

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra telekomunikační techniky



## **Algoritmy pro řízení sítě a optimalizace propustnosti**

Disertační práce

*Ing. Ondřej Vondrouš*

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Telekomunikační technika

Praha, srpen 2018

**Školitel:**

Ing. Jaromír Hrad, Ph.D.  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra telekomunikační techniky  
Technická 2  
166 27 Praha 6  
Česká republika

Copyright © 2018 Ing. Ondřej Vondrouš

# Abstrakt a vlastní přínos

Tato práce se zabývá návrhem optimalizačních postupů jejichž účelem je zlepšení kontinuity datových přenosů a jejich udržitelnosti v náročných podmínkách úzkopásmových sítí. Představuje nový přístup k optimalizacím síťových přenosů tak, aby byla zvýšená šance, že datový přenos za ztížených podmínek bude dokončen, a tím bude dosaženo v konečném důsledku i lepšího využití síťových prostředků, protože nebude nutné datový přenos opakovat.

V rámci předložené práce je představena metoda analýzy paketových vzdáleností IPGA a nová metrika TOM sloužící pro optimalizaci datových přenosů. Rovněž je představen algoritmus pro paralelní zpracování a vyhodnocení naměřených dat, který byl speciálně sestavený za účelem optimalizací přenosů v sítích s omezenou propustností. Práce rovněž obsahuje rozsáhlé ověření funkčnosti představené metriky TOM včetně porovnání s metrikami, které jsou založeny na Jain's fairness indexu.

Hlavní přínosy této doktorské práce lze shrnout následovně:

- Provedení rešerše a analýzy v oblasti testování sítí, návrhu síťových protokolů a optimalizačních postupů, a to především se zaměřením na úzkopásmové sítě.
- Návrh vhodné analýzy na základě rozestupů jednotlivých paketů v analyzované komunikaci (IPGA).
- Návrh nové metriky TOM založené na analýze paketových rozestupů IPGA.
- Sestavení algoritmu pro využití analýzy IPGA a metriky TOM pro optimalizaci datových přenosů v rámci úzkopásmových sítí.
- Ověření výše zmíněných postupů spolu s rozbořením silných a slabých stránek včetně představení možností dalšího rozvoje zkoumané problematiky.

**Klíčová slova:** úzkopásmové sítě, protokol TCP, analýza paketových vzdáleností, optimalizační metrika, kontinuita přenosů, udržitelnost spojení.

# Abstract and contributions

This work deals with design of algorithms for optimization of traffic flow continuity and improving the possibility of traffic flow sustainability called Transmission Optimization Metric (TOM). The work is mainly focused on the area of harsh transmission conditions in narrow-band networks. This work presents new approach to optimization of network transmissions, in a way that directly improves the possibility of traffic flow sustainability and helps to minimize packet gaps. Finally, it also has impact on better resource allocation as transmissions are finished in fewer attempts.

This work also present Inter-Packet Gap Analysis (IPGA) as the method for computing packet distances and further packet classification for TOM. The presented TOM metric is designed for optimization under wide range of conditions. The algorithm for TOM deployment in narrow-band networks with parallel data processing is also presented. Variety of tests, including comparison with current metrics and approaches, is presented showing working deployments of the presented approaches.

The main contributions of this doctoral thesis are as follows:

- Analysis of current approaches in the area of optimization and stress testing of communication in narrow-band networks.
- Design of a new IPGA analysis based on observation of packet gaps.
- Design of a new TOM metric based on IPGA analysis.
- Design of an algorithm for optimization of narrow-band networks which utilizes the IPGA analysis and the TOM metric in parallel computation environment.
- Verification of the proposed algorithms with further discussion about strong and weak points and possible future improvements.

**Keywords:** narrow-band networks, TCP protocol, Inter-Packet Gap Analysis, Transmission Optimization Metric, transmission continuity, transmission sustainability.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení svého školitele Ing. Jaromíra Hrada, Ph.D.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady a zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

# Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval své manželce Janě a dcerám Agátě a Lauře za velkou míru trpělivosti, kterou prokázaly během mého studia a během realizace disertační práce. Za odborné vedení bych rád poděkoval svému školiteli Ing. Jaromíru Hradovi, Ph.D.. Rovněž bych rád poděkoval všem spolupracovníkům na katedře telekomunikační techniky, Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze. A jmenovitě rovněž mým kolegům Ing. Zbyňku Kocurovi, Ph.D. a Ing. Radku Maříkovi, CSc. za věcné připomínky a cenné rady.

