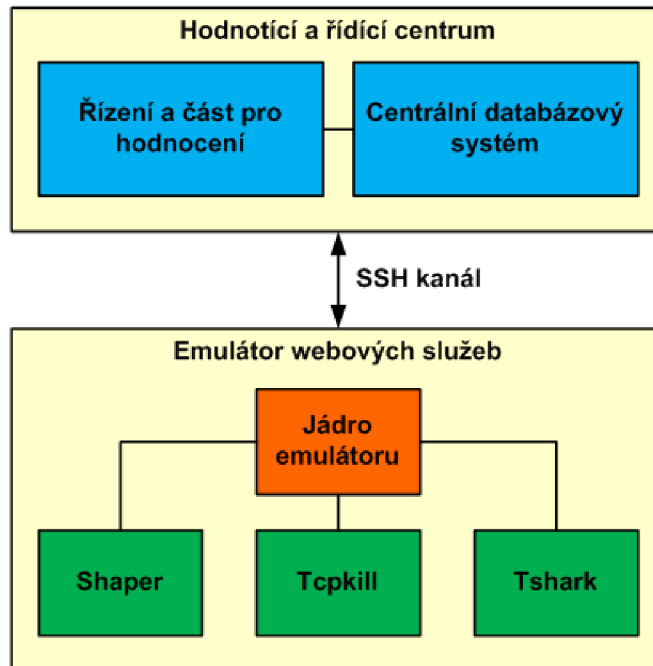
které se má nastavit. To, že bude pravidlo aplikováno na všechny provoz přes rozhraní určuje parametr 0.0.0.0/0.

Další vlastností emulátoru webových služeb je možnost ukončit spojení mezi klientem a serverem v požadovaný čas. Emulátor provádí pouze úlohu ukončení spojení, o tom v jaký čas se má spojení ukončit rozhoduje hodnotící a řídicí centrum, které vyvolá potřebnou událost v emulátoru. Pro tento krok je použit nástroj platformy Linux nazývaný *tcpkill* [71]. Po spuštění běží stále na pozadí do doby než je ukončen. Po spuštění ukončí všechna stávající TCP spojení, následně ukončí i všechna spojení, která se začnou tvořit po spuštění nástroje *tcpkill*, takže není možné vytvořit žádné další nové spojení. Pro účastníka testování to znamená, že dojde k výpadku spojení se serverem a v prohlížeči se zobrazí chybová informace s tím, že cílová adresa je nedostupná a že došlo k problému s připojením k síti Internet.

```
tcpkill -i $DEV port $PORT
```

Ukončení všech spojení se provádí příkazem uvedeným výše. Jako parametr se předává rozhraní a port. Pro obnovení spojení je nutné nástroj vypnout. Řízení výpadku spojení je dáno hodnotou *drop_time*, která je specifikována pro každý test. Jestliže je hodnota rovna 0, tak k žádnému výpadku během testu nedojde. Jestliže je hodnota větší než 0, tak se po uplynutí této doby vyvolá událost, která následně spustí ukončení spojení. Vnitřní bloková struktura emulátoru webových služeb je patrná na obrázku 3.9. Další důležitou funkcionalitou emulátoru webových služeb je emulace počátečního zpoždění pro navázání spojení mezi klientem a serverem. Toto je realizováno na aplikační vrstvě. Zpoždění může být nastaveno v rozmezí od nula sekund až do nekonečna, to znamená, že se spojení nikdy nevytvoří. Zpoždění definuje, jak dlouho se bude čekat než se začne načítat webový obsah do prohlížeče po zahájení testu. Z pohledu jednotlivých kroků během testování nejprve účastník testování zahájí konkrétní test, následně se otevře nová záložka ve webovém prohlížeči, ve které má dojít k načtení webového obsahu. Ten se buď začne načítat okamžitě, nebo je vyvoláno počáteční zpoždění které emuluje dobu navázání spojení v mobilních sítích. Toto zpoždění je indikováno točícím se kolečkem a přesýpacími hodinami v prohlížeči, aby účastník testování neztrácel pozornost a stále měl pocit, že se provádí akce načítání obsahu webové služby. Samotné zpoždění je realizováno modifikací adresy cílového obsahu. Jestliže je definované zpoždění větší jako 0, tak po stisku tlačítka pro zahájení testování není účastník testování přeměrován přímo na webovou adresu s obsahem, ale na adresu, kde jsou zobrazeny přesýpací hodiny a kolečko symbolizující načítání webového obsahu, viz následující adresa.

```
loading.php?time=5000&url=http://www.idnes.cz/?setver=full
```

Obr. 3.9: Vnitřní struktura emulátoru webových služeb.

Tento příklad znamená, že účastník testování vidí na monitoru zařízení přesýpací hodiny a kolečko pro načítání obsahu po dobu 5 sekund a po uplynutí této doby dojde k přesměrování na příslušnou adresu a načítání webového obsahu. V tomto případě z adresy <http://www.idnes.cz>.

Další situace, která může nastat je, že po uplynutí času, který je definován počátečním zpožděním dojde k chybě, která odpovídá přerušení spojení. Tento stav je realizován následující modifikací cílové adresy.

```
loading.php?time=30000&url=errorPage.php
```

V tomto případě je počáteční zpoždění nastaveno na relativně vysokou hodnotu (30 sekund). Zde může nastat situace, kdy účastník testování nebude čekat tak dlouhou dobu a test ukončí hodnocením. V opačném případě, když bude čekat celých 30 sekund, tak dojde k přesměrování na stránku, která signalizuje problém s nedostupností cílové adresy z důvodu problému s připojením k síti Internet. V obou případech můžeme výsledné hodnocení předpokládat jako nízké.

3.3.4 Parametry bezdrátové sítě pro připojení koncových zařízení

Koncová zařízení, která slouží pro testování byla k emulátoru webových služeb připojena prostřednictvím bezdrátové sítě. Jako přístupový bod pro připojení do bez-

drátové síti byl použit Mikrotik RouterBoard 433. Toto zařízení představuje vysokorychlostní přístupový bod, který je vybaven procesorem Atheros a speciálním operačním systémem Mikrotik RouterOS ver. 4 [51]. Základní vlastnosti tohoto modelu jsou uvedeny v tabulce 3.1. Tento přístupový bod byl konfigurován skrze rozhraní Winbox, které umožňuje administraci Mikrotik RouterOS. Rozhraní je určeno pro instalaci na platformu Windows, ale lze ho použít i na platformě Linux a Mac OS za pomoci nástroje pro emulaci Wine [70]. Bezdrátové rozhraní tohoto zařízení bylo použito pro připojení koncových zařízení k emulátoru. Drátové rozhraní bylo propojeno přímo s emulátorem webových služeb. Emulátor představuje výpočetní stanicí s operačním systémem Linux a dvěma síťovými kartami. Na obou rozhraních byla vytvořena síť, která využívala pouze neveřejné adresy.

Tab. 3.1: Parametry přístupového bodu Mikrotik RouterBoard 433.

Vlastnost	Parametr
Procesor	Atheros AR7130 300MHz procesor
Paměť	64MB DDR SDRAM
Boot Loader	RouterBOOT
Uložiště	64MB onboard NAND chip
Ethernet	3x 10/100 Mbit/s Fast Ethernet ports s Auto-MDI/X
miniPCI	3x MiniPCI Type IIIA/IIIB sloty
Sériový port	DB9 RS232C asynchronní sériový port
Napájení	28V DC
Rozměry	10.5 cm x 15 cm, 137 gramů
Spotřeba	3W bez rozšiřujících karet, maximálně 25W
Operační systém	MikroTik RouterOS v4

Pro účely testování je nutný přístup do sítě Internet skrze bezdrátovou síť vytvořenou tímto přístupovým bodem. Z tohoto důvodu je přístupový bod připojen na první síťové rozhraní emulátoru webových služeb. Druhé rozhraní emulátoru je připojeno do univerzitní sítě. Mezi těmito rozhraními bylo nastaveno sdílení a tím vytvořeno připojení do internetu. Konfigurace byla provedena pomocí nástroje *iptables*.

```
iptables -A FORWARD -i eth1 -o wlan1 -s 192.168.1.0/24 -m state
--state NEW -j ACCEPT
iptables -A FORWARD -m state --state ESTABLISHED,RELATED -j ACCEPT
iptables -A POSTROUTING -t nat -j MASQUERADE
sh -c "echo 1 > /proc/sys/net/ipv4/ip_forward"
```

Nastavením uvedeným výše se povolí přeposílání paketů z jednoho rozhraní na druhé. To umožní připojení do sítě Internet koncovým zařízením, které jsou připojeny do bezdrátové sítě poskytované přístupovým bodem.

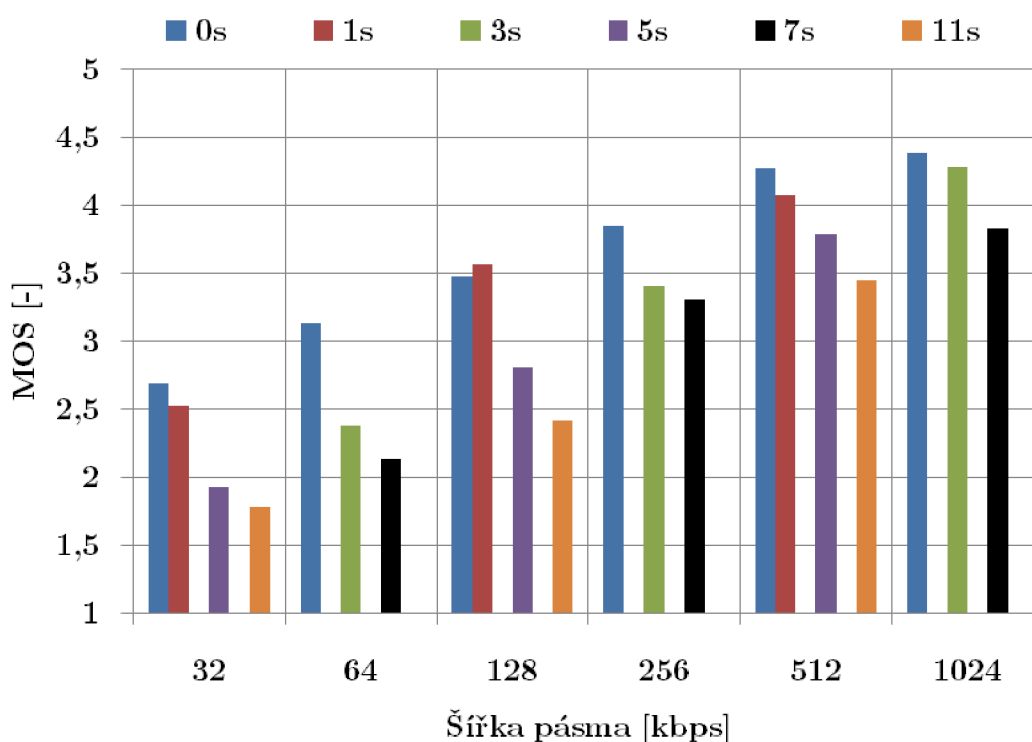
4 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY Z TESTOVÁNÍ SUBJEKTIVNÍHO VNÍMÁNÍ KVALITY WEBOVÉ SLUŽBY

Následující kapitola popisuje výsledky, které byly získány provedenými testy. Detailní popis skupiny účastníků, kteří se zúčastnili testování je uveden v kapitole 2.6. Po této kapitole následuje popis dosažených výsledků pro měření na notebooku 4.1 a následně pro měření na mobilním zařízení 4.2. Jednotlivé výsledky jsou prezentovány formou grafů v závislosti na velikosti počátečního zpoždění (0 s, 1 s, 3 s, 5 s, 7 s, 11 s) nebo typu obsahu (idnes.cz, facebook.com, aukro.cz). V další podkapitole 4.3 je pak provedena nepřímá analýza získaných dat pomocí metody PCA. Výsledky pro jednotlivá zařízení jsou zobrazeny pomocí grafů, kde je patrný průběh hodnoty MOS a akceptability v závislosti na dostupné šířce pásma a počátečním zpoždění.

4.1 Analýza dat získaných z hodnocení subjektivního vnímání kvality pro notebook

V následující podkapitole jsou uvedeny výsledky z hodnocení jednotlivých testů pro hodnocení na notebooku. Výsledná analýza je zaměřena na výsledky hodnocení kvality MOS a na hodnocení akceptability. Kvalita bude v následujícím textu označena jako MOS. Akceptabilita v následujícím textu vyjadřuje "spokojenost" účastníka s testovanou službou ve smyslu toho, zda by byl ochoten si takovou službu zaplatit. Zde bylo možné jako odpověď zvolit buď ano nebo ne. Hodnota akceptability je pro zobrazení v grafu přepočítána na procentuální hodnotu. Tato hodnota vyjadřuje počet procent ze všech provedených testů, kde byla hodnota akceptability během testu zvolena jako ano. Všechny uvedené výsledky jsou pro hodnocení webové služby.

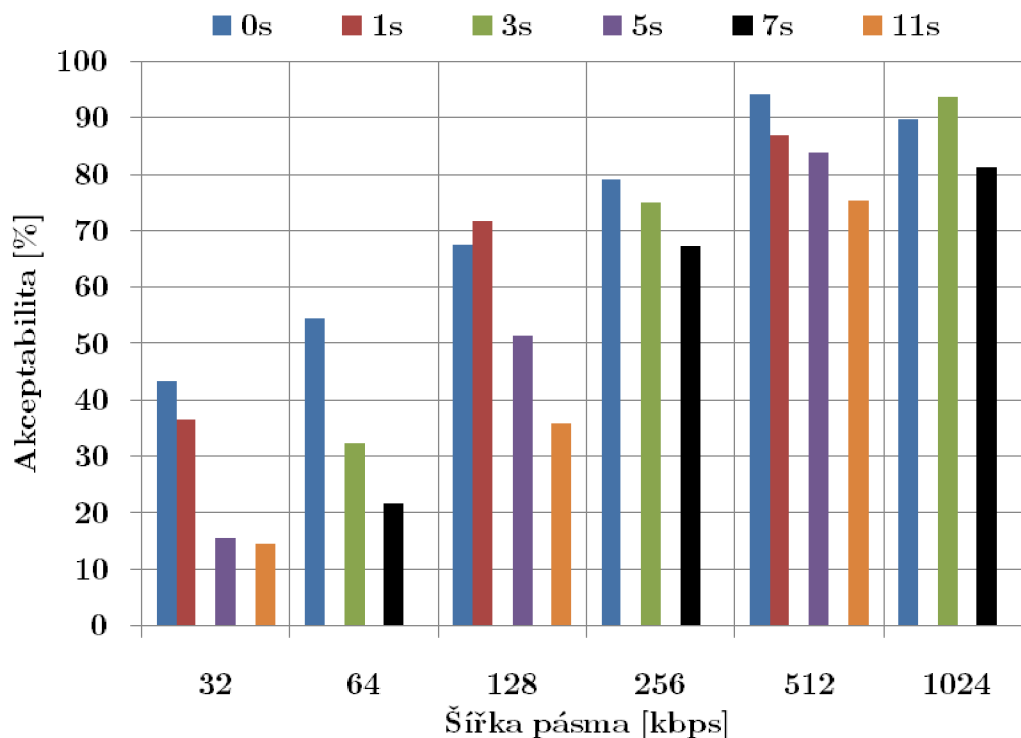
Nejprve je uvedeno celkové hodnocení pro všechny dílčí služby, jak pro hodnotu MOS, tak pro akceptabilitu v závislosti na dostupné šířce pásma a počátečním zpoždění. V další části je uveden průběh hodnocení MOS a akceptability jednotlivých webových služeb zvláště v závislosti na dostupné šířce pásma.



Obr. 4.1: Celkové hodnocení kvality webové služby (různá počáteční zpoždění).

Graf 4.1 zobrazuje průběh hodnocení kvality pro jednotlivé rychlosti a počáteční zpoždění. V grafu je na vodorovné ose zobrazena dostupná šířka pásma a na vertikální ose hodnocení kvality na stupnici MOS od jedné až do pěti. Pro každou dostupnou šířku pásma je zobrazeno několik průběhů, které odpovídají příslušným zpožděním. Kombinace šířky pásma a zpoždění vychází z navržené metodiky popsané v kapitole 2.5. Z výše uvedeného grafu je patrný konzistentní růst pro vzrůstající dostupnou šířku pásma. Zároveň je zde patrné, že pro vzrůstající počáteční zpoždění pro návazání spojení mezi klientem a serverem klesá hodnocení subjektivního vnímání kvality. Na nižších přenosových rychlostech toto zpoždění také způsobuje větší rozptyl v hodnocení MOS, viz rychlosti 32, 64 a 128 kbps v 4.1. Pro vyšší rychlosti je rozptyl hodnot MOS menší. Zde se projevilo subjektivní vnímání dostupné šířky pásma, kdy pro vyšší šířku pásma dochází k rychlejšímu načtení webového obsahu a tím dochází k lepšímu ohodnocení, než v případě nižších rychlostí. Drobná nekonzistence je patrná pro šířku pásma 128 kbps, kde hodnocení vychází nepatrně lépe pro počáteční zpoždění 1s než pro počáteční zpoždění 0s. Tento rozdíl je pro výsledné hodnocení téměř zanedbatelný a nemá vliv na stanovení závěrů z testování. Rozdíl je 0,09 MOS, což je velice nízká hodnota a může být dán tím, že zpoždění 1s je pro účastníka testování v některých případech nerozeznatelné.

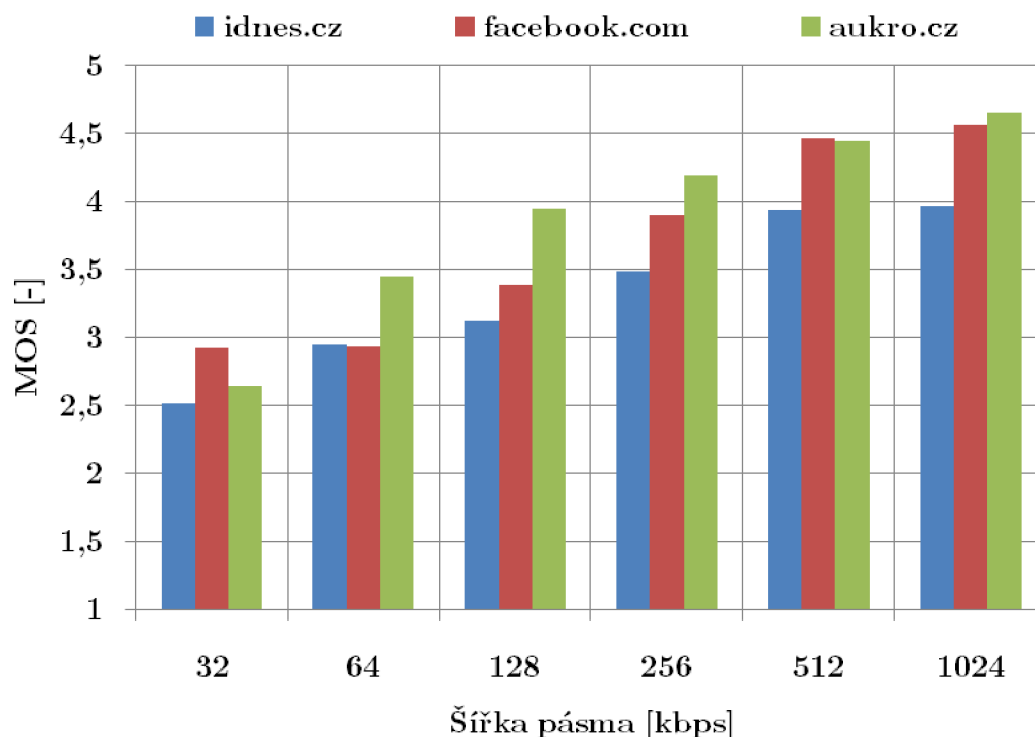
Další důležitou informací získanou z grafu 4.1 je saturace hodnoty MOS, což je hodnota šířky pásma, pro kterou dosáhne MOS svého maxima a již se dále nezvyšuje. V tomto případě lze jako hodnotu saturace zvolit 512 kbps pro počáteční zpoždění 0s. Tomuto bodu odpovídá hodnota 4.27 MOS



Obr. 4.2: Celkové hodnocení akceptability webové služby (různá počáteční zpoždění).

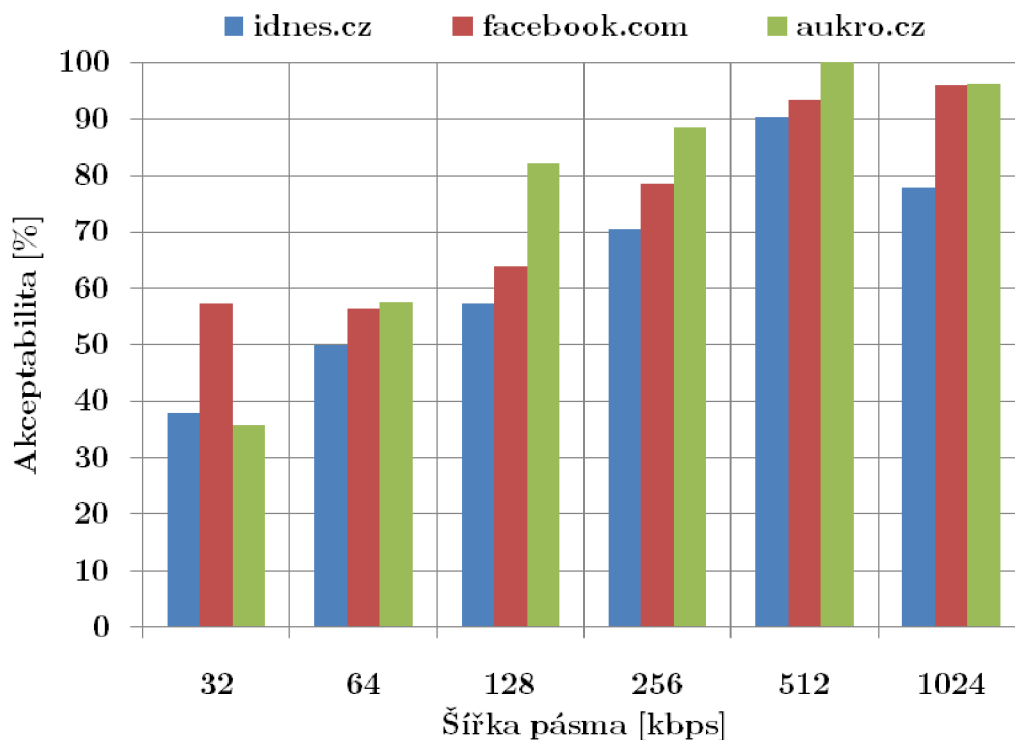
Hodnocení akceptability zobrazené v grafu 4.2 má rovněž konzistentní charakter s výjimkou, kde vykazuje mírně lepší hodnocení akceptability pro počáteční zpoždění mezi klientem a serverem pro 1s oproti 0s pro šířku pásma 128 kbps a 1024 kbps. Opět se jedná o zanedbatelnou odchylku, která nemá vliv na výsledný charakter. Akceptabilita téměř 90% a více pro šířku pásma 512 kbps a počáteční zpoždění 0s odpovídá bodu saturace, který je patrný pro výsledky hodnocení kvality webové služby v grafu 4.1. Následující grafy 4.3 a 4.4 zobrazují závislost hodnocení akceptability na notebooku. V tomto případě se nejedná o celkové hodnocení a akceptabilitu pro všechny webové služby, ale pro každou službu zvlášť. Na horizontální ose je vynesena šířka pásma, která vždy odpovídá hodnocení pro daný typ webového obsahu. Zpoždění je v tomto případě vždy 0s. Hodnocení s nejnižším MOS pro danou šířku pásma má vždy webová služba nabízející zpravodajství. Nejvyšší rozdíl v rámci

jedné přenosové rychlosti zde dosahuje hodnoty 0.83 MOS pro hodnotu 128 kbps. To znamená, že zpravodajství zde má o 0.83 horší hodnocení oproti webové službě nabízející internetové nakupování. Důvodem takového rozdílu by mohlo být to, že webová služba poskytující zpravodajství má větší velikost než služba nabízení nakupování, a proto dochází k pomalejšímu načítání pro stejné parametry sítě.



Obr. 4.3: Hodnocení kvality pro různý typ webového obsahu (počáteční zpoždění 0s).

Hodnocení akceptability zobrazující porovnání mezi různým typem obsahu v rámci stejné šířky pásma a pro stejné počáteční zpoždění mezi navázáním spojení mezi klientem a serverem má téměř konzistentní charakter, viz obrázek 4.4. Jestliže dochází k nárůstu dostupné šířky pásma, tak roste i hodnota akceptability. Tedy počet testů, které byly hodnoceny akceptabilitou ano. Výjimkou je zde šířka pásma 1024 kbps, kde akceptabilita mírně klesla pro dva ze tří typů webového obsahu oproti nižší šířce pásma 512 kbps. V ostatních případech výsledky korespondují s vývojem hodnot MOS v předchozím obrázku 4.3



Obr. 4.4: Hodnocení akceptability pro různý typ webového obsahu (počáteční zpoždění 0s).

Další vypovídající hodnotu má vyhodnocení jednotlivých typů webového obsahu separátně, viz příloha B.1. Pro jednotlivé typy webového obsahu byly získány konzistentní výsledky nad hodnotu přenosové rychlosti 256 kbps. A to konzistentní jak z pohledu šířky pásma, tak z pohledu zvyšujícího se počátečního zpoždění. Pod šířku pásma 256 kbps se zde objevuje opět několik drobných odchylek od konzistentního průběhu. Z výstupu je patrné, že pro nižší rychlosti není rozhodující zpoždění 1s, protože v některých případech je výsledné hodnocení MOS lepší právě pro zpoždění 1s. To může být způsobeno tím, že zpoždění 1s je příloš malé na to, aby ho účastník testování byl schopen vnímat. Tato skutečnost se netýká webového obsahu typu "sociální sítě", kde průběh hodnocení kvality je závislý na počátečním zpoždění a pro každou šířku pásma s rostoucí hodnotou zpoždění konzistentně klesá výsledné MOS hodnocení. Příslušné závislosti jsou uvedeny v příloze, viz B.1.

Tabulka 4.1 uvádí maximální rozdíly v hodnocení MOS a akceptability pro různé typy webového obsahu v rámci jednotlivých hodnot zvolených pro dostupnou šířku pásma. Rozdíly jsou uvedeny pro počáteční zpoždění 0s a korespondují s hodnotami v grafech 4.3 a 4.4.

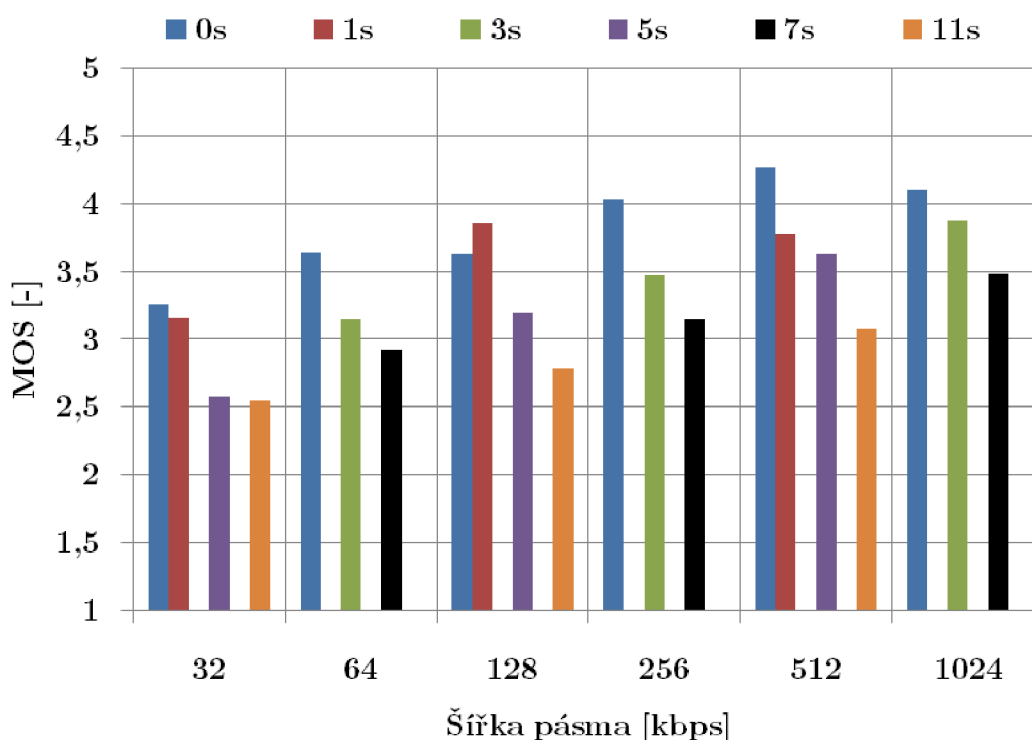
Tab. 4.1: Rozdíly v hodnocení různého obsahu za stejných podmínek pro notebook

Šířka pásma	Maximální rozdíl MOS	Maximální rozdíl akceptability [%]
32	0.42	21.43
64	0.51	7.5
128	0.83	24.91
256	0.71	18.09
512	0.53	9.67
1024	0.69	18.45

Jak je vidět z tabulky 4.1, tak se hodnocení pro různé typy webových služeb v rámci stejných podmínek liší od 0.42 MOS až do 0.83 MOS. Průměrná hodnota rozdílu MOS je pak 0.62. Nejvyššího rozdílu z pohledu akceptability dosahuje hodnocení pro dostupnou šířku pásma 32 kbps, kde je tento rozdíl až 21.43%. To znamená, že kvalitu služby za stejných podmínek akceptovalo o 21.43% více lidí pro obsah zaměřený na sociální sítě oproti obsahu zaměřeném na nakupování po internetu. Průměrná hodnota rozdílu hodnocení akceptability je pak 16.68%. Rozdíly v hodnocení i akceptabilitě mají náhodný charakter a nelze stanovit, zda na tento rozdíl má vliv dostupná šířka pásma nebo velikost počátečního zpoždění.

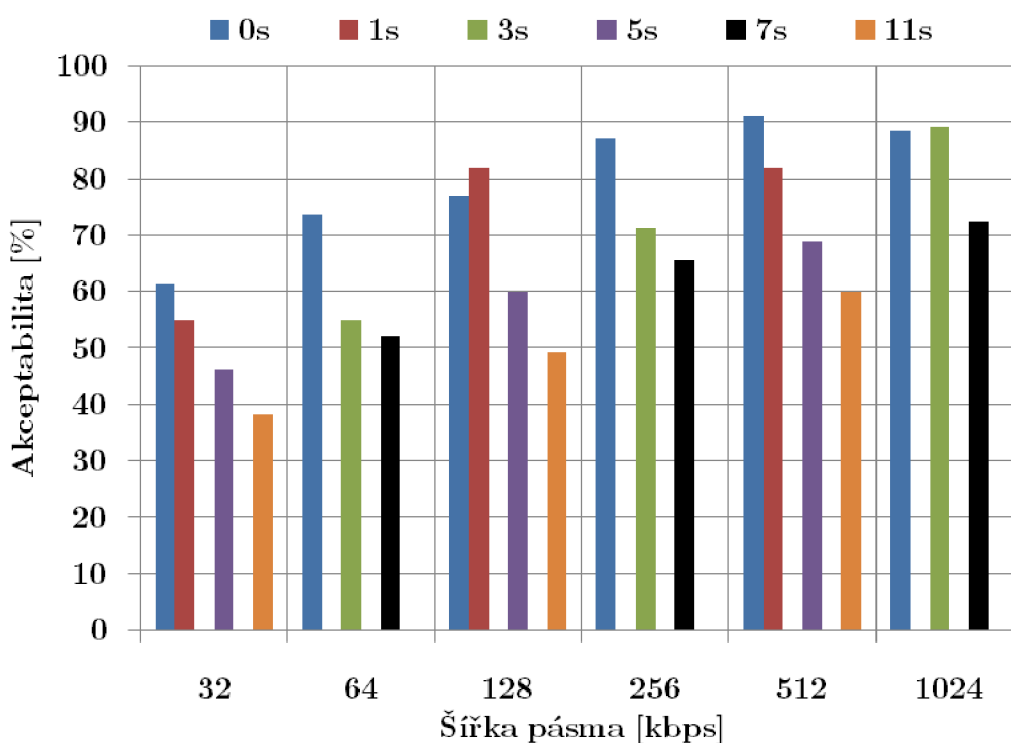
4.2 Analýza dat získaných z hodnocení subjektivního vnímání kvality pro mobilní zařízení

V následující podkapitole jsou uvedeny výsledky z hodnocení jednotlivých testů pro hodnocení na mobilním zařízení. Výsledky jsou opět zaměřené na hodnocení kvality a na hodnocení akceptability. Z pohledu hodnocení představuje mobilní zařízení zcela odlišný typ zařízení, než je notebook. Pro některé z účastníků to může být zcela nový typ zařízení, se kterým se blíže setkali až v rámci testování, viz výsledky získané z dotazníků popsané v kapitole 2.6. Tabulka 2.3 dává informace o tom, kolik z účastníků vlastní chytré mobilní zařízení (smartphone) a kolik pouze klasické mobilní zařízení bez operačního systému a dotykového displeje. V dotazníku 84 účastníků uvedlo, že vlastní pouze klasický typ mobilního zařízení. Kvalita bude v následujícím textu, stejně jako v předchozím textu, označena jako MOS a akceptabilita opět vyjadřuje "spokojenost" účastníka s testovanou službou ve smyslu toho, zda by byl ochoten si takovou službu zaplatit.



Obr. 4.5: Celkové hodnocení kvality pro scénář webové služby (různá počáteční zpoždění).

Graf 4.5 znázorňuje závislost MOS na dostupné šířce pásma a počátečním zpoždění mezi navázáním spojení mezi klientem a serverem. V grafu je vidět celková závislost, bez rozlišení konkrétní služby. Jestliže dochází ke zvyšování hodnoty dostupné šířky pásma, tak roste hodnota výsledného celkového hodnocení. V případě, že dochází ke zvýšení hodnoty počátečního zpoždění v rámci každé dostupné šířky pásma, tak naopak výsledné hodnocení klesá. Výjimka je pouze pro dostupnou šířku pásma 128 kbps, kde hodnota MOS pro počáteční zpoždění 1s je lepší než pro zpoždění 0s. Důvod této nekonzistence může být stejný jako v předchozím případě popsaném v kapitole 4.1.

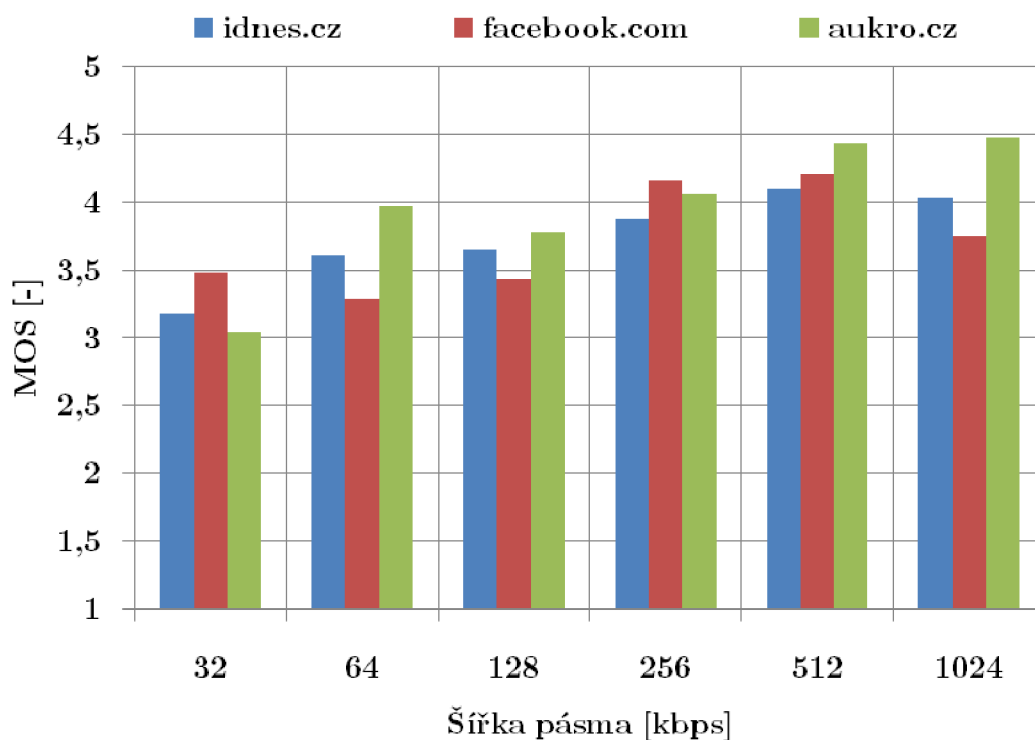


Obr. 4.6: Celkové hodnocení akceptability pro scénář webové služby (různá počáteční zpoždění).

Pro výsledné hodnoty zobrazené v grafu 4.5 lze určit bod saturace již pro šířku pásma 256 kbps a počáteční zpoždění 0s. Pro následující vyšší hodnotu sice hodnota MOS vzrůstá o 0.23 MOS, ale následně pro dostupnou šířku pásma 1024 kbps opět mírně klesá na hodnotu 4.10 MOS, která již opět téměř odpovídá hodnotě získané pro hodnotu 256 kbps. Rozdíl v MOS hodnocení mezi hodnotami pro 256 kbps a 1024 kbps je pouze 0.07 MOS. Rozdíl je velice malý a lze tedy uvažovat, že hodnota MOS dále prudce neroste a bod saturace je tedy na hodnotě 256 kbps.

Graf 4.6 znázorňuje závislost akceptability na dostupné šířce pásma a počátečním zpoždění. Pro rostoucí šířku pásma roste hodnocení MOS a naopak pro rostoucí počáteční zpoždění klesá hodnocení MOS v rámci jedné hodnoty šířky pásma. Výjimka je pouze pro hodnotu 128 kbps, kde hodnota MOS pro počáteční zpoždění 1s je lepší než pro zpoždění 0s.

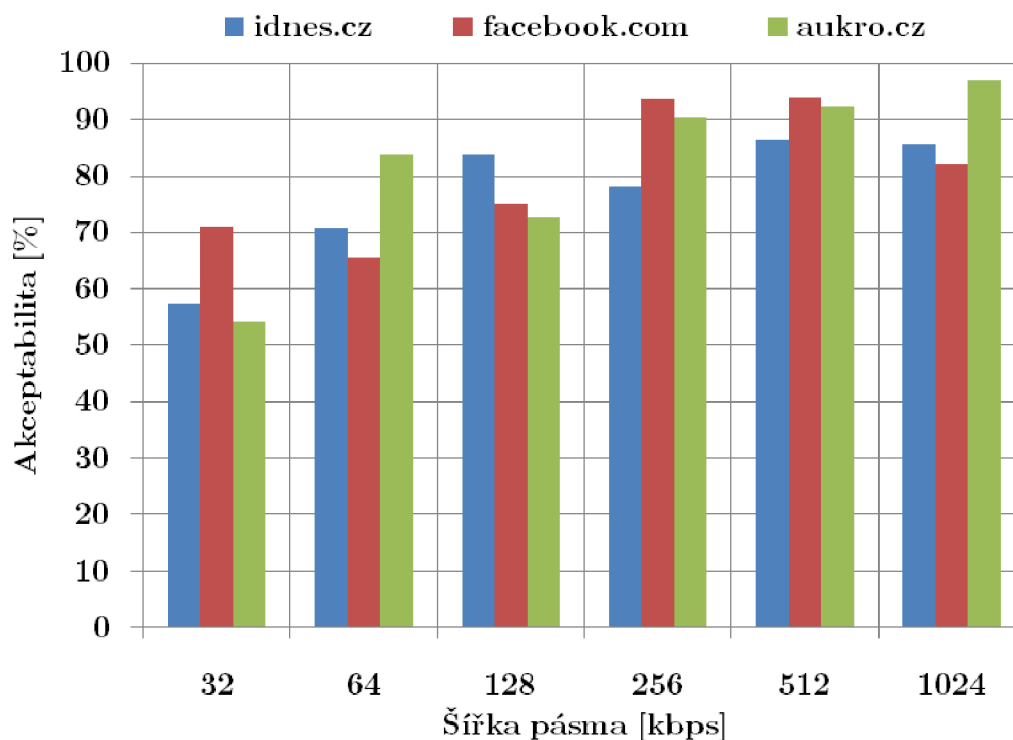
Následující grafy 4.7 a 4.8 zobrazují závislost hodnocení na mobilním zařízení pro různé typy služeb zvláště. V rámci každé služby je zobrazena závislost na dostupné šířce pásma. Počáteční zpoždění je ve všech případech 0s. V případě hodnocení na mobilním zařízení dále již neplatí tendence, že webový obsah se zpravodajstvím má pro všechny dostupné šířky pásma nejnižší hodnotu MOS. Naopak zde lze pozorovat náhodný charakter hodnocení v rámci jedné hodnoty dostupné šířky pásma. Například pro hodnotu 32 kbps má webová služba zaměřená na sociální sítě nejlepší hodnocení. Pro hodnotu 64 kbps je pak stejná webová služba hodnocena nejhůře, viz graf 4.7.



Obr. 4.7: Hodnocení kvality pro různý typ webového obsahu (zpoždění 0s).

Pro hodnocení akceptability vychází poměrně vysoké hodnoty spokojenosti s danou službou již od nejnižších hodnot dostupných šířek pásma. Například pro hodnoty 32 kbps a 64 kbps (počáteční zpoždění 0s) vychází akceptabilita v rozmezí 65% až

70% a pro dostupné šířky pásma 256 kbps, 512 kbps a 1024 kbps dokonce hodnota akceptability přesahuje hodnotu 90%, viz obrázek 4.8. Zde se může projevat trend, že účastníci neočekávají od mobilních zařízení takové kritické parametry jako v případě přístupu k webové službě na notebooku, kde jsou již dlouhodobě zvyklí na poměrně vysoké rychlosti, které jsou běžně dostupné prostřednictvím jiných typů připojení.



Obr. 4.8: Hodnocení akceptability pro různý typ webového obsahu (zpoždění 0s).

Tabulka 4.2 opět uvádí maximální rozdíly v hodnocení MOS a akceptability pro různé typy webového obsahu v rámci jednotlivých hodnot zvolených pro dostupnou šířku pásma. Rozdíly jsou uvedeny pro počáteční zpoždění 0s a korespondují s hodnotami v grafech 4.7 a 4.8. Jak je vidět z tabulky 4.2, tak se hodnocení pro různé typy webových služeb v rámci stejných podmínek liší od 0.44 MOS až do 0.71 MOS. Průměrná hodnota rozdílu MOS je pak 0.46, což je méně než v případě hodnocení na notebooku. Z pohledu hodnocení to znamená, že výsledky pro mobilní zařízení mají více konzistentní charakter. Nejvyššího rozdílu z pohledu akceptability dosahuje hodnocení pro dostupnou šířku pásma 64 kbps, kde je tento rozdíl 18.16%. Průměrná hodnota rozdílu hodnocení akceptability je pak 14.02%, což je opět méně než v případě hodnocení akceptability na notebooku.

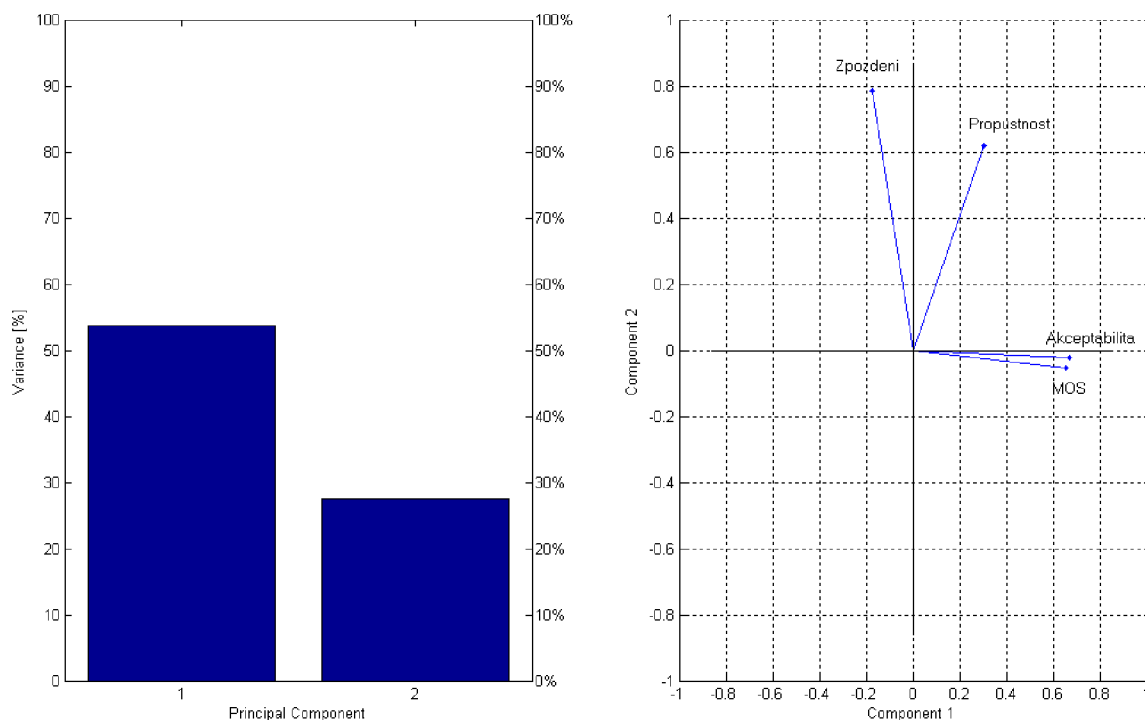
Tab. 4.2: Rozdíly v hodnocení různého obsahu za stejných podmínek pro mobilní zařízení

Šířka pásma	Maximální rozdíl MOS	Maximální rozdíl akceptability [%]
32	0.44	16.8
64	0.69	18.16
128	0.34	11.28
256	0.29	15.42
512	0.33	7.73
1024	0.71	17.73

4.3 Vyhodnocení závislosti mezi kvalitou MOS a akceptabilitou pomocí metody PCA

Z předchozích kapitol 4.1 a 4.2, kde byla uvedena analýza rozptylu lze pozorovat závislost mezi hodnotou MOS a hodnotou akceptability. Pro detailnější analýzu vztahu mezi těmito dvěma hodnotami plus jejich vztah vůči vstupním hodnotám dostupné šířky pásma a zpoždění byla použita metoda PCA (Principal component analyses) [32]. Tato metoda se řadí mezi úlohy nepřímé analýzy získaných dat a statistické analýzy, které redukuje rozměr více-rozměrných dat. Jestliže máme prostor, který obsahuje dvě proměnné, tak ho lze vyjádřit dvourozměrným grafem. Jestliže máme prostor o třech proměnných, tak lze ještě použít trojrozměrný graf, který zobrazí závislosti mezi jednotlivými proměnnými. Jestliže máme vstupní soubor dat o více než třech proměnných, což je tento případ, tak nelze použít standardní zobrazení formou grafu. V tento moment je vhodné použít metodu, která zachová původní informaci v souboru dat a redukuje prostor pro zobrazení závislostí a vzájemné variability mezi jednotlivými proměnnými. Redukce je provedena do nových veličin, které se nazývají komponenty a jejichž cílem je zjednodušit a získat tak lépe čitelný soubor dat. Metoda odpovídá transformaci původního souboru dat do nového prostoru, který je definován souřadnicovým systémem jehož osy tvoří hlavní komponenty. Cílem této redukce je co nejmenší ztráta informace, ke které by mohlo dojít v rámci aplikace metody na původní množinu dat, tzn. zachování co nejvyššího množství informace původního souboru dat. Výsledný prostor je definován novými veličinami (komponenty), které jsou vzájemně nezávislé. Jelikož se metoda snaží redukovat prostor původního souboru hodnot, tak je logicky žádoucí, aby výsledný prostor po redukcí

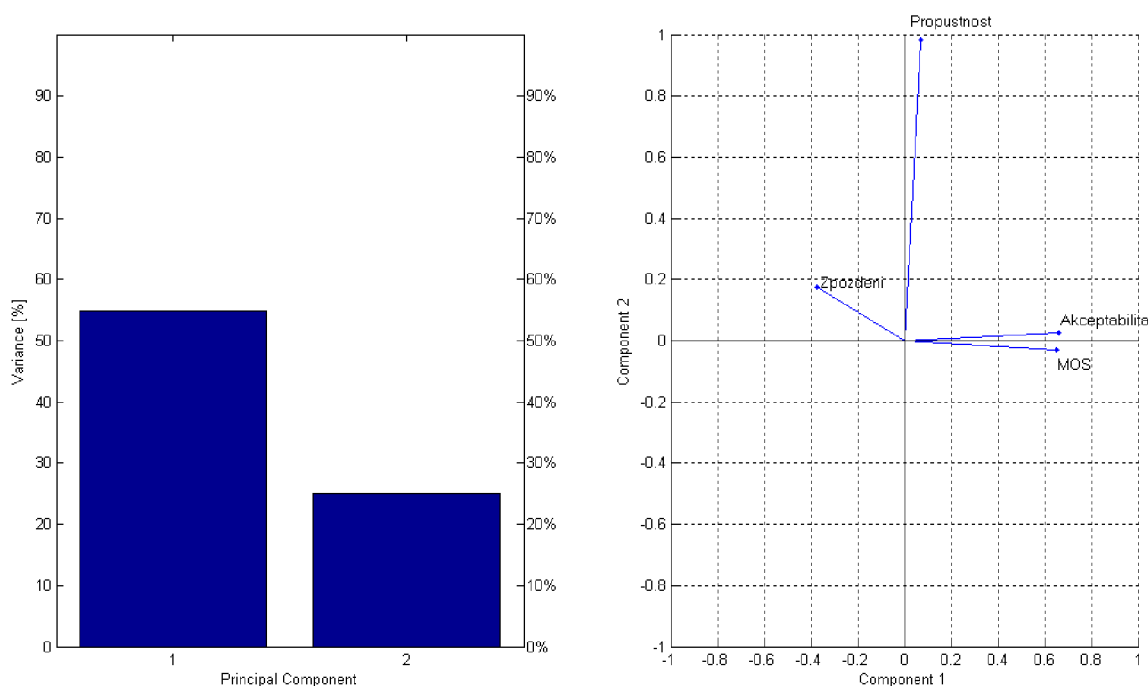
obsahoval co nejmenší množství komponent, do kterých byl transformován. Jestliže ale má být metoda účinná a zachovat tak dostačující množství informace o variabilitě původního prostoru, tak je nutné vhodně zvolit počet hlavních komponent výstupního prostoru. S malým počtem komponent by se informace o variabilitě ztratila. Teoreticky můžeme získat počet komponent stejný, jako je rozměr původního prostoru, ale pouze několik prvních (hlavních) komponent nese většinu informace o variabilitě.



Obr. 4.9: PCA analýza jednotlivých komponent pro notebook.

Z matematického pohledu je proces výpočtu PCA na vstupní množině dat komplexní operací, která je složena z několika kroků, které vedou k výsledné PCA analýze. Celý tento postup a metodika výpočtu PCA je uvedena v literatuře [56], [59]. Pro potřeby této práce bylo v případě výpočtu PCA použito prostředí Matlab [35]. Prostředí Matlab již disponuje funkcemi pro výpočet dílčích kroků PCA a pro zobrazení výsledných hodnot. Důležitým krokem je definice vstupní množiny dat. Vstupní množina dat představuje matici o rozměru $m \times n$, která obsahuje m objektů a n znaků. Objekty představují měřené veličiny. V případě této práce objekty představují měřené hodnoty MOS, akceptabilitu, sadu definovaných parametrů dostupné šířky pásma a počátečního zpoždění. Znaky představují jednotlivé proměnné, kterými jsou MOS, akceptabilita, šířka pásma a počáteční zpoždění. Ke každému znaku

je tedy přiřazeno m objektů. Jelikož je vstupní množina dat matice, jsou podstatou výpočtu PCA maticové operace.



Obr. 4.10: PCA analýza jednotlivých komponent pro mobilní zařízení.

Pro zobrazení výsledného vlivu jednotlivých komponent byl použit typ grafu “biplot”, který zobrazuje první a druhou hlavní komponentu. Pro úplné vyjádření všech závislostí by bylo potřeba 12 takových grafů, které představují kombinace mezi jednotlivými komponenty. Jelikož nejvíce informace o variabilitě (rozptylu) hodnot nesou pouze první dvě hlavní komponenty, tak zobrazení dalších závislostí mezi komponenty by nemělo tak silnou vypovídající hodnotu, a proto tyto závislosti nejsou v práci uvedeny. Spolu s grafem typu “biplot” je uveden graf, který zobrazuje míru variace obsaženou v jednotlivých komponentách. První hlavní komponenta má směr největší variability dat. Druhá a každá následující hlavní komponenta je ortogonální (kolmá na všechny předcházející) a popisuje maximální množství zbývající variability, která není obsažena v první hlavní komponentě. Další komponenty (3 až n) pak vyjadřují již spíše šum než míru informace o variabilitě. Graf zobrazuje velikost a znaménko pro každou pozorovanou proměnnou a to jakou měrou je obsažena v daném komponentu. Jestliže jsou jednotlivé proměnné blízko sebe, tak je patrná jejich vzájemná korelace a naopak, čím více jsou vzdálené tím jsou méně korelované. Jak je vidět v grafech 4.9, 4.10, tak akceptabilita a hodnota MOS spolu korelují. Dále je patrné, že první dvě hlavní komponenty pokrývají kolem 75ti procent celkové variability, a proto je dostačující uvažovat právě první dvě komponenty.

V prvním grafu 4.9, kde je zobrazena analýza pro notebook, z pohledu variability spíše dominuje zpoždění. Z pohledu analýzy pro mobilní zařízení je situace v grafu 4.10 nepatrně odlišná a jako dominantní parametr z pohledu variability je zde dostupná šířka pásma. Lze tedy říci, že výsledky získané testováním subjektivního vnímání kvality pro notebook je více citlivé na zpoždění, naopak výsledky získané testováním subjektivního vnímání kvality pro mobilní zařízení jsou více citlivé na dostupnou šířku pásma. Tato skutečnost by se dala vysvětlit tak, že uživatelé jsou zvyklí na pomalejší odezvu při práci s mobilním zařízením, a proto jsou tolerantnější co se týče zpoždění. Naopak u notebooku se očekává okamžitá a plynulá reakce na jakékoliv interakce se zařízením. To znamená, že veškeré prodlevy mohou mít negativní dopad na hodnocení subjektivního vnímání kvality.

Grafy C.1, C.2, C.3 a C.4 uvedené v příloze zobrazují závislost mezi kvalitou MOS a akceptabilitou pro výsledné hodnocení subjektivního vnímání kvality pro notebooku a pro mobilní zařízení. V grafech C.1 a C.3 je zobrazena závislost zvláště pro různá zpoždění. Další dva grafy C.2 a C.4 pak zobrazují stejnou závislost zvláště pro různý typ webového obsahu. Ze všech uvedených grafů je patrné, že s rostoucí hodnotou MOS roste i hodnota akceptability. To je dále potvrzeno metodou PCA, kde byla zjištěna korelace mezi těmito hodnotami.

4.4 Určení prahů kvality MOS a bodů saturace kvality

Během zpracování výsledků byl potvrzen teoretický fakt, že se zlepšujícími se parametry sítě roste výsledné hodnocení kvality a akceptability. Dále bylo dokázáno, že existuje závislost mezi hodnocením MOS a akceptabilitou, tzn. že tyto hodnoty spolu korelují. Posledním krokem z pohledu analýzy získaných dat je stanovit hranice, kdy síťové parametry pro webové služby považovat za dobré. K tomuto stanovení je použit bod saturace kvality a určení prahů kvality.

Součástí výše uvedených výsledků bylo i dílčí stanovení bodu saturace kvality jak pro notebook, tak pro mobilní zařízení. Bod saturace odpovídá dostupné šířce pásma pro počáteční zpoždění 0s, od které již dále hodnocení kvality strmě neroste nebo naopak neklesá. Dále byla po diskusi se zástupci poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb na území České republiky stanovena hranice akceptability 75 %. Z výše uvedených grafů 4.2 a 4.6, lze pro tuto hranici akceptability stanovit příslušné síťové parametry. Z těchto dvou grafů lze nalézt hodnotu dostupné šířky pásma, která je rovna nebo vyšší než 75 %. Této hodnotě odpovídá první řádek v tabulce 4.3. Po odečtení prahu kvality pro hodnotu akceptability 75 % je nutné odečíst příslušnou hodnotu kvality MOS z grafů 4.1 a 4.5. Tato hodnota vyjadřuje skutečnost,

Tab. 4.3: Subjektivní práh kvality a saturace kvality

	Notebook	Smartphone
Práh kvality (75%)	256 kbps	128 kbps
Práh kvality MOS	3.85	3.63
Práh saturace	512 kbps	256 kbps

že jestliže hodnocený systém bude odpovídat z pohledu kvality této hodnotě MOS, tak bude docíleno toho, že bude 75 % uživatelů s tímto systémem spokojených. Hodnoty MOS nad tyto hranice lze vymežit pro zajištění tzv. prémiové kvality služby. Z pohledu poskytovatele mobilních služeb to znamená hranice pro dražší služby se zajištěnými určitými parametry a vysokou mírou spokojenosti koncových uživatelů. Prahy saturace jsou o stupeň výše oproti prahu 75ti % spokojenosti. Tyto prahy tak již spadají do skupiny síťových parametrů pro prémiovou službu. Tyto hodnoty tak mají vypovídající hodnotu pro poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb, jelikož na základě hodnot uvedených v tabulce 4.3 může provést optimalizaci dostupné šířky pásma. Tím přibližně dosáhne očekávané spokojenosti z pohledu zákazníků.

5 PREDIKCE VNÍMÁNÍ KVALITY A AKCEPTABILITY

Využívání webových služeb v prostředí mobilních sítí neustále roste rychlým tempem. Tento trend potvrzuje studie společnosti Cisco nesoucí název Visual Networking Index (VNI) Global Mobile Data Traffic Forecast for 2011 to 2016 [9]. Lze tedy pozorovat, že trh v oblasti mobilních komunikací a webových služeb je velice dynamický a predikce jeho vývoje v následujících letech je důležitá. Určitá predikce vývoje trhu je pak důležitá pro poskytovatele mobilních služeb. Změny, které musí provádět uvnitř sítě jsou jak časově, tak finančně náročné. Jako příklad lze uvést zprávu vydanou ČTU (Český telekomunikační úřad), která uvádí, že za rok 2012 vzrostly investice do sítí a služeb na hodnotu 14.58 miliard korun bez DPH. Oproti předchozímu roku 2011 se jedná o 3% meziroční nárůst. Naopak zisk meziročně klesl o 1.9% [12]. Jestliže by došlo k omezení investic do sítě, tak dříve nebo později by se tato skutečnost ještě více projevila na poklesu zisku poskytovatele mobilních služeb. Došlo by k nerovnováze v oblasti výkonu sítě a požadavcích koncových uživatelů, což by mělo za následek úbytek zákazníků. Z tohoto důvodu je nezbytné stále analyzovat trh, predikovat jeho vývoj a s dostatečným předstihem provádět investice do sítě v takové míře, aby byla vždy zajištěna určitá míra spokojenosti z pohledu koncových uživatelů. Práce, která byla doposud v této oblasti provedena a je zde prezentována, odpovídá aktuální situaci v oblasti používaných technologií pro webové služby. Stejně tak zvolené rychlosti a počáteční zpoždění odpovídají parametrům sítě, se kterými se můžeme setkat při běžném používání webových služeb. Z důvodu rychlého rozvoje je aktuálnost těchto výsledků omezená. Proto analýzou získaných dat došlo k následnému návrhu modelů, které jsou schopny na základě vstupních parametrů odhadnout výslednou hodnotu subjektivního vnímání kvality webové služby (MOS) a akceptability. Lze tedy s určitou přesností odhadnout (predikovat) hodnotu MOS a akceptabilitu pro vstupní parametry, které nebyly přímo součástí měření. To dává získaným výsledkům další rozměr [1]. Následující část práce popisuje návrh predikčních modelů, kde jako základ pro návrh těchto modelů jsou reálná data získaná z rozsáhlého měření provedeného skupinou lidí o velikosti 194. V současné době v oblasti výzkumu subjektivního vnímání kvality v prostředí mobilních sítí existuje již několik modelů, které jsou ale převážně zaměřeny na vnímání kvality multimediálního obsahu [72], [29]. Některé modely ve svém základu nepoužívají reálná data, ale jsou postaveny pouze na výsledcích získaných ze simulace v některém ze simulačních prostředí (Opnet Modeler a Network Simulator 2) [28]. Následující kapitoly popisují návrh tří predikčních modelů. První dva jsou určeny pro predikci hodnoty MOS zvláště pro notebook a pro mobilní zařízení. Třetí model je

určen pro predikci celkové hodnoty akceptability. V úvodu kapitoly jsou definovány vlastnosti sady hodnot, která je získána z reálného měření a tvoří základ pro návrh všech tří predikčních modelů. Následuje popis zvolené metody, která je založena na regresní analýze. V další části jsou popsány parametry jednotlivých modelů a jejich hodnocení z pohledu statistické významnosti. V závěru jsou pak uvedeny výsledné modely s hodnocením jejich přesnosti.

5.1 Vstupní data a použitá metoda

Cílem jednotlivých modelů je predikovat hodnotu *MOS* a akceptability pro vstupní hodnoty, které nebyly součástí reálného měření. Vstupní hodnoty lze nazvat prediktory, nebo nezávislé proměnné. Mezi prediktory, výslednou hodnotou *MOS* a akceptabilitou existuje vazba. Prvním krokem je nálezt tuto vazbu, neboli funkci, která popisuje vliv hodnoty dostupné šířky pásma a počátečního zpoždění na výsledné *MOS* a akceptabilitu.

Sada hodnot pro predikční model se skládá z dostupné šířky pásma označené zkratkou *BR*, počátečního zpoždění označené zkratkou *D*, subjektivního hodnocení kvality označené zkratkou *MOS* a akceptability *AKC*. Sadu hodnot lze definovat následujícím způsobem.

$$MOS_{i,j} \in [a, b] \tag{5.1}$$

kde hodnota *MOS* náleží do intervalu $[a, b]$ a stejně tak hodnota *AKC*, která náleží do intervalu $[c, d]$

$$AKC_{i,j} \in [c, d] \tag{5.2}$$

Tato definice odpovídá množině kombinací hodnot dostupné šířky pásma BR_i a zpoždění D_j . Vzhledem k počtu testů, které byly provedeny v průběhu reálného měření má tato množina velikost řádově jednotky tisíc položek. Přesný počet je 1678 hodnot pro mobilní telefon a 1407 pro notebook. Tyto hodnoty obsahují vždy několik záznamů pro stejnou hodnotu *BR* a *D* s tím, že výsledné *MOS* a *AKC* může být pro stejné vstupní hodnoty rozdílné. Pro stanovení vazby mezi vstupními a výstupními hodnotami je dostačující menší množství hodnot, a proto byla následně zvolena množina dat, která je průměrem *MOS* a *AKC* pro dílčí kombinace *BR* a *D*. Hodnotu

průměru MOS pro dílčí sadu kombinací BR a D lze vyjádřit následujícím způsobem.

$$MOS_{i,j} = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n BR_{iz}; \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n D_{jz} \right\} \quad (5.3)$$

Během provádění testů mohla hodnota AKC nabývat pouze hodnoty 0 (ne) nebo 1 (ano). Hodnota vyjadřuje zda je účastník testování ochoten takovou službu využívat a platit za ní. Pro potřeby modelu je tato hodnota přepočítána do procentuální hodnoty a vyjadřuje kolik procent koncových zákazníků by bylo ochotných danou službu (s parametry BR a D) využívat a platit za ní. Hodnota AKC je vyjádřena jako počet procent pro dílčí kombinaci BR a D .

$$AKC_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n AKC_{ijz} \quad [\%] \quad (5.4)$$

Po přepočtu hodnot podle rovnic 5.3 a 5.4 získáme matici hodnot, ve které jsou obsaženy vstupní hodnoty BR a D a výstupní hodnoty MOS a AKC . Dalším krokem pro návrh predikčních modelů je nalézt takovou funkci, která bude definovat vazbu mezi vstupními a výstupními hodnotami.

$$MOS = (BR, D) \quad ; \quad AKC = (BR, D) \quad (5.5)$$

Pro nalezení funkcí je neprve důležité definovat počáteční podmínky, které souvisejí s rozsahem vstupních hodnot BR a D , resp. jaký mají tyto hodnoty vliv na výstupní hodnoty MOS a AKC . Za základě podmínky uvedené 5.1 5.2 lze definovat následující vlastnosti.

- Rozsah funkce pro $MOS = (BR, D)$ náleží do pevně definovaného intervalu $[a, b]$. V případě použití stupnice od 1 do 5 je spodní hranice intervalu definována jako 1 a horní hranice intervalu jako 5.
- Rozsah funkce pro $AKC = (BR, D)$ náleží do pevně definovaného intervalu $[c, d]$. V případě reálného měření by tato funkce mohla nabývat pouze hodnoty nula nebo jedna. Po přepočtu této hodnoty na základě rovnice definované v 5.4 se rozsah funkce změní na interval od 0 do 100, který vyjadřuje procentuální akceptabilitu pro danou kombinaci BR a D .

Z výše uvedeného vyplývá, že rozsah funkce pro MOS i AKC je vždy omezen intervalem, do kterého náleží výstupní hodnota. Z pohledu obou funkcí mohou nastat

extrémní případy, které způsobí, že se výsledek funkce začne limitně blížit hranici intervalu.

$$\lim_{\substack{BR \rightarrow 0 \\ D \rightarrow \infty}} MOS(BR, D) = a \quad ; \quad \lim_{\substack{BR \rightarrow 0 \\ D \rightarrow \infty}} AKC(BR, D) = c \quad (5.6)$$

Z výše uvedených definic 5.6 je patrné, že jestliže se hodnota dostupné šířky pásma bude blížit nule a naopak velikost počátečního zpoždění se bude blížit nekonečnu, tak výsledek obou funkcí bude směřovat ke spodní hranici intervalu možných výsledků funkce.

$$\lim_{\substack{BR \rightarrow \infty \\ D \rightarrow 0}} MOS(BR, D) = b \quad ; \quad \lim_{\substack{BR \rightarrow \infty \\ D \rightarrow 0}} AKC(BR, D) = d \quad (5.7)$$

Naopak jestliže se hodnota dostupné šířky pásma bude blížit nekonečnu a velikost počátečního zpoždění se bude blížit nule (5.7), tak výsledek obou funkcí bude směřovat k horní hranici intervalu možných výsledků funkce.

5.2 Návrh predikčních modelů

V úvodu kapitoly 5.1 byly definovány základní vlastnosti množiny hodnot, které slouží jako základ pro návrh modelu pro predikci hodnoty *MOS* a akceptability (*AKC*). Návrh modelu je postaven na regresní analýze, která slouží k nalezení vazby mezi vstupními hodnotami a výstupní hodnotou. Pro nalezení vazby je množina dat rozdělena na množinu pro určení vazby mezi vstupními hodnotami, což jsou *BR* a *D* a výstupní hodnotou, což je *MOS*. Dále na množinu pro určení vazby mezi vstupními hodnotami *BR* a *D* a výstupní hodnotou *AKC*.

Regresní analýza je metoda, pomocí které lze tyto vazby najít, jedná se o jednostrannou metodu, kdy dojde ke stanovení výstupní hodnoty z nezávislých proměnných, neboli prediktorů. Jestliže výstupní hodnota náleží vždy do určitého intervalu, tak je nutné základní regresní analýzu rozšířit o logistickou metodu, jejíž podstata je právě v normalizaci výstupní hodnoty do potřebného intervalu. Metoda je obecně definována následujícím způsobem.

$$Z = \frac{e^{c_0 + c_1 f_1(X_1)}}{1 + e^{c_0 + c_1 f_1(X_1)}} \quad (5.8)$$

Definice 5.8 zaručí, že výsledná hodnota *Z* bude vždy v intervalu od nuly do jedné. Zajímavou a zároveň důležitou částí definice 5.8 je exponent $c_0 + c_1 f_1(X_1)$, který

definuje základní lineární regresní analýzu. Definice v exponentu je uvedena pro nalezení funkce mezi jednou vstupní proměnnou (prediktorem), označenou hodnotou X_1 a jednou výstupní. Hodnoty c_0 a c_1 jsou regresní koeficienty a pro jejich získání je použita metoda nejmenších čtverců. Jestliže provedeme lineární regresi nad více než jedním prediktorem, tak se základní obecný tvar lineární regrese rozšíří.

$$Y = c_0 + c_1 f_1(X_1) + c_2 f_2(X_2) + \dots + c_n f_n(X_n) \quad (5.9)$$

Pro zachování intervalu pro více prediktorů lze logistickou regresi následně definovat jako:

$$Z = \frac{e^{c_0 + c_1 f_1(X_1) + c_2 f_2(X_2) + \dots + c_n f_n(X_n)}}{1 + e^{c_0 + c_1 f_1(X_1) + c_2 f_2(X_2) + \dots + c_n f_n(X_n)}} = \frac{e^Y}{1 + e^Y} \quad (5.10)$$

Jelikož výsledkem 5.10 je hodnota pouze z intervalu od 0 do 1, tak dalším důležitým krokem je normalizace. Normalizace je provedena z důvodu, že výstupní hodnoty *MOS* a *AKC* náleží do rozdílného intervalu. Pro hodnotu *MOS* je to interval od 1 do 5 a pro hodnotu *AKC* je to interval od 0 do 100. Obecný postup normalizace je definován následujícím způsobem.

$$\frac{X - X_{MIN}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (5.11)$$

Definice 5.6, 5.7 určují interval pro *MOS* i *AKC*. Kdy interval pro *MOS* je v rozmezí od a do b a interval pro *AKC* je v rozmezí od c do d . Lze tedy definovat normované hodnoty *MOS* a *AKC* následujícím způsobem.

$$MOS_{NORM} = \frac{MOS - a}{b - a} \quad ; \quad AKC_{NORM} = \frac{AKC - c}{d - c} \quad (5.12)$$

Normované hodnoty získané z 5.12 budou vždy v intervalu od nuly do jedné. Je to tedy stejný interval, jako v případě výsledné hodnoty získané logistickou regresi, která je definována v 5.10. Lze tedy uvažovat, že platí následující pravidlo.

$$MOS_{NORM} = Z \quad ; \quad \frac{MOS - a}{b - a} = \frac{e^Y}{1 + e^Y} \quad (5.13)$$

$$AKC_{NORM} = Z \quad ; \quad \frac{AKC - c}{d - c} = \frac{e^Y}{1 + e^Y} \quad (5.14)$$

Na základě 5.13 a 5.14 lze určit oboustranou vazbu mezi MOS a funkcí Y a mezi AKC a funkcí Y . Jestliže rovnice upravíme do stavu, kdy si pro oba případy vyjádříme MOS a AKC a naopak Y , tak získáme následující vyjádření.

$$Y_{MOS} = \ln\left(\frac{MOS - a}{b - MOS}\right) \quad ; \quad MOS = \frac{a + be^Y}{1 + e^Y} \quad (5.15)$$

$$Y_{AKC} = \ln\left(\frac{AKC - c}{d - AKC}\right) \quad ; \quad AKC = \frac{c + de^Y}{1 + e^Y} \quad (5.16)$$

Definice uvedená v 5.9 dává obecnou formu lineární regrese [47]. Jako další krok, je třeba aplikovat tuto obecnou formu na konkrétní situaci z pohledu získaných hodnot.

$$Y_{MOS} = c_0^{MOS} + c_1^{MOS} f_1(BR) + c_2^{MOS} f_2(D) \quad (5.17)$$

$$Y_{AKC} = c_0^{AKC} + c_1^{AKC} f_1(BR) + c_2^{AKC} f_2(D) \quad (5.18)$$

Cílem je tedy nalézt takové koeficienty, které budou splňovat definici uvedenou výše. Hodnoty Y_{MOS} a Y_{AKC} lze snadno spočítat podle vztahu definovaném 5.15, resp. v 5.16. Tyto hodnoty tvoří výstupní parametry regresní analýzy. Parametry BR a D definují vstupní hodnoty pro regresní analýzu. Pro výpočet jednotlivých koeficientů c_0 , c_1 a c_2 byla použita metoda nejmenších čtverců. Je to základní metoda, která se používá pro výpočet koeficientů regresní analýzy. Výsledkem takového výpočtu je dále i přesnost, neboli vhodnost koeficientů pro danou sadu hodnot. S koeficientem souvisí i použitá funkce, která může být lineární, logaritmická nebo exponenciální. Na základě jednotlivých experimentů bylo zjištěno, že nejlepší výsledky dává použití logaritmické funkce pro hodnotu BR . Hodnocení bylo provedeno na základě hodnoty koeficientu spolehlivosti, kdy za použití logaritmické funkce pro dostupnou šířku pásma byla hodnota tohoto koeficientu nejvyšší.

$$Y_{MOS} = c_0^{MOS} + c_1^{MOS} \ln(BR) + c_2^{MOS} (D) \quad (5.19)$$

$$Y_{AKC} = c_0^{AKC} + c_1^{AKC} \ln(BR) + c_2^{AKC} (D) \quad (5.20)$$

Jestliže vstupními parametry pro lineární regresi byl použit přirozený logaritmus dostupné šířky pásma a dále zpoždění v základním lineárním tvaru, tak výpočet regresních koeficientů dával nejlepší výsledky. Jestliže byla použita jiná kombinace, tak hodnota koeficientu spolehlivosti klesala. Tím klesala i statistická významnost

jednotlivých regreních koeficientů. Po dosazení rovnic uvedených výše (5.19, 5.20) do rovnice 5.15, resp. 5.16 je získána výsledná podoba modelu pro predikci subjektivního vnímání kvality služby (*MOS*) a akceptability (*AKC*).

$$MOS = \frac{a + be^Y}{1 + e^Y} = \frac{a + be^{c_0 + c_1 \ln(BR) + c_2(D)}}{1 + e^{c_0 + c_1 \ln(BR) + c_2(D)}} \quad (5.21)$$

$$AKC = \frac{c + de^Y}{1 + e^Y} = \frac{c + de^{c_0 + c_1 \ln(BR) + c_2(D)}}{1 + e^{c_0 + c_1 \ln(BR) + c_2(D)}} \quad (5.22)$$

5.3 Výpočet a vlastnosti koeficientů pro predikční modely

Následující podkapitola popisuje postup výpočtu jednotlivých koeficientů a jejich vlastnosti pro všechny predikční modely. Rozdělení modelů je na predikční model pro predikci *MOS* pro notebooky a zvláště pro predikci *MOS* pro mobilní zařízení. Třetí model je zaměřen na predikci akceptability *AKC* a je společný pro notebook a mobilní zařízení. Výsledkem tedy jsou tři modely, které jsou definovány třemi sadami hodnot, kde jednotlivé sady hodnot jsou získány podle 5.3 a 5.4.

Na každou sadu je aplikována metoda lineární regrese, která najde závislost mezi nezávislými proměnnými a závislou proměnnou. Výstupem pro nalezení takovéto závislosti je určení jednotlivých koeficientů c_0 , c_1 a c_2 z definice 5.19 a 5.20. Koeficienty definují funkci, kterou jsou proloženy jednotlivé body ze sady hodnot. Pro nalezení jednotlivých koeficientů je použita metoda nejmenších čtverců, která má základ v řešení soustavy rovnic pomocí maticového výpočtu. V případě lineární regrese pro dvě nezávislé a jednu závislou proměnnou se soustava rovnic sestaví podle následujícího pravidla.

$$c = (F^T F)^{-1} F^T y \quad (5.23)$$

kde c je vektor velikosti tři, který obsahuje výsledné koeficienty c_0 , c_1 a c_2 . Matice F představuje matici nezávislých proměnných a matice y představuje matici závislé proměnné. Soustava rovnic je odvozena metodou parciálních derivací. Postup odvození soustavy rovnic je detailně popsán v literatuře [47].

$$F^T F = \begin{bmatrix} n & \sum BR_i & \sum D_i \\ \sum BR_i & \sum BR_i^2 & \sum BR_i D_i \\ \sum D_i & \sum BR_i D_i & \sum D_i^2 \end{bmatrix} ; \quad F^T y = \begin{bmatrix} \sum MOS_i \\ \sum BR_i MOS_i \\ \sum D_i MOS_i \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

Po konstrukci inverzní matice k matici $F^T F$ definované v 5.24 a vynásobení této inverzní matice maticí $F^T y$ (5.24) získáme řešení soustavy rovnic, jejímž výsledkem jsou koeficienty c_0 , c_1 a c_2 lineárního regresního modelu. Proměnná n v 5.24 definuje velikost vstupní sady hodnot.

$$c = (F^T F)^{-1} F^T y = \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Po dosazení těchto koeficientů do rovnic 5.19, 5.20 a do rovnic 5.21, 5.22 získáme výslednou podobu regresní funkce pro funkci Y a následně výslednou podobu modelů pro predikci MOS a AKC , kde jako jediné proměnné veličiny vystupují BR a D , jenž jsou vstupní nezávislé hodnoty.

Koeficienty vypočítané tímto způsobem představují nejdůležitější část výsledků získaných metodou lineární regresní analýzy. Spolu s koeficienty se při výpočtu zjišťují další parametry, které vyjadřují vhodnost a přesnost zvolené sady hodnot pro výpočet regresní analýzy. Mezi tyto parametry dále patří:

- **Korelační koeficient** - Pearsonův korelační koeficient, koeficient udává míru závislosti (těsnost) mezi nezávislými proměnnými (BR , D) a závislou proměnnou (MOS/AKC). Pearsonův korelační koeficient může nabývat hodnot od nuly do jedné a čím více se blíží jedné, tak tím je míra závislosti větší.
- **R Spolehlivost** - jedná se o koeficient determinace, který udává kolik procent hodnot je dáno regresním modelem. Hodnota může být rovna maximálně jedné, což představuje, že 100% hodnot použitých pro regresní model je dáno tímto modelem.
- **Významnost F** - udává pravděpodobnost, kterou lze porovnat s předem stanovenou hodnotou α , která je standardně stanovena na hodnotu 0.05 (5%). Porovnání definuje statistickou významnost modelu jako celku. Je-li hodnota významnosti F nižší než hodnota α , tak je model statisticky významný. To znamená, že model významně zpřesní odhad závislé proměnné z nezávislých proměnných oproti použití aritmetického průměru závislé proměnné. Je-li hodnota významnosti F vyšší nebo rovna hodnotě α , tak model není statisticky významný.
- **Chyba střední hodnoty** - vztahuje se k jednotlivým koeficientům získaných lineární regresí a specifikuje míru spolehlivosti pro daný koeficient. Čím je hodnota chyby střední hodnoty nižší, tím je menší interval spolehlivosti pro daný koeficient (nižší variabilita koeficientu).
- **t Stat** - udává významnost pro jednotlivé koeficienty regresního modelu. To,

že model jako celek je statisticky významný ještě nemusí znamenat, že všechny dílčí koeficienty jsou automaticky také statisticky významné. Může nastat situace, že některý z koeficientů není významný, a proto nemá v regresním modelu váhu. Hodnocení regresního modelu na základě významnosti jednotlivých koeficientů se provádí u mnohonásobné regresní analýzy. V případě jednoduché regresní analýzy nemá toto hodnocení smysl, protože hodnocení významnosti koeficientu jednoduché regresní analýzy je rovné celkové statistické významnosti modelu regresní analýzy.

- **Hodnota P** - udává významnost pro jednotlivé koeficienty regresního modelu přepočítanou do pravděpodobnosti, kterou je nejvýhodnější použít pro vyhodnocení testu. Hodnota P se porovnává s referenční hodnotou α stejně jako v případě hodnocení významnosti F regresního modelu jako celku. I v případě hodnocení významnosti jednotlivých koeficientů je obvyklá hodnota α rovna 0.05 (5%). Jestliže je hodnota P nižší než hodnota α , tak je daný koeficient statisticky významný. V opačném případě je koeficient pro model statisticky nevýznamný a tudíž pro použití v regresní analýze zbytečný.
- **Interval 95%** - vyznačuje možný rozsah pro daný koeficient (dolní hranici a horní hranici). Hodnota z tohoto intervalu zaručuje spolehlivost regresního modelu jako celku. Dále interval může signalizovat nevýznamnost koeficientu a to v případě, že je v intervalu zahrnuta hodnota 0, tj. jestli je spodní dolní hranice 95% záporná hodnota a horní hranice 95% kladná hodnota.
- **Reziduum** - představuje rozdíl mezi hodnotou, která je získána na základě výpočtu navrženým modelem a skutečnou naměřenou hodnotou. Analýza reziduí je jednou z možných metod hodnocení navrženého modelu.

5.4 Parametry a hodnocení predikčních modelů

Následující podkapitola popisuje získané výsledky pro jednotlivé modely. Z pohledu každého modelu je důležité, jaká sada hodnot je použita pro jeho výpočet. To určuje zda je model spolu s jeho koeficienty statisticky významný nebo nevýznamný. Z tohoto důvodu je v této kapitole provedeno hodnocení statistické významnosti, jak pro model jako celek, tak pro jednotlivé koeficienty modelu. Stejně tak je důležitá hodnota spolehlivosti, která určuje kolik procent hodnot ze stanovené sady je dáno tímto modelem. Dalším hodnotícím parametrem jednotlivých modelů jsou jejich rezidua, ze kterých lze odvodit přesnost stanovení modelové hodnoty na základě porovnání s měřenou hodnotou. Jednotlivé dílčí výpočty pro zjištění všech potřebných parametrů jsou poměrně složité a časově náročné. Z toho důvodu byl celý proces automatizován pomocí skriptu vytvořeném v prostředí Matlab.

Tab. 5.1: Koeficinity a parametry pro jednotlivé predikční modely.

Parametr	MOS_{MT}	MOS_{NB}	AKC
c_0	-0.602	-2.712	-2.393
Interval 95%	[-0.986, -0.218]	[-3.08, -2.344]	[-2.952, -1.833]
c_1	0.274	0.65	0.698
Interval 95%	[0.204, 0.344]	[0.582, 0.717]	[0.595, 0.8]
c_2	-0.095	-0.101	-0.125
Interval 95%	[-0.117, -0.073]	[-0.122, -0.08]	[-0.157, -0.093]
R^2 (spolehlivost)	0.90	0.97	0.94
R (Korelační koef.)	0.94	0.98	0.97
Chyba stř. hodnoty	0.18	0.17	0.26
F statistika	78.135	264.385	140.579
Významnost F	1.34e-09	4.54e-14	1.03e-11

Tabulka 5.1 udává parametry jednotlivých predikčních modelů. Jednotlivé sloupce tabulky symbolizují tři dílčí modely, kde MOS_{MT} je model pro predikci hodnoty MOS pro mobilní zařízení, MOS_{NB} je model pro predikci hodnoty MOS pro notebook a AKC je model pro predikci celkové akceptability. První řádky tabulky obsahují jednotlivé koeficinity regresní analýzy. Tyto koeficinity po dosazení do 5.21, 5.22 slouží pro výpočet jednotlivých modelů v prostředí Matlab.

Jak je vidět z tabulky 5.1, tak hodnota R^2 spolehlivosti pro všechny tři modely je 0.90 a více. Tato hodnota o modelu říká, kolik procent hodnot je dáno predikčním modelem. Pro model predikce MOS pro mobilní zařízení je dáno predikčním modelem 90% hodnot, pro model predikce pro notebook je to dokonce 97% hodnot a pro model predikce akceptability to je 94% hodnot. Ve všech třech případech jsou hodnoty spolehlivosti poměrně vysoké, takže lze říci, že jsou všechny tři modely vysoce spolehlivé. Hodnota tohoto koeficientu je dána následujícím vztahem.

$$R^2 = 1 - \frac{S_R}{S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (mos_i - MOS_i)^2}{\sum_{i=1}^n (mos_i - \overline{mos_i})^2} \quad (5.26)$$

Ve vztahu 5.26 vystupuje S_Y , což je celková variabilita závislé proměnné, která je dána jejím celkovým součtem čtverců. Hodnota S_R , představuje reziduální součet čtverců [47].

Korelační koeficient obsažený na dalším řádku v tabulce 5.1 definuje těsnost, neboli korelaci mezi jednotlivými proměnnými. Korelační koeficient může nabývat od -1 do 1, kde -1 znamená zápornou (slabou) korelaci a 1 kladnou (silnou) korelaci mezi proměnnými. Pro všechny tři modely se jednotlivé korelační indexy blíží hodnotě 1,

což značí, že jednotlivé proměnné jsou korelované.

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_R}{S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (mos_i - MOS_i)^2}{\sum_{i=1}^n (mos_i - \overline{mos_i})^2}} \quad (5.27)$$

Výpočet korelačního koeficientu 5.27 je proveden jako odmocnina koeficientu spolehlivosti. Postup výpočtu korelačního koeficientu je tedy totožný s postupem definovaným v 5.26.

Další dva parametry - F statistika a významnost F určují statistickou významnost predikčního modelu jako celku. Nejprve se ověří, zda pro všechny predikční modely platí následující podmínka.

$$\text{významnost } F < \alpha \quad ; \quad \text{kde } \alpha = 0.05 \quad (5.28)$$

Na základě hodnot významnosti a vztahu definovaném v 5.28 můžeme říci, že je podmínka pro všechny modely splněna. Jak je patrné z tabulky 5.1, tak hodnoty významnosti pro všechny navržené modely jsou hluboko pod hodnotou $\alpha = 0.05$. Další hodnocení je na základě hodnoty F statistiky, která je dána následujícím vztahem.

$$F = \frac{\frac{R^2}{K}}{\frac{1-R^2}{N-K-1}} \quad (5.29)$$

V definici 5.29 je vyskytuje korelační index R^2 , hodnota N , která vyjadřuje počet pozorování regresní metody a K , což je počet nezávislých proměnných predikčního modelu. Pro ověření statistické významnosti modelu jako celku je nutné hodnotu F statistiky porovnat s kvantilem F rozdělení. Kvantil rozdělení je definován následujícím způsobem.

$$F_{\alpha=1-0.05}(p-1; n-p) = 3.55 \quad (5.30)$$

Kde $p-1$ a $n-p$ jsou stupně volnosti modelu. Hodnota n je počet pozorování regresního modelu a hodnota p je počet proměnných. Po stanovení jednotlivých stupňů volnosti se příslušná hodnota dohledá v matematických tabulkách (Kvantily F rozdělení). Následuje porovnání s hodnotou statistiky F, kde je opět patrné, že kvantil F rozdělení je menší než hodnota F statistiky pro všechny tři predikční modely. Platí tedy $78.135 > 3.55$, $264.385 > 3.55$, $140.579 > 3.55$. Všechna výše testovaná kritéria byla splněna. Lze tedy hodnotit jednotlivé modely, že jsou jako celek statisticky významné.

Další hodnocení modelů se provádí z hlediska jednotlivých koeficientů, konkrétně hodnocení statistické významnosti pro jednotlivé koeficienty. Z logického pohledu by se mohlo zdát, že jestliže je statisticky významný model jako celek, tak musí být statisticky významné jeho koeficienty. Toto pravidlo ale vždy neplatí, může nastat situace, kdy model jako celek je statisticky významný a některý nebo dokonce všechny koeficienty jsou statisticky nevýznamné. Jestliže je některý z koeficientů nevýznamný, tak to značí, že nemá na výsledný model vliv a lze ho z modelu vypustit. Následující tabulka zobrazuje klíčové parametry pro jednotlivé koeficienty, které jsou důležité k vyhodnocení jejich statistické významnosti.

Tab. 5.2: Parametry pro jednotlivé koeficienty predikčních modelů.

Koeficient	Parametr	MOS_{MT}	MOS_{NB}	AKC
c_0	T Statistika	-3.296	-15.482	-8.989
	P Hodnota	0.004	7.58-e12	4.48-e08
c_1	T Statistika	8.198	20.259	14.311
	P Hodnota	1.72-e07	7.71-e14	2.82-e11
c_2	T Statistika	-9.146	-10.168	-8.235
	P Hodnota	3.46-e08	6.9-e09	1.62-e07

Hodnota T statistiky v tabulce 5.2 odkazuje na metodu Studentova t testu [47]. Pro určení statistické významnosti se porovnává vypočítaná absolutní hodnota T statistiky s kritickou hodnotou získanou z matematických tabulek.

$$T_{1-(\alpha/2)}(n-2) = 2.093 \quad (5.31)$$

Jestliže porovnáme všechny hodnoty T statistiky pro jednotlivé koeficienty modelů, tak zjistíme, že ve všech případech je kritická hodnota (hodnota získaná z matematických tabulek, 5.31) menší. Stejně tak pro jednotlivé koeficienty platí, že hodnoty P jsou ve všech případech menší, než zvolená hodnota $\alpha = 0.05$ (Hodnota $P < \alpha$). Na základě těchto hodnocení lze říci, že jednotlivé modely, jako celky, tak i jejich koeficienty jsou statisticky významné. To znamená, že model významně zpřesní odhad závislé proměnné z nezávislých proměnných oproti použití aritmetického průměru závislé proměnné.

5.5 Přesnost a struktura predikčních modelů

Důležitým parametrem v návaznosti na metodu lineární regrese jsou rezidua regresního modelu. Jak již bylo uvedeno výše, tak rezidua představují rozdíly mezi

hodnotami, která jsou získané na základě výpočtu navrženým modelem a skutečnou naměřenou hodnotou. Analýza reziduí je jednou z dalších metod hodnocení navrženého modelu. Rezidua jsou počítána vůči hodnotám, které jsou použity pro konstrukci predikčního modelu.

Pro hodnocení reziduí lineárního regresního modelu existuje několik různých metod, které lze použít. Základní metodou je ověření, zda jsou rezidua náhodná. V případě všech tří modelů na základě grafické reprezentace reziduí lze říci, že jsou náhodná. Dále bude počet metod omezen pouze na jednu, a to na normovaná rezidua. Normalizace každého získaného rezidua se provádí dělením směrodatnou odchylkou reziduí. Následně se všechna rezidua sečtou a součet by v ideálním případě měl být 0. Hodnota tohoto součtu je uvedena zvlášť pro každý z modelů.

Jako prostředí pro ověření funkce a vykreslení jednotlivých modelů byl zvolen Matlab. Hlavní podstatou celého skriptu je ověření rovnice modelu definované v 5.21 pro predikci *MOS* a v 5.22 pro predikci akceptability *AKC*. Současně jsou do modelu vykresleny jednotlivé hodnoty (body v modelu), které byly získány reálným měřením. Lze tedy vizuálně porovnat, jak se hodnoty liší vůči ploše modelu.

Na obrázku D.1 je patrný predikční model pro predikci hodnoty *MOS* pro mobilní zařízení. Rozsah predikčního modelu pro dostupnou šířku pásma byl zvolen od 0 do 4096kbps. Reálné hodnoty získané měřením jsou do šířky pásma o hodnotě 1024kbps. Rozsah predikčního modelu pro hodnotu počátečního zpodění byl zvolen od 0s až do 30s. Pomocí lineární regresní analýzy byly vypočítány koeficienty a dosazeny do rovnice 5.21. Výsledná matematická podoba modelu má následující tvar.

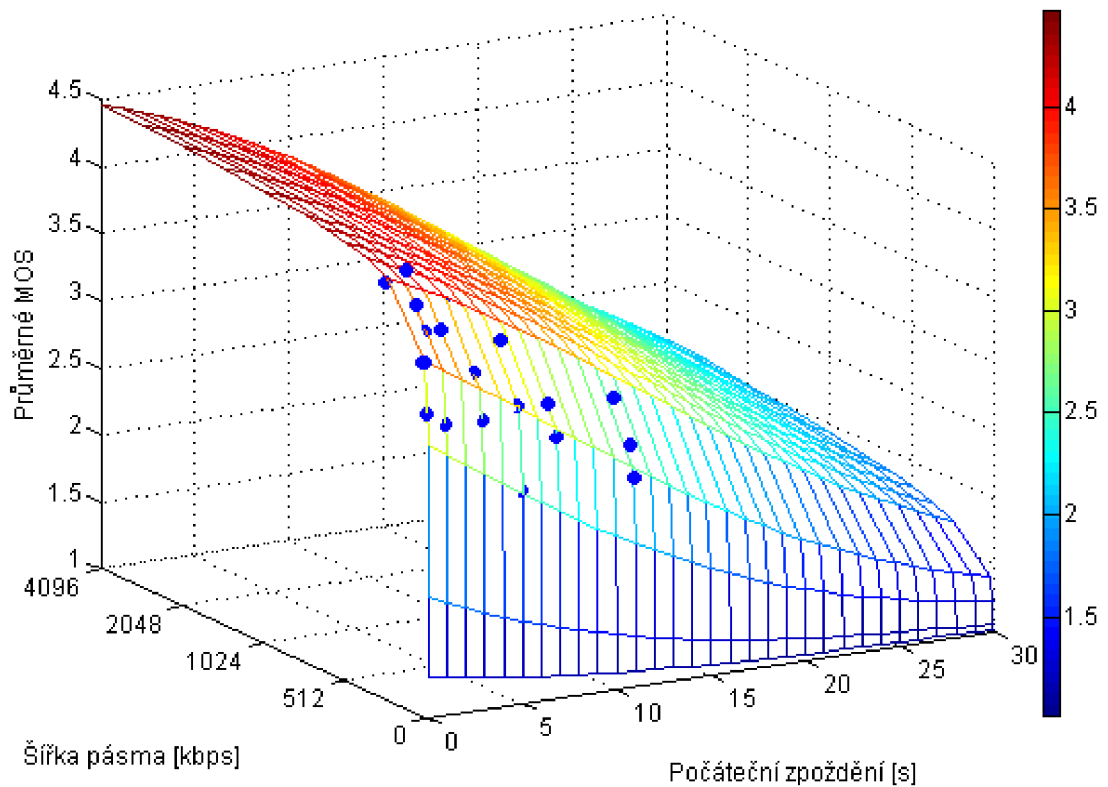
$$MOS = \frac{a + be^Y}{1 + e^Y} = \frac{1 + 5e^{-0.602+0.274\ln(BR)-0.954D}}{1 + e^{-0.602+0.274\ln(BR)-0.954D}} \quad (5.32)$$

Dále byla pro model zjištěna rezidua a normovaná rezidua.

$$\sum_{i=1}^n e_{Ni} = \frac{e_i}{s_{ei}} = 3.44e^{-14} \quad (5.33)$$

Součet normovaných reziduí by se měl být v ideálním případě roven nule. Jak je vidět z výše uvedeného vztahu, tak je součet normovaných reziduí velice blízký nule. Z tohoto pohledu lze model hodnotit jako vhodný pro predikci. Dále byla provedena analýza reziduí z pohledu zjištění procentuální odchylky hodnoty získané modelem od hodnoty naměřené a pro model predikce *MOS* pro mobilní zařízení je tato průměrná odchylka 3.65%. Lze tedy model považovat za přesný.

Z pohledu struktury modelu D.1 je patrné, že maximální hodnota *MOS* se blíží hodnotě 4.5 *MOS* s rostoucí dostupnou šířkou pásma. Spolu s klesající šířkou pásma klesá i hodnota *MOS*. Další strmý pokles *MOS* je patrný se zvyšujícím se zpožděním.



Obr. 5.1: Model pro predikci MOS (mobilní zařízení).

Trend modelu tedy odpovídá počátečním hypotézám definovaných v 5.6 a 5.7. Následující model D.1 je postaven na hodnotách získaných z měření na notebooku. Rozsah predikčního modelu byl opět pro dostupnou šířku pásma zvolen od $0s$ do $4096kbps$. Reálné hodnoty získané měřením jsou do dostupné šířky pásma $1024kbps$. Rozsah predikčního modelu pro hodnotu počátečního zpoždění byl zvolen od $0s$ až do $30s$.

Pomocí lineární regresní analýzy byly vypočítány koeficienty a dosazeny do rovnice 5.21. Výsledná matematická podoba modelu je:

$$MOS = \frac{a + be^Y}{1 + e^Y} = \frac{1 + 5e^{-2.712+0.65\ln(BR)-0.101D}}{1 + e^{-2.712+0.65\ln(BR)-0.101D}} \quad (5.34)$$

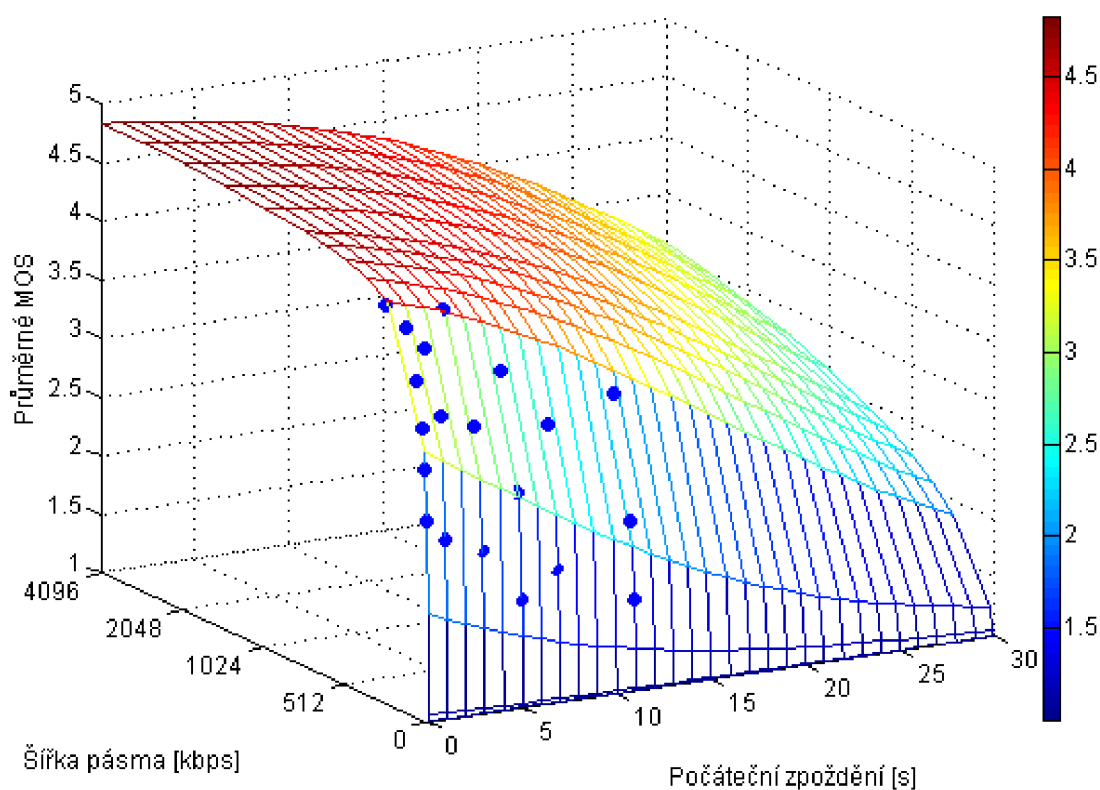
Dále byla pro model zjištěna rezidua a normovaná rezidua.

$$\sum_{i=1}^n e_{Ni} = \frac{e_i}{s_{ei}} = 8.57e^{-14} \quad (5.35)$$

Jak je opět patrné, tak součet normovaných reziduí se i v případě druhého modelu

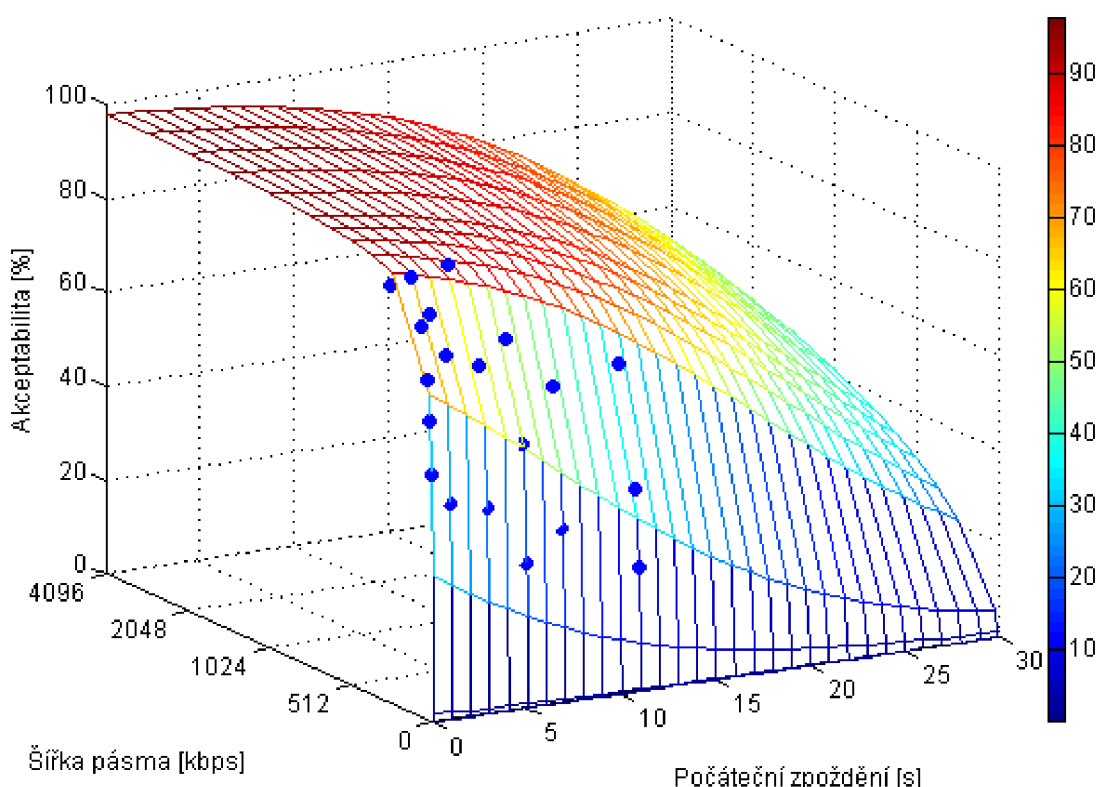
pro predikci hodnoty MOS pro notebook blíží k nule. Z tohoto pohledu lze model hodnotit jako vhodný pro predikci. I pro tento model byla provedena analýza reziduí z pohledu zjištění procentuální odchylky hodnoty získané modelem od hodnoty naměřené. Pro model predikce MOS pro notebook je tato průměrná odchylka 4.19%. Hodnota je vyšší o 0.54%, což nepředstavuje takové zhoršení oproti původnímu modelu a lze i tento model považovat za spolehlivý.

Z pohledu struktury modelu D.1 je patrné, že maximální hodnota MOS se blíží hodnotě 5 MOS s rostoucí dostupnou šířkou pásma. To je více než v předchozím případě pro model predikce MOS pro mobilní zařízení. Spolu s klesající dostupnou šířkou pásma klesá i hodnota MOS. Další pokles MOS je patrný se zvyšujícím se zpožděním. V tomto případě není pokles v závislosti na počátečním zpoždění tak strmý. Mírně odlišný průběh modelu pro predikci hodnoty MOS na notebooku lze přisuzovat větší spokojenosti při využívání stejné služby na notebooku. Stejně jako v předchozím případě, trend modelu odpovídá počátečním hypotézám definovaných v 5.6 a 5.7.



Obr. 5.2: Model pro predikci MOS (notebook).

Jako zdroj dat pro třetí model, který je zobrazen na obrázku 5.3 byla zvolena akceptabilita. Jelikož by při použití surových hodnot získaných z reálného měření nabývala závislá proměnná pouze dvou hodnot (nula nebo jedna), tak byla tato množina transformována do počtu procent pro danou sadu hodnot se stejnou dostupnou šířkou pásma a stejným počátečním zpožděním (viz definice 5.5). Predikovaná závislá hodnota modelu tedy vyjadřuje kolik procent lidí ohodnotilo akceptabilitu hodnotou 1 (ano), to znamená kolik procent lidí by bylo ochotných za tuto službu platit.



Obr. 5.3: Model pro predikci celkové akceptability.

Rozsah predikčního modelu byl opět pro dostupnou šířku pásma zvolen od 0s do 4096kbps. Reálné hodnoty získané měřením jsou dostupné do šířky pásma 1024kbps. Rozsah predikčního modelu pro hodnotu počátečního zpoždění byl zvolen od 0s až do 30s.

Pomocí lineární regresní analýzy byly vypočítány koeficienty a dosazeny do rovnice 5.36. Výsledná matematická podoba modelu je:

$$AKC = \frac{c + de^Y}{1 + e^Y} = \frac{100e^{-2.393+0.698\ln(BR)-0.125D}}{1 + e^{-2.393+0.698\ln(BR)-0.125D}} \quad (5.36)$$

Stejně jako v případě obou modelů pro predikci hodnoty MOS, tak i pro model predikce akceptability byla zjištěna rezidua a normovaná rezidua.

$$\sum_{i=1}^n e_{Ni} = \frac{e_i}{s_{ei}} = 7.46e^{-14} \quad (5.37)$$

Hodnota se opět blíží k nule a z tohoto pohledu lze model hodnotit jako vhodný pro predikci. I pro tento model byla provedena analýza reziduí z pohledu zjištění procentuální odchylky hodnoty získané modelem od hodnoty naměřené, a pro model predikce akceptability je tato průměrná odchylka 3.4%. Jedná se tedy o model s nejnižší odchylkou, která je o 0.25% nižší než v případě modelu pro predikci hodnoty MOS pro mobilní zařízení. Struktura modelu pro predikci akceptability 5.3 se podobá modelu pro predikci hodnoty MOS pro notebook. Maximální akceptabilita se blíží hodnotě 100, což značí maximální spokojenost. Hodnota akceptability pozvolně klesá pro nižší dostupnou šířku pásma a zvyšující se zpoždění. I v tomto případě platí počáteční hypotéza definovaná v 5.6 a 5.7.

5.6 Zhodnocení predikčních modelů

Základem pro návrh jednotlivých predikčních modelů jsou data získána komplexním měřením, kterého se účastnilo několik desítek lidí. Tím vznikl pevný základ pro návrh tří predikčních modelů. Jako matematický základ pro tyto modely byla zvolena lineární regresní analýza, která se obecně používá pro návrh takovýchto modelů. Přínosem celého návrhu je metoda omezení intervalu pomocí logistické regresní analýzy. Dále je to normování intervalu závislých proměnných a vytvoření tak vazby mezi naměřenými hodnotami a příslušnou matematickou metodou.

Samotné metody použité pro návrh predikčních modelů jsou poměrně komplexní a tato práce nepokrývá všechny detaily, které souvisejí s metodou lineární regrese a logistické regrese. Primárním cílem práce je více se zaměřit na získané hodnoty a model jako celek. Pro hodnocení vhodnosti zvolených dat pro predikční model byly použity základní metody, jejichž hlubší princip a odvození je dohledatelné v příslušné literatuře [47]. Zde jsou tyto principy popsány více obecným způsobem, protože pro samotné predikční modely nejsou tolik důležité. Stejně tak dílčí výpočty koeficientů pomocí regresní metody, kdy byl celý postup automatizován pomocí vhodného vývojového prostředí. Během návrhu modelu a obzvláště pak během výběru vhodné množiny hodnot bylo prováděno velké množství výpočtů pomocí regresní analýzy. V případě neautomatizovaného přístupu by se jednalo o velice složitý a časově náročný proces. To souvisí s logaritmickou konverzí dostupné šířky pásmá pro potřeby modelu. Jeho vhodnost byla zjištěna experimentálně, kdy logaritmizace dostupné šířky

pásma byla jednou z možných metod spolu s lineárním a exponenciálním průběhem. Za použití dílčích analýz vhodnosti zvolené množiny dat se ukázalo, že jak modely, tak i jejich dílčí koeficienty jsou statisticky významné. Výsledky predikčních modelů dávají lepší výsledky než jejich reprezentace pomocí aritmetického průměru. Stejně tak jsou významné všechny dílčí nezávislé proměnné, a proto mají vliv na výsledný model. Nelze tedy žádnou z nezávislých proměnných vypustit, aniž by to změnilo strukturu jednotlivých modelů. Během dílčích analýz bylo zjištěno, že přesnost jednotlivých modelů je poměrně vysoká a z toho důvodu vhodná pro predikci hodnoty MOS a akceptability. Výše jsou uvedeny jednotlivé modely s reálnými hodnotami. Samotné modely bez vložených hodnot pro porovnání přesnosti jsou uvedeny v příloze D.1, D.2, D.3.

6 ZÁVĚR

Oblast webových služeb, mobilních telekomunikačních sítí a koncových zařízení spolu úzce souvisejí. Dohromady tvoří řetězec, kde na každou jeho část je kladen velký důraz a vysoké požadavky. Rychlost vývoje v této oblasti je dána technologickým pokrokem a také tlakem koncových uživatelů, jejichž nároky stále rostou. Tato skutečnost s sebou nese problém, který souvisí s množstvím dat, které je nutné přenášet skrze síť Internet. Je proto nutné neustále hledat nová řešení a navýšovat tak kapacitu pro přenos. Velká část přenosů se uskuteční v prostředí mobilních telekomunikačních sítí, kde každý poskytovatel služeb nese zodpovědnost za síť v souvislosti s kvalitou poskytování jednotlivých služeb. Obzvláště v této oblasti je pak nutné sledovat trend vývoje koncových mobilních zařízení a webových služeb. Změny, které souvisejí s navyšováním kapacity jsou jak časově, tak finančně náročné. Určitá predikce vývoje trhu je pak důležitá pro tyto poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb. To potvrzují zprávy vydané ČTU (Český telekomunikační úřad), kde se uvádí, jak investice do rozvoje síťové infrastruktury meziročně rostou. Na druhé straně je návratnost těchto investic. Je tedy nutné nalézt vyvážený stav mezi investicemi a dopadem na koncové uživatele. Tato práce je primárně zaměřena na to, aby pomohla najít právě takový kompromis.

Pro subjektivní hodnocení kvality webové služby v prostředí mobilních telekomunikačních sítí byla doporučení ITU-T brána jako základ, který byl dále uzpůsoben konkrétním požadavkům a rozšířen o klíčové parametry, které ovlivňují subjektivní vnímání služby. Výsledkem je navržená metodika, která je detailně popsána v kapitole 2. Metodika integruje výsledné hodnocení založené na stupnici MOS a dále ho rozšiřuje o hodnocení akceptability, což je nový přístup, který je z pohledu metodiky inovativní a dává získaným výsledkům další rozměr. To potvrzují ohlasy z významných mezinárodních konferencí, jako je konference IEEE Globecom 2013 pořádaná v Atlantě ve Spojených státech [2] a IEEE International Conference on Communications (ICC) v Sydney v Austrálii [1], kde byla metodika společně s výsledky prezentována.

Pro účely testování byla navržena a realizována komplexní platforma, která splňuje všechny požadavky vycházející z navržené metodiky. Popisu navržené platformy se věnuje celá kapitola, která popisuje všechny důležité požadavky. Dále uvádí již dostupná řešení a hodnotí proč tato řešení nemohla být použita pro potřeby hodnocení subjektivního vnímání kvality webové služby. Celá platforma je navržena pro testování reálného webového obsahu, což dělá jednotlivé testy více věrohodné. Dále využívá moderní technologie, které korespondují s trendem v této oblasti. Platforma zajistila hladký průběh pro testování, které bylo provedeno na skupině o velikosti 194 lidí. Z toho pohledu bylo provedeno unikátní měření subjektivního vnímání kva-

lity pro oblast mobilních telekomunikačních sítí. Vzhledem k velikosti skupiny bylo získáno velké množství hodnot, jejichž detailní analýza je uvedena v kapitolách 4.1 a 4.2. Z těchto hodnot byl dále stanoven práh kvality jak z pohledu dostupné šířky pásma, tak z pohledu hodnoty MOS a dále práh saturace. V další části práce je pak přistoupeno k návrhu predikčních modelů pro predikci hodnoty MOS a hodnoty akceptability. Z matematického pohledu se podařilo navrhnout trojici modelů, které vykazují vysokou přesnost a spolehlivost. Modely mají za cíl prodloužit aktuálnost získaných výsledků tím, že umožňují predikovat hodnotu MOS a hodnotu akceptability i pro rozsah vstupních hodnot, které nebyly součástí měření. Modely jsou navrženy pro vstupní parametry vycházející z analýzy klíčových parametrů ovlivňujících subjektivní vnímání kvality. Potenciál a kvalitu dosažených výsledků lze odvodit od kladných ohlasů z konferencí, tak i ze zájmu o výsledky ze strany poskytovatele mobilních telekomunikačních služeb.

LITERATURA

- [1] ALEXA, THE WORLD INFORMATION COMPANY. *The top 500 sites in Czech Republic*, [online], <http://www.alexa.com/topsites/countries/CZ>. 2010.
- [2] ANDRIOD OPERATING SYSTEM. *The world's most popular mobile OS* [online]. <http://www.android.com/meet-android/>. 2013.
- [3] BARAKI, H.; COMES, D.; GEIHS, K. *Context-Aware Prediction of QoS and QoE Properties for Web Services*. Networked Systems (NetSys), 2013 Conference on , vol., no., pp.102,109, 11-15 March 2013.
- [4] BOUCH, A.; KUCHINSKY, A.; BHATTI, N. *Quality is in the eye of the beholder: meeting user's requirements for internet quality of service*. Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, USA, 2000.
- [5] BOUCH, A.; SASSE, M. A.; DEMEER, H. G. *Of packets and people: a user-centered approach to quality of service*. In Proc. of IWQoS 2000.
- [6] BROWN, LM. A. *The Guide to IP Layer Network Administration with Linux: Components of Linux Traffic Control* [online]. <http://linux-ip.net/articles/Traffic-Control-HOWTO/components.html>. 2012.
- [7] Bert, H. *The Wonder Shaper, Linux Advanced Routing and Shaping* [online]. <http://lartc.org/wondershaper/>. 2012.
- [8] CANONICAL LTD. *Ubuntu desktop - overview. Fast, free and incredibly easy to use*. [online]. <http://www.ubuntu.com/>. 2013.
- [9] CISCO. *Visual Networking Index, ongoing initiative to track and forecast the impact of visual networking applications : Forecast and Methodology 2011-2016*. 2012.
- [10] COLLANGE, D.; COSTEUX, J.-L. *Passive estimation of quality of experience*. Journal of Universal Computer Science, 2008.
- [11] CUI, H.; BIERSACK, E. *On the Relationship Between QoS and QoE for Web Sessions*. Eurocom, Research Report RR-12-263, 2012.
- [12] ČTU - ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. *Zpráva a vývoji trhu elektronických komunikací se zaměřením na rok 2012*. 2012.
- [13] DSL.CZ, ASPA, A.S. *Naměřené průměrné rychlosti internetu na DSL.cz* [online]. <http://www.dsl.cz/kategorie/2-rychlosti-internetu>. 2011.

-
- [14] EGGER, S.; HOSSFELD, T.; SCHATZ, R.; FIEDLER, M., *Waiting times in quality of experience for web based services*. Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2012 Fourth International Workshop on , vol., no., pp.86,96, 5-7 July 2012.
- [15] ETSI TR 102 643 v. 1.0.2. *Human factors (HF); Quality of Experience requirements for real-time communication services*. 2010.
- [16] HOSSFELD, T.; KEIMEL, C.; HIRTH, M.; GARDLO, B.; HABIGT, J.; DIEPOLD, K.; TRAN-GIA, P. *Best Practices for QoE Crowdttesting: QoE Assessment With Crowdsourcing*. Multimedia, IEEE Transactions on , vol.16, no.2, pp.541,558, 2014.
- [17] IBARROLA, E.; LIBERAL, F.; TABOADA, I.; ORTEGA, R. *Web qoe evaluation in multi-agent networks: Validation of itu-t g.1030*. Proceedings of the 2009 Fifth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, USA, 2009.
- [18] ITU-R RECOMMENDATION BT.500-13. *Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures, International Telecommunication Union*. 2012.
- [19] ITU-T G.107. *The E-model, a computational model for use in transmission planning [online]*. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 2005.
- [20] ITU-T P.833. *Methodology for derivation of equipment impairment factors from subjective listening [online]*. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 2001.
- [21] ITU-T P.861. *Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codec [online]*. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 1998.
- [22] ITU-T P.862. *Perceptual evaluation of speech quality (PESQ) [online]*. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 2001.
- [23] ITU-T REC. E.800. *Definitions of terms related to quality of service [online]*. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 2008.
- [24] ITU-T RECOMMENDATION G.1030. *Estimating end-to-end performance in IP networks for data applications, International Telecommunication Union*. 2005.
- [25] ITU-T RECOMMENDATION P.10/G.100 (INCL. AMENDMENT 2). *Vocabulary for performance and quality of service [online]*. <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 2008.

-
- [26] ITU-T RECOMMENDATION P.800. *Methods for subjective determination of transmission quality*, International Telecommunication Union. 1996.
- [27] ITU-T RECOMMENDATION P.910. *Subjective video quality assessment methods for multimedia applications*, International Telecommunication Union. 2008.
- [28] KHAN, A.; LINGFEN S.; IFEACHOR, E.; FAJARDO, JOSE OSCAR; LIBERAL, F. *Video Quality Prediction Model for H.264 Video over UMTS Networks and Their Application in Mobile Video Streaming*. Communications (ICC), 2010 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,5, 23-27 May 2010.
- [29] KHAN, A.; LINGFEN, S.; IFEACHOR, E., *QoE Prediction Model and its Application in Video Quality Adaptation Over UMTS Networks*. Multimedia, IEEE Transactions on , vol.14, no.2, pp.431,442, 2012.
- [30] KHIRMAN, S.; HENRIKSEN, P. *Relationship between quality-of-service and quality-of- experience for public internet service*. In Proceedings of the 3rd Workshop on Passive and Active Measurement, USA, 2002.
- [31] KNESCHKE, J. *Lighttpd. Security, speed, compliance, and flexibility [online]*. URL: <http://www.lighttpd.net/>. 2012.
- [32] KRZANOWSKI, W. J. *Principles of Multivariate Analysis: A User's Perspective (Oxford Statistical Science Series)*. 2012, Oxford University Press, USA; Rev Sub edition (December 28, 2000).
- [33] LEITNER, M.; WOLKERSTORFER, P.; GEVEN, A.; HOLLER, N.; TSCHELIGI, M. *Evaluating a mobile multimedia application in field trials: the cost-benefit of self-report methods*. Mobile Living Labs 09: Methods and Tools for Evaluation in the Wild, 2009.
- [34] LTC - LINUX TRAFFIC CONTROL. *Introduction to Linux Traffic Control. [online]*. <http://tldp.org/HOWTO/Traffic-Control-HOWTO/intro.html>. 2012.
- [35] MATLAB - THE LANGUAGE OF TECHNICAL COMPUTING - MATHWORKS. *Accelerating the pace of engineering and science [online]*. URL: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. February 26, 2002.
- [36] MOOR, K. D.; KETYKO, I.; JOSEPH, W.; DERYCKERE, T.; MAREZ, L. D.; MARTENS, L.; VERLEYE, G. *Proposed framework for evaluating quality of experience in a mobile, testbed-oriented living lab setting*. Mobile Networks and Applications, 2010.

-
- [37] MYSQL; MYSQL DOCUMENTATION: MYSQL REFERENCE MANUALS. *Manual for development releases [online]*. URL: <http://dev.mysql.com/doc/>. 2013.
- [38] Microsoft Corporation. Internet Information Services (IIS). *A flexible & easy to manage web server [online]*. URL: <http://www.iis.net/>. 2012.
- [39] NGINX INC. NGINX WEB SERVER. *High performance Web Server and Load Balancer [online]*. URL: <http://nginx.com/>. 2012.
- [40] NIST INTERNETWORKING TECHNOLOGY GROUP. *NISTNet network emulation package [online]*. URL: <http://snad.ncsl.nist.gov/itg/nistnet/>. 2012.
- [41] NSNAM. *NS-3 Overview [online]*. 2012. URL: <http://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>. 2012.
- [42] NUSSBAUM, L.; RICHARD O. *A comparative study of network link emulators. In Proceedings of the Spring Simulation Multiconference*. San Diego, USA, pp. 1-8, March 2009.
- [43] OPNET TECHNOLOGIES, INC. *OPNET Modeler [online]*. URL: http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler.html. 2012.
- [44] PAPAMILTADIS, K.; ZISIMOPOULOS, H.; GASPARRONI, M.; LIOTTA, A. *User quality of service perception in 3g mobile networks*. Telecommunications Quality of Services: The Business of Success, 2004.
- [45] PHPMYADMIN; *BRINGING MYSQL TO THE WEB. Documentation for the development version [online]*. http://www.phpmyadmin.net/home_page/index.php. 2012.
- [46] RAINER, B.; WALTL, M.; TIMMERER, C. *A web based subjective evaluation platform*. Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2013 Fifth International Workshop on , vol., no., pp.24,25, 3-5 July 2013.
- [47] RAMIK, J. *Statistika. Obchodně podnikatelská fakulta v Karviné*. Slezská univerzita v Opavě, Karviná, 2007.
- [48] REICHL, P., FABINI, J., HAPPENHOFER, M., EGGER, C. *From QoS to QoX: A charging perspective*. In Proceedings of the 18th ITC Specialist Seminar on Quality of Experience. Blekinge: Blekinge Institute of Technology, 2008.
- [49] RIES, M.; RUPP, M. *Technical Recommendation S. 10/07: Source Encoding of High Definition Mobile TV Services*. 2007, Vienna University of Technology.

-
- [50] RIZZO, L. *Dummynet: a simple approach to the evaluation of network protocols*. ACM Computer Communication Review, vol. 27, n. 1, 1997.
- [51] ROUTERS AND WIRELESS. *RouterOS is the operating system of RouterBOARD [online]*. <http://www.mikrotik.com/software.html/>. 2013.
- [52] SALIBA, J.; BERESFORD, A.; IVANOVICH, M.; FITZPATRICK, P. *User-perceived quality of service in wireless data networks*. Personal Ubiquitous Computing, 2005.
- [53] SCHATZ, R.; EGGER, S. *Vienna Surfing - Assessing Mobile Broadband Quality in the Field*. ACM SIGCOMM Workshop on Measurements Up the STack (W-MUST), 2011.
- [54] SCHATZ, R.; EGGER, S.; PLATZER, A. *Poor, Good Enough or Even Better? Bridging the Gap between Acceptability and QoE of Mobile Broadband Data Services*. In Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Communications, 2011.
- [55] SHAIKH, J.; FIEDLER, M.; COLLANGE, D. *Quality of experience from user and network perspectives*. Annals of Telecommunications.
- [56] SHLENS, J. *A tutorial on principal component analysis*. Systems Neurobiology Laboratory, University of California at San Diego 82 (2005).
- [57] SIKHA, B.; EARP, R. *Database Design Using Entity-Relationship Diagrams, Second Edition (Foundations of Database Design)*. D CRC Press, 2011.
- [58] SIX REVISIONS. *Top 10 Mobile Web Development JavaScript Frameworks [online]*. URL: <http://sixrevisions.com/javascript/mobile%20web-development-frameworks/>. 2008.
- [59] SMITH, L. *A tutorial on Principal Components Analysis*. Computer Science. University of Otago, New Zeland, February 26, 2002.
- [60] STROHMEIER, D.; MIKKOLA, M.; RAAKE, A. *The importance of task completion times for modeling web-QoE of consecutive web page requests*. Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2013 Fifth International Workshop on , vol., no., pp.38,39, 3-5 July 2013.
- [61] SUZUMURA, T.; TRENT, S.; TATSUBORI, M.; TOZAWA, A.; ONODERA, T. *Performance Comparison of Web Service Engines in PHP, Java and C, ICWS '08 - IEEE International Conference on Web Services, vol. 1, no. 1, pp. 385-392*. Beijing, China, September 2008.

-
- [62] TATA CONSULTANCY SERVICES; PERFORMANCE ENGINEERING RESEARCH CENTRE. *WANem The Wide Area Network emulator [online]*. URL: http://netcologne.dl.sourceforge.net/project/wanem/Documents/wanemulator_all_about_v2.0.pdf. 2008.
- [63] THE APACHE SOFTWARE FOUNDATION. APACHE HTTP SERVER PROJECT. *What is the Apache HTTP Server Project? [online]*. URL: <http://httpd.apache.org/>. 2012.
- [64] THE JQUERY FOUNDATION. *JQuery Mobile. A Touch-Optimized Web Framework. [online]*. URL: <http://jquerymobile.com/>. 2012.
- [65] THE PHP GROUP. *PHP: Popular general purpose scripting language that is especially suited to web development. [online]*. URL: <http://www.php.net/>. 2012.
- [66] THE PHP GROUP; SSH; USER CONTRIBUTED NOTES. *Secure Shell 2 [online]*. URL: <http://www.php.net/manual/en/book.ssh2.php>. 2013.
- [67] W3C. CSS CURRENT WORK & HOW TO PARTICIPATE. *CSS Specification. [online]*. URL: <http://www.w3.org/Style/CSS/current-work>. 2013.
- [68] W3C. HTML 5.1 NIGHTLY. *A vocabulary and associated APIs for HTML and XHTML [online]*. URL: <http://www.w3.org/html/wg/drafts/html/master/>. 2013.
- [69] WANG, K.; BARKOWSKY, M.; BRUNNSTROM, K.; SJOSTROM, M.; COUSSEAU, R.; LE CALLET, P. *Perceived 3D TV Transmission Quality Assessment: Multi-Laboratory Results Using Absolute Category Rating on Quality of Experience Scale*. IEEE Transactions on Broadcasting. 2012, vol. 58, issue 4, s. 544-557.
- [70] WINE HQ. *Explaining the Wine project. About Wine [online]*. <http://www.winehq.org/about/>. 2013.
- [71] WRESKI, D. *Linux security – And away we spoof!. Bandwidth Control. [online]*. <http://www.linuxsecurity.com/docs/PDF/dsniff-n-mirror.pdf>. 2012.
- [72] XIN YU; HUIFANG CHEN; WENDAO ZHAO; LEI XIE. *No-Reference QoE Prediction Model for Video Streaming Service in 3G Networks*. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2012 8th International Conference on , vol., no., pp.1,4, 21-23.
- [73] XU, J.; XING, L.; PERKIS, A.; JIANG, Y. *On the Properties of Mean Opinion Scores for Quality of Experience Management*. IEEE International Symposium on Multimedia, 2011.

-
- [74] YI CAO; RITZ, C.; RAAD, R. *How much longer to go? The influence of waiting time and progress indicators on quality of experience for mobile visual search applied to print media*. Quality of Multimedia Experience (QoMEX), 2013 Fifth International Workshop on , vol., no., pp.112,117, 3-5 July 2013.

LITERATURA

Seznam publikací autora práce

- [1] HOŠEK, J.; RIES, M.; VAJSAR, P.; NAGY, L.; ANDREEV, S.; GALININA, O.; KOUCHERYAVY, Y.; ŠULC, Z.; HAIS, P.; PENÍŽEK, R. *Predicting User QoE Satisfaction in Current Mobile Networks*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC) 2014. Sydney, Australia: IEEE, 2014. s. 1094-1099. ISBN: 978-1-4799-2004- 4.
- [2] HOŠEK, J.; RIES, M.; VAJSAR, P.; NAGY, L.; ŠULC, Z.; HAIS, P.; PENÍŽEK, R. *Mobile Web QoE Study for Smartphones..* In Proceedings of the 2013 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2013. 1. Atlanta, USA: IEEE, 2013. s. 1162-1166. ISBN: 978-1-4799-2851- 4
- [3] HOŠEK, J.; RIES, M.; VAJSAR, P.; NAGY, L.; ANDREEV, S.; GALININA, O.; KOUCHERYAVY, Y.; ŠULC, Z.; HAIS, P.; PENÍŽEK, R. *Users Happiness in Numbers: Understanding Mobile YouTube Quality Expectations..* In Proceedings of the 37th International Conference on Telecommunication and Signal Processing, TSP 2014. Berlin, Germany: Asszisztencia Szervezo Kft., 2014. s. 28-32. ISBN: 978-80-214-4983- 1.
- [4] RIES, M.; HOŠEK, J.; VAJSAR, P.; NAGY, L. *Souhrnná výzkumná zpráva k HS: Youtube - QoE. 2013..* s. 1-49.
- [5] HOŠEK, J.; MOLNÁR, K.; VAJSAR, P.; JAKÚBEK, P. *Map-based direct position control system for wireless ad-hoc networks..* TELECOMMUNICATION SYSTEMS, 2013, roč. 49, č. 5, s. 1-15. ISSN: 1018- 4864.
- [6] VAJSAR, P.; MAŠEK, P.; HOŠEK, J.; MAKHLOUF, N.; LEU, J. *Design of QoS Model for Mobile Ad-hoc Network..* In Proceedings of the 36th International Conference on Telecommunication and Signal Processing, TSP 2013. Rome, Italy: 2013. s. 111-117. ISBN: 978-1-4799-0403- 7.
- [7] HOŠEK, J.; KOVÁČ, D.; VAJSAR, P.; POTFAY, A. *QoS Support in Routing Protocols for MANET..* In Proceedings of the 36th International Conference on Telecommunication and Signal Processing, TSP 2013. Rome, Italy: Asszisztencia Szervezo Kft., 2013. s. 118-122. ISBN: 978-1-4799-0403- 7.
- [8] NAGY, L.; HOŠEK, J.; VAJSAR, P.; NOVOTNÝ, V. *Impact of Signalling Load on Response Times for Signalling over IMS Core..* In Processing of the 2013 IEEE

Federated Conference on Computer Science and Information Systems - IEEE Fed-
CSIS2013. 1. Krakow, Poland.: Polskie Towarzystwo Informatyczne, 2013. s. 663-
666. ISBN: 978-83-60810-53- 8.

- [9] MAKHLOUF, N.; NAGY, L.; VAJSAR, P. *Prediction of Movement of Wireless Nodes in Mobile Ad-hoc Networks..* In The 4th IEEE Intl' Conference on Cognitive Infocommunicaitons. 2013. s. 115-120. ISBN: 978-1-4799-1544- 6.
- [10] MAKHLOUF, N.; VAJSAR, P. *MAC Protocols for MANET Networks with Directional Antennas..* Conference of Informatics and Management Sciences. Žilina, Slovak Republic: : EDIS - Publishing Institution of the University of Zilina, 2013. s. 301-304. ISBN: 978-80-554-0648- 0.
- [11] MAKHLOUF, N.; VAJSAR, P. *Mac Protocols in Mobile Ad Hoc Networks..* International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems, 2012, roč. 2012, č. 1, s. 1-4. ISSN: 1805- 5443.
- [12] VAJSAR, P.; HOŠEK, J.; MOLNÁR, K.; BARTL, M. *Advanced Trajectory Management Techniques for Mobile Nodes in OPNET Modeler Environment..* In Proceedings of the 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing - TSP' 2012. 1. 2012. s. 348-353. ISBN: 978-1-4673-1116- 8.
- [13] VAJSAR, P.; HOŠEK, J.; BARTL, M.; MORÁVEK, P.; MAKHLOUF, N.; FIGURNY, R. *Implementation of OLSR- based QoS support into MANET..* In Research in Telecommunication Technologies 2012. 2012. s. 1-5. ISBN: 978-80-554-0570- 4.
- [14] VAJSAR, P.; HOŠEK, J.; BARTL, M.; MOLNÁR, K. *Implementation of Mobility Management Methods for MANET..* International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems, 2012, roč. 1, č. 2, s. 1-7. ISSN: 1805- 5443.
- [15] HOŠEK, J.; VAJSAR, P.; FIGURNY, R. *OLSR-based QoS support in Mobile Ad- hoc Networks..* In Advances in Data Networks, Communications, Computers and Materials - Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Data Networks, Communications, Computers (DNCOCO '12). 1. Sliema, Malta: WSEAS Press, 2012. s. 99-104. ISBN: 978-1-61804-118- 0.
- [16] HOŠEK, J.; VAJSAR, P.; RŮČKA, L.; MOLNÁR, K.; DOSTÁL, O. *Network Link Capacity Optimization for Interactive Telemedicine Services..* Elektrovue - Internetový časopis (<http://www.elektrovue.cz>), 2012, roč. 3, č. 2, s. 1-4. ISSN: 1213- 1539.

-
- [17] VAJSAR, P.; ŽOLDOŠ, P. *Aplikácia pre zobrazenie modelu bezdrôtových sietí*. In PROCEEDING OF THE 17TH CONFERENCE STUDENT EEICT 2011 Volume 3. 2011. s. 1-3. ISBN: 978-80-214-4273- 3.
- [18] MOLNÁR, K.; HOŠEK, J.; RŮČKA, L.; VAJSAR, P.; DOSTÁL, O. *Modeling of Link Capacity for Telemedicine Applications*. In The Sixth International Conference on Systems and Networks Communications. IARIA, 2011. s. 206-208. ISBN: 978-0-7695-4145- 7.
- [19] VAJSAR, P.; RŮČKA, L. *Monitoring and management system for wireless sensor networks*. In 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. 1. Szent Ustvan krt. 7, Budapest: Assisztencia Szervezo Kft., 2011. s. 1-6. ISBN: 978-1-4577-1409- 2.
- [20] MORÁVEK, P.; KOMOSNÝ, D.; VAJSAR, P. *Synthetic Coordinate System in Wireless Sensor Networks*. In Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics 2010. 2011. s. 1-6. ISBN: 978-80-248-2330- 0.
- [21] VAJSAR, P.; MORÁVEK, P. *Collecting and processing data from wireless sensor networks*. Elektrotechnika - Internetový časopis (<http://www.elektrotechnika.cz>), 2011, roč. 2, č. 2, s. 1-5. ISSN: 1213- 1539.
- [22] MORÁVEK, P.; KOMOSNÝ, D.; VAJSAR, P.; ŠVÉDA, J.; HANDL, T. *Study of Vivaldi Algorithm in Energy Constraint Networks*. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2011, roč. 9, č. 4, s. 35-42. ISSN: 1336- 1376.
- [23] VAJSAR, P.; MORÁVEK, P. *Solution for wireless sensor network monitoring*. In 6th International Conference on Teleinformatics. 2011. s. 1-4. ISBN: 978-80-214-4231- 3.
- [24] VAJSAR, P. *Wireless Sensor Network Monitoring*. In Proceeding Of the 16th Conference Student EEICT 2010. Volume 3. 2010. s. 1-3.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ACR Absolute Category Rating

AKC Akceptabilita

CDMA Code Division Multiple Access

CDS Central Database System

CGI Common Gateway Interface

ČTU Český telekomunikační úřad

DCR Degradation Category Rating

DMOS Degradation Mean Opinion Score

DSIS Double Stimulus Impairment Scale

EDGE Enhanced Data Rates for GSM Evolution

GSM Global System for Mobile Communications

HSDPA High Speed Download Packet Access

HSPA+ High Speed Packet Access Enhanced

HSUPA High Speed Upload Packet Access

IP Internet Protocol

ITU-T International Telecommunication Union - Telecommunication

LAN Local Area Network

LTC Linux Traffic Control

LTE Long Term Evolution

MOS Mean Opinion Score

PCA Principal Component Analysis

PC Pair Comparison

PER Packet Error Rate

PESQ Perceptual Evaluation of Speech Quality

PSNR Peak Signal to Noise Ratio

PSQM Perceptual Speech Quality Measure

QoE Quality of Experience

QoS Quality of Service

SIM Subscriber Identity Module

SSL Secure Sockets Layer

SSM Single Stimulus Method

TAC TiMo Assessment Centre

UMTS Universal Mobile Telecommunication System

WAN Wide Area Network

SEZNAM PŘÍLOH

A	Seznam všech kombinací dílčích testů	117
B	Doplňující grafy zobrazující závislosti konkrétního obsahu na ostatních parametrech sítě	118
	B.1 Hodnocení na notebooku	118
	B.2 Hodnocení na mobilním zařízení	119
C	Vyhodnocení závislosti mezi akceptabilitou a kvalitou	124
D	Modely pro predikci MOS a akceptability	128

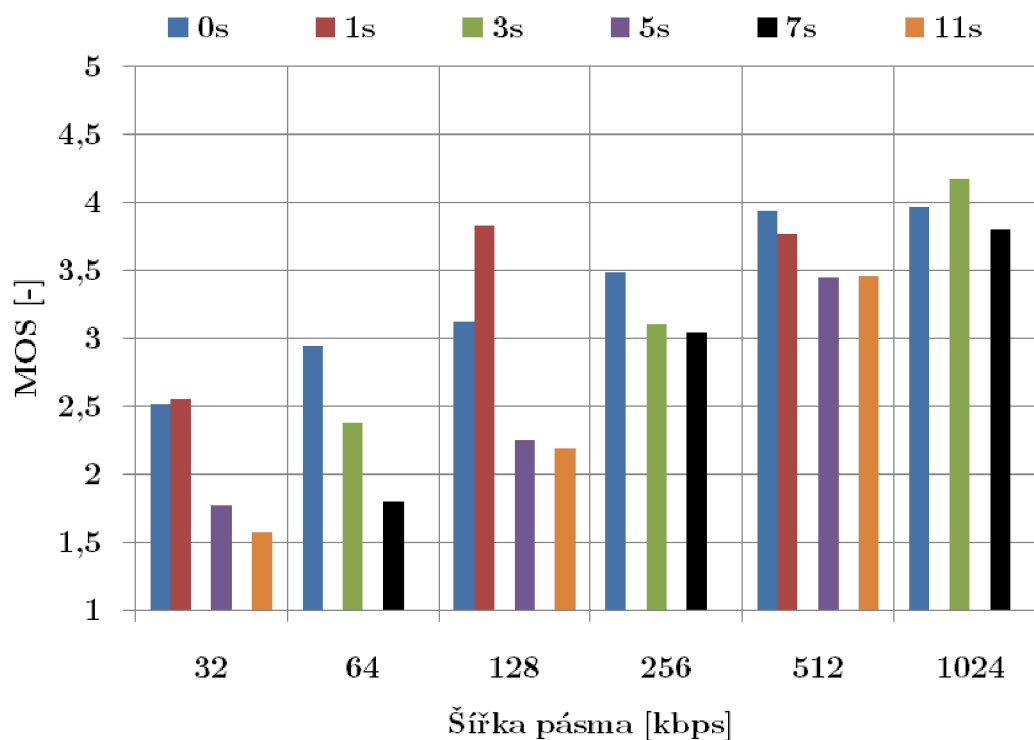
A SEZNAM VŠECH KOMBINACÍ DÍLČÍCH TESTŮ

Tab. A.1: Seznam testů

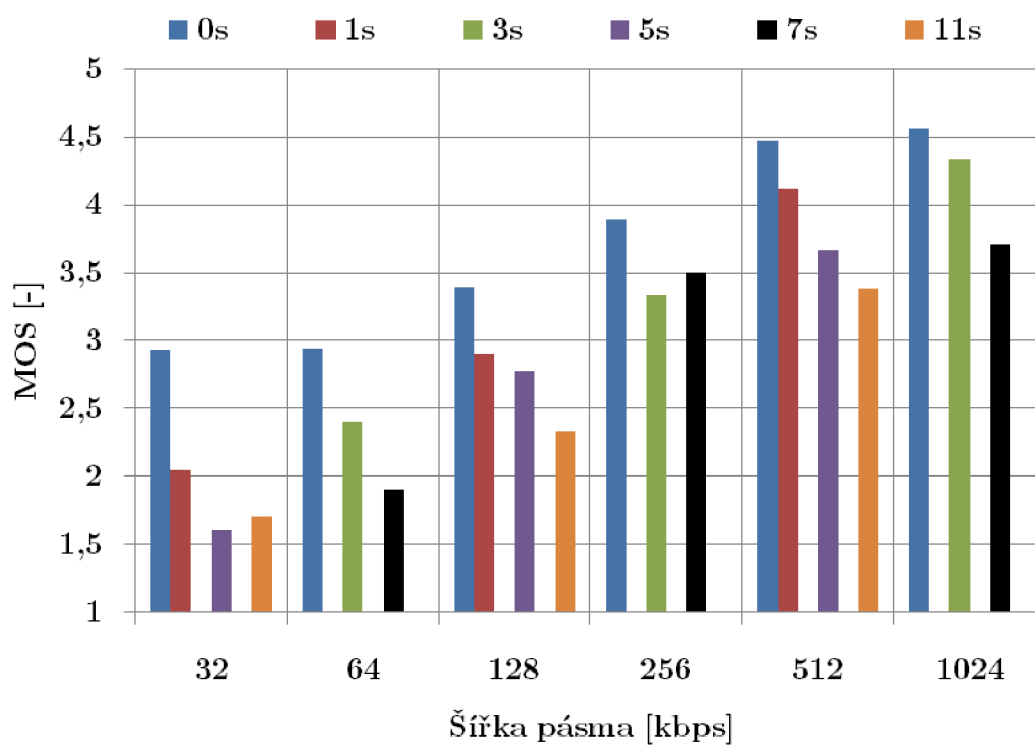
idnes_32kb_0s	aukro_32kb_0s	fb_32kb_0s
idnes_32kb_1s	aukro_32kb_1s	fb_32kb_1s
idnes_32kb_5s	aukro_32kb_5s	fb_32kb_5s
idnes_32kb_11s	aukro_32kb_11s	fb_32kb_11s
idnes_64kb_0s	aukro_64kb_0s	fb_64kb_0s
idnes_64kb_3s	aukro_64kb_3s	fb_64kb_3s
idnes_64kb_7s	aukro_64kb_7s	fb_64kb_7s
idnes_64kb_error	aukro_64kb_error	fb_64kb_error
idnes_128kb_0s	aukro_128kb_0s	fb_128kb_0s
idnes_128kb_1s	aukro_128kb_1s	fb_128kb_1s
idnes_128kb_5s	aukro_128kb_5s	fb_128kb_5s
idnes_128kb_11s	aukro_128kb_11s	fb_128kb_11s
idnes_128kb_error	aukro_128kb_error	fb_128kb_error
idnes_256kb_0s	aukro_256kb_0s	fb_256kb_0s
idnes_256kb_3s	aukro_256kb_3s	fb_256kb_3s
idnes_256kb_7s	aukro_256kb_7s	fb_256kb_7s
idnes_512kb_0s	aukro_512kb_0s	fb_512kb_0s
idnes_512kb_1s	aukro_512kb_1s	fb_512kb_1s
idnes_512kb_5s	aukro_512kb_5s	fb_512kb_5s
idnes_512kb_Ns	aukro_512kb_Ns	fb_512kb_Ns
idnes_1024kb_0s	aukro_1024kb_0s	fb_1024kb_0s
idnes_1024kb_3s	aukro_1024kb_3s	fb_1024kb_3s
idnes_1024kb_7s	aukro_1024kb_7s	fb_1024kb_7s
idnes_1024kb_Ns	aukro_1024kb_Ns	fb_1024kb_Ns

B DOPLŇUJÍCÍ GRAFY ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOSTI KONKRÉTNÍHO OBSAHU NA OSTATNÍCH PARAMETRECH SÍTĚ

B.1 Hodnocení na notebooku

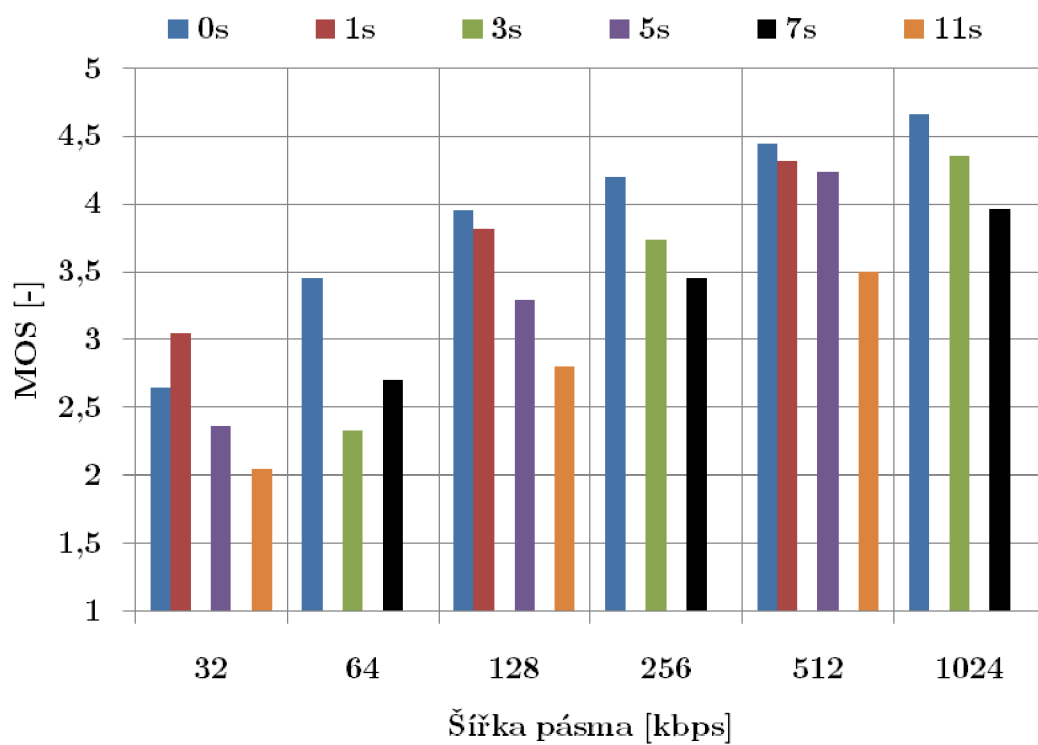


Obr. B.1: Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "zpravodajství"(idnes.cz).

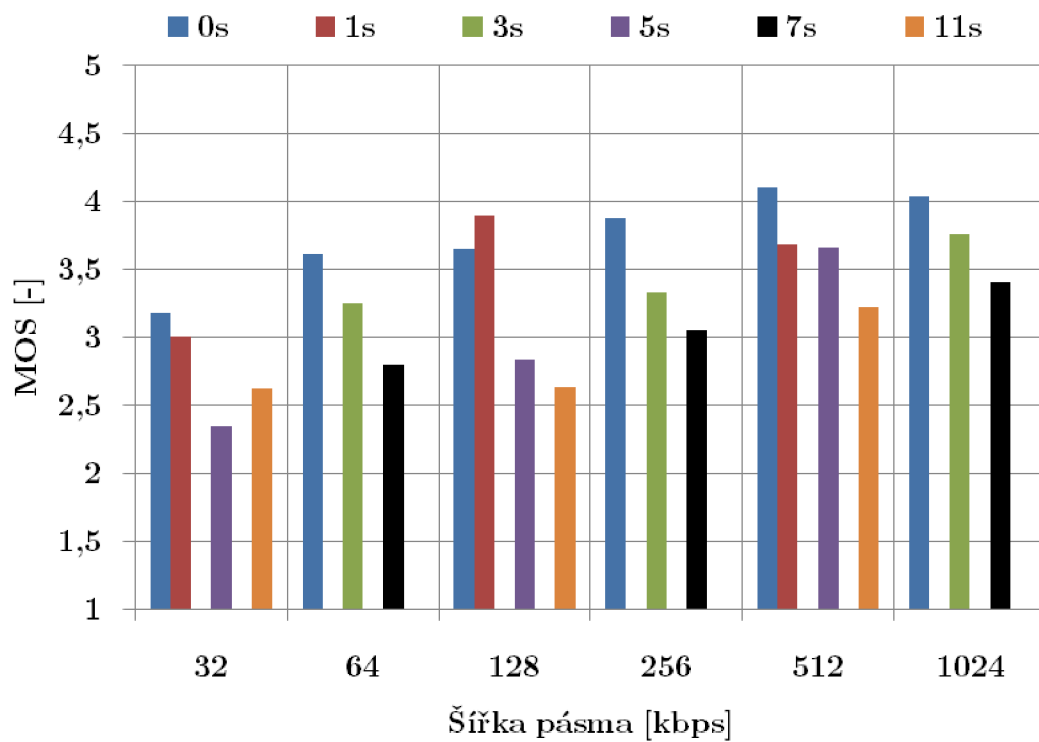


Obr. B.2: Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "sociální sítě"(facebook.com).

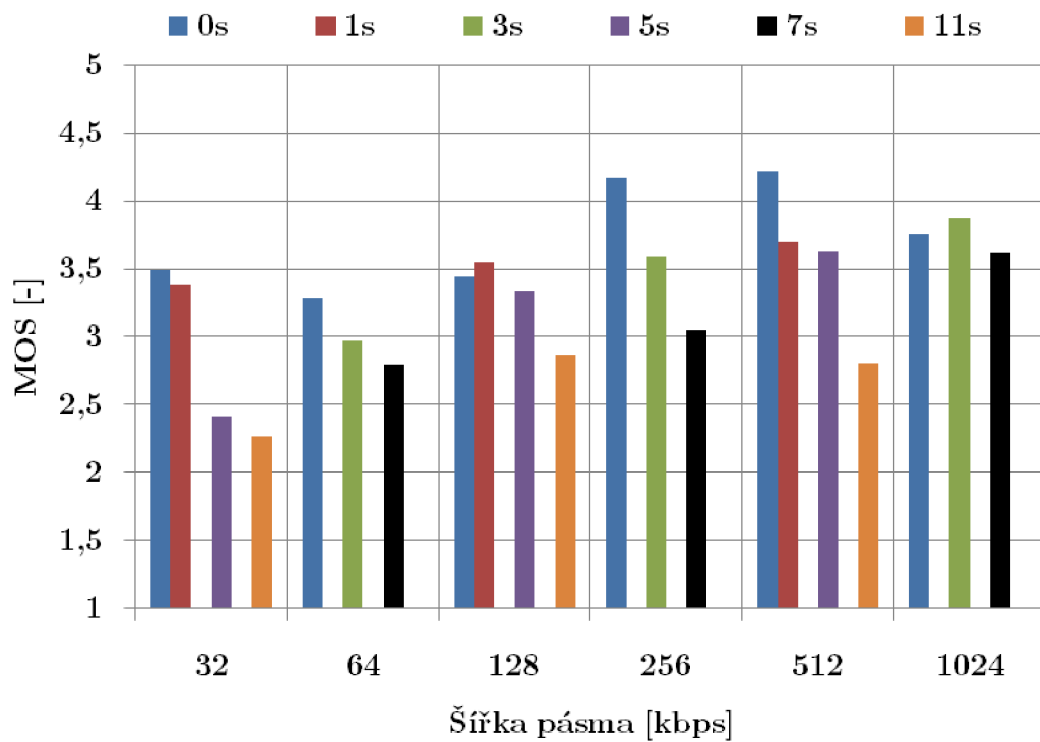
B.2 Hodnocení na mobilním zařízení



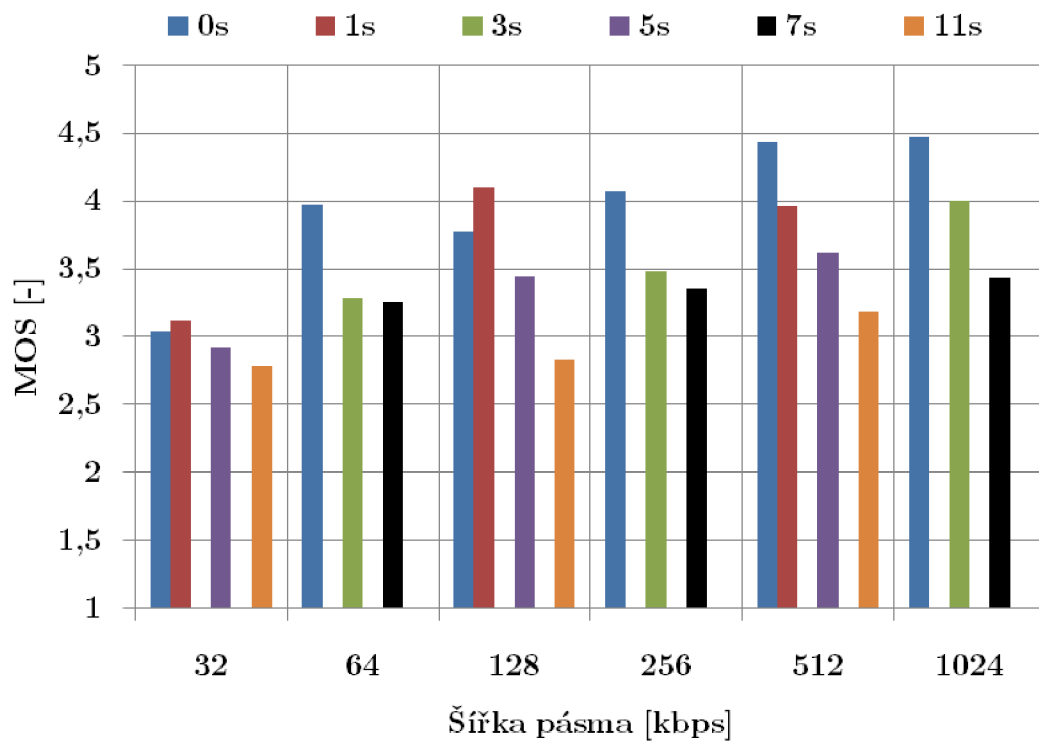
Obr. B.3: Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "nakupování"(aukro.cz).



Obr. B.4: Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "zpravodajství"(idnes.cz).

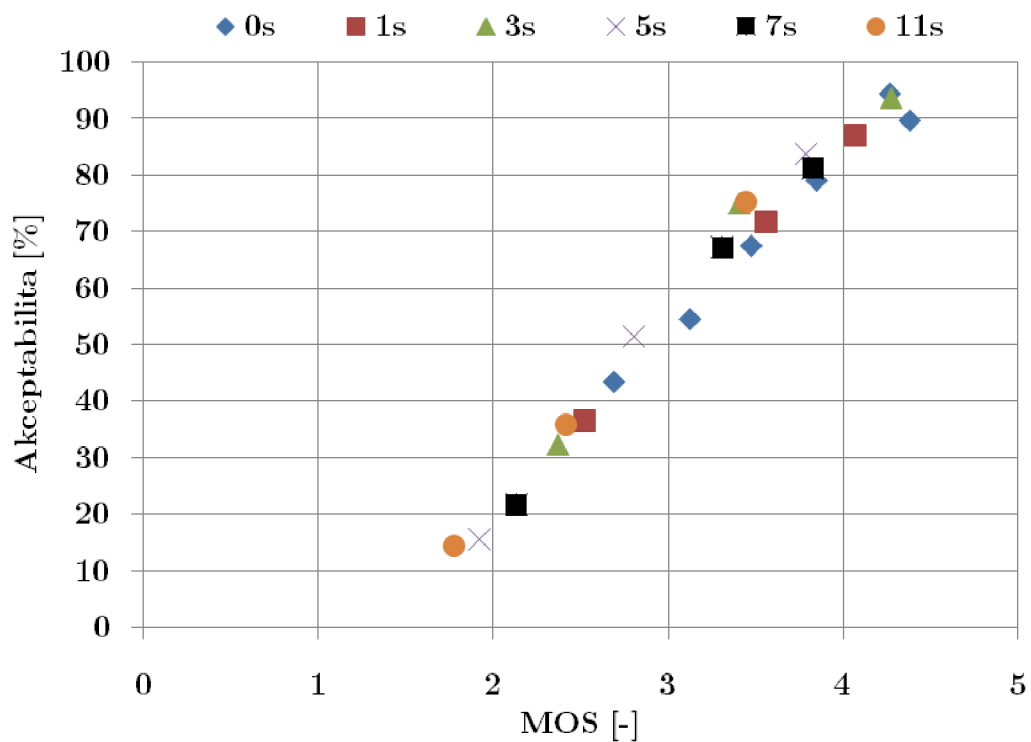


Obr. B.5: Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "sociální sítě"(facebook.com).

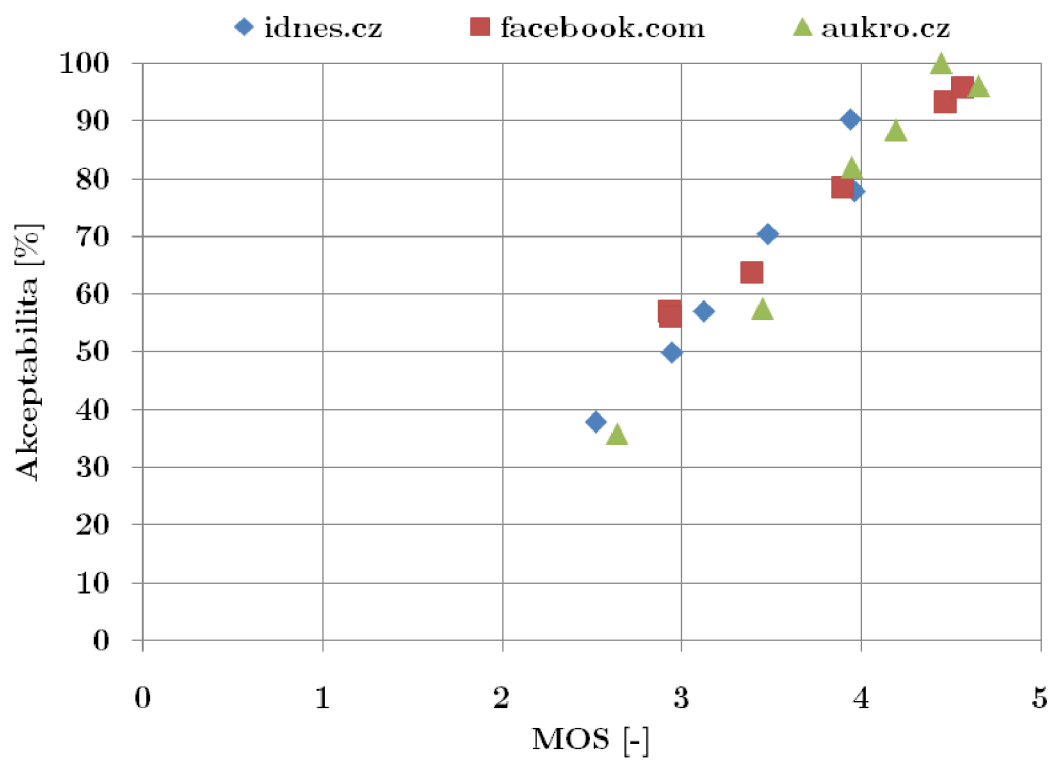


Obr. B.6: Hodnocení kvality pro typ webového obsahu "nakupování"(aukro.cz).

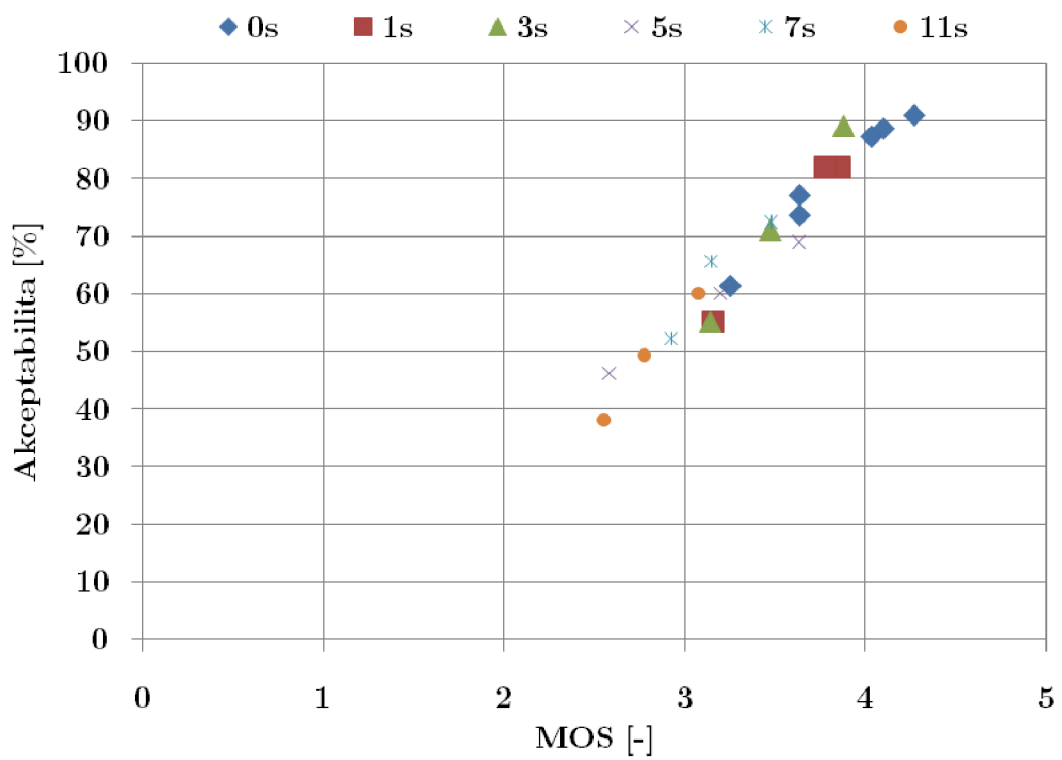
C VYHODNOCENÍ ZÁVISLOSTI MEZI AKCEPTABILITOU A KVALITOU



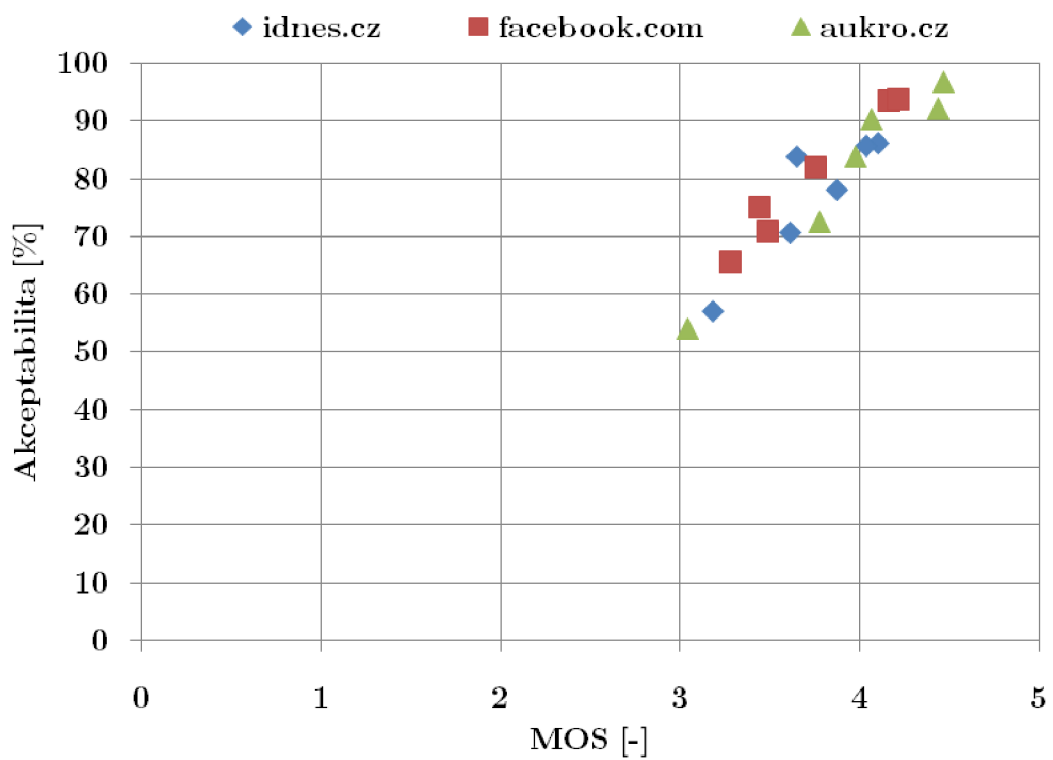
Obr. C.1: Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro notebook (různá počáteční zpoždění).



Obr. C.2: Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro notebook (různý webový obsah).

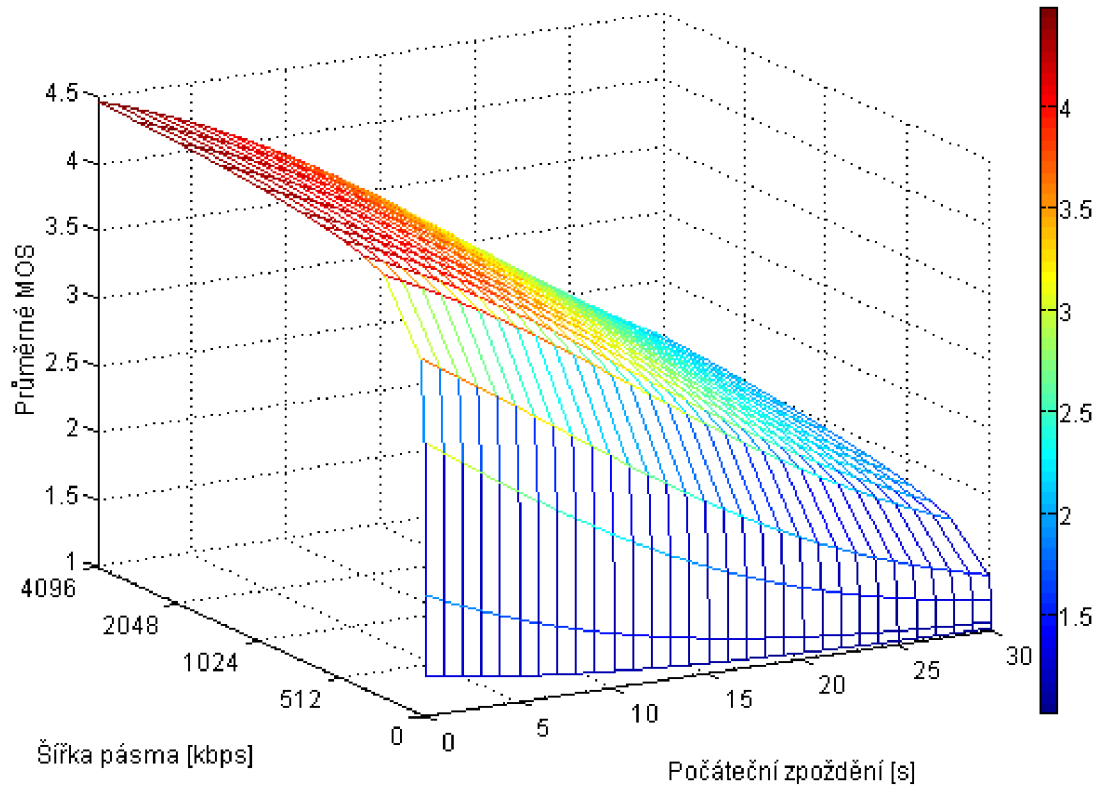


Obr. C.3: Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro mobilní zařízení (různá počáteční zpoždění).

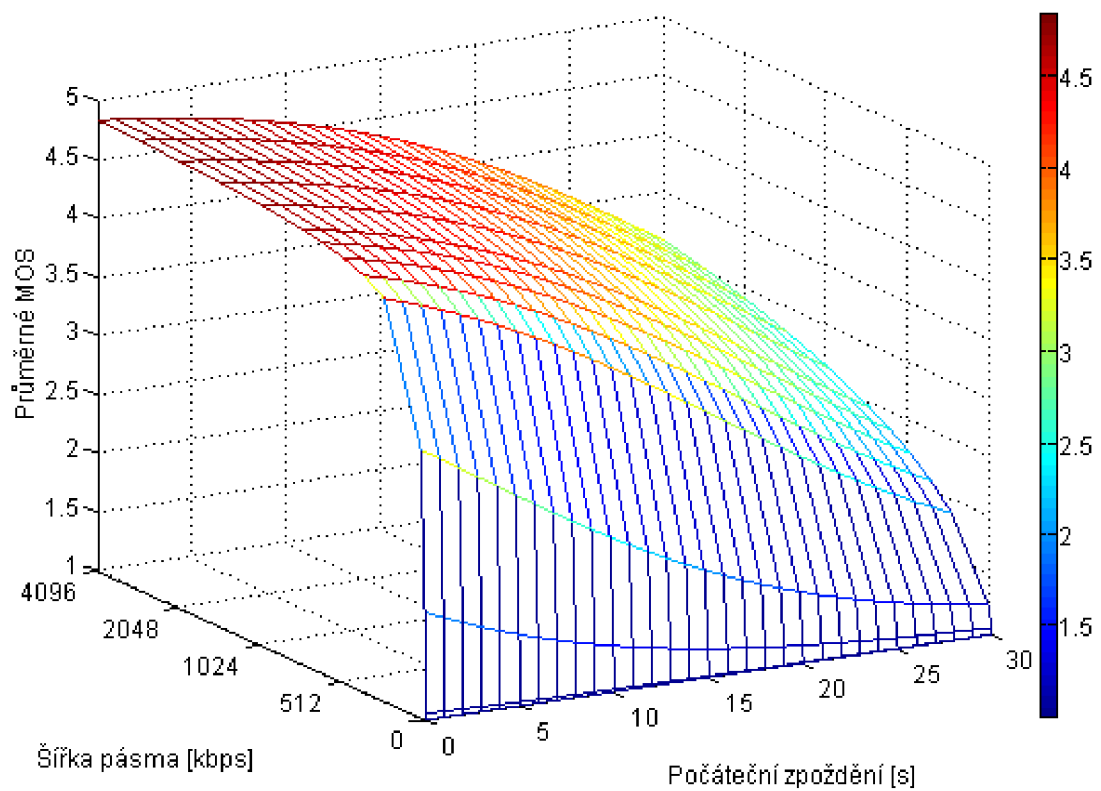


Obr. C.4: Celkové hodnocení kvality vs akceptability pro mobilní zařízení (různý webový obsah).

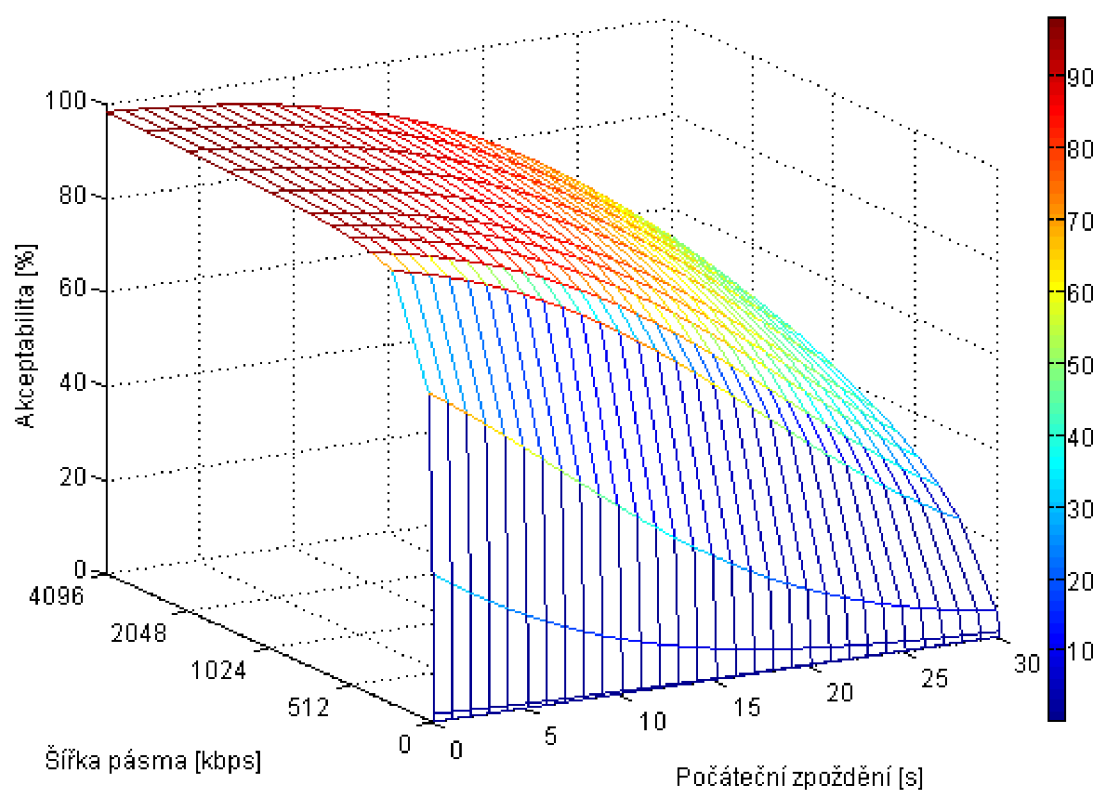
D MODELY PRO PREDIKCI MOS A AKCEPTABILITY



Obr. D.1: Model pro predikci MOS (mobilní zařízení).



Obr. D.2: Model pro predikci MOS (notebook).



Obr. D.3: Model pro predikci celkové akceptability.