# Obsah

<b>Abstrakt</b>	<b>iii</b>
<b>Poděkování</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>xi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xiv</b>
<b>Seznam symbolů a zkratek</b>	<b>xv</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Motivace . . . . .	2
1.2 Návaznost na předchozí práci a výsledky . . . . .	3
1.3 Struktura práce . . . . .	4
<b>2 Současný stav problematiky</b>	<b>5</b>
2.1 Úzkopásmové sítě . . . . .	6
2.2 Spojově orientované protokoly . . . . .	8
2.2.1 Řízení komunikace protokolu TCP . . . . .	9
2.2.1.1 Pomalý start (Slow start) . . . . .	9
2.2.1.2 Předcházení a řízení zahlcení . . . . .	10
2.2.1.3 Rychlé přeposlání a rychlé zotavení . . . . .	12
2.2.2 Další algoritmy protokolu TCP . . . . .	12
2.2.2.1 Nagleho algoritmus . . . . .	12
2.2.2.2 Opožděné zasílání potvrzení (Delayed ACKs) . . . . .	12
2.2.2.3 Algoritmus exponenciálního ustupování (Exponential backoff) . . . . .	13

2.2.3	Specifické varianty protokolu TCP . . . . .	13
2.2.4	Některá rizika při komunikaci pomocí protokolu TCP . . . . .	13
2.3	Doporučení IETF RFC v oblasti řešené problematiky . . . . .	15
2.3.1	RFC 2330 a RFC 7312 . . . . .	15
2.3.2	RFC 2544 . . . . .	16
2.3.3	RFC 6349 . . . . .	16
2.3.4	RFC 7799 . . . . .	16
2.4	Doporučení ITU-T Y.15xx v oblasti řešené problematiky . . . . .	17
2.4.1	ITU-T Y.1540 . . . . .	17
2.4.2	ITU-T Y.1545.1 . . . . .	17
2.4.3	ITU-T Y.1560 . . . . .	18
2.4.3.1	Datová komunikační propustnost . . . . .	18
2.4.3.2	Celková komunikační propustnost . . . . .	18
2.4.4	ITU-T Y.1562 . . . . .	19
2.4.5	ITU-T Y.1563 . . . . .	19
2.4.6	ITU-T Y.1564 . . . . .	19
2.5	Metriky založené na férovém přístupu k prostředkům . . . . .	20
2.5.1	Jain's Fairness Index . . . . .	21
2.5.2	Ostatní metriky . . . . .	25
2.6	Metriky založené na sledování stavových informací protokolu TCP . . . . .	25
2.6.1	Metrika CER . . . . .	26
2.6.2	Metrika TER . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Vymezení cílů</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>Zvolené metody a použité prostředky</b>	<b>32</b>
4.1	Modelování a simulace sítí . . . . .	34
4.1.1	Prostředí Omnet++/INET . . . . .	34
4.1.2	Základní testovací scénář DumbBell (FIFO) . . . . .	35
4.1.3	Testovací scénář CSMA/CA . . . . .	36
4.1.4	Testovací scénář TDMA . . . . .	37
4.2	Význam paralelních simulací . . . . .	38
4.3	Modelování a simulace síťového provozu . . . . .	39
4.3.1	IEC 60870-5-104 . . . . .	39



4.3.2	Dual . . . . .	40
4.3.3	ZigZag . . . . .	42
4.4	Zpracování výsledků simulací . . . . .	43
4.4.1	Krabicový diagram . . . . .	43
4.4.2	Ověření míry spolehlivosti výsledků . . . . .	44
<b>5</b>	<b>Výsledky disertace a nové poznatky</b>	<b>46</b>
5.1	Vliv charakteru provozu . . . . .	47
5.1.1	Shrnutí dílčích výsledků . . . . .	50
5.2	Paketová analýza – IPGA . . . . .	52
5.2.1	Analýza v rovině vzdáleností paketů . . . . .	52
5.2.2	Analýza v rovině časových odstupů paketů . . . . .	53
5.2.3	Základní možnosti využití analýzy IPGA . . . . .	53
5.2.4	Shrnutí dílčích výsledků . . . . .	60
5.3	Optimalizační metrika – TOM . . . . .	61
5.3.1	Definice metriky TOM . . . . .	61
5.3.2	Vlastnosti normalizované metriky TOM . . . . .	62
5.3.3	Ohraničení metriky shora a zdola . . . . .	62
5.3.4	Metodika použití metriky TOM . . . . .	64
5.3.5	Základní ověření funkčnosti metriky TOM . . . . .	66
5.3.5.1	Testovací scénář DumbBell (FIFO) . . . . .	66
5.3.5.2	Testovací scénář CSMA/CA . . . . .	68
5.3.5.3	Testovací scénář TDMA . . . . .	72
5.3.6	Shrnutí dílčích výsledků . . . . .	74
5.4	Problematika parametrizace TOM . . . . .	75
5.4.1	Závislost metriky TOM na specifických podmínkách síťového přenosu . . . . .	77
5.4.1.1	Model s topologií DumbBell . . . . .	78
5.4.1.2	Model systému CSMA . . . . .	82
5.4.1.3	Model systému TDMA . . . . .	87
5.4.2	Shrnutí dílčích výsledků . . . . .	91
5.5	Ověření metriky TOM . . . . .	92
5.5.1	Porovnání metriky TOM s JFI z pohledu výstupů . . . . .	92
5.5.2	Vyhodnocení náročnosti výpočtu metriky TOM . . . . .	95

5.5.3	Shrnutí dílčích výsledků . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Shrnutí poznatků a závěry</b>	<b>101</b>
6.1	Vyhodnocení vlivu charakteru provozu . . . . .	101
6.2	Vyhodnocení přínosu a použitelnosti TOM . . . . .	102
6.3	Splnění vytyčených cílů disertace . . . . .	103
6.4	Závěry pro praxi . . . . .	105
6.5	Možnosti dalšího rozvoje problematiky . . . . .	105
	<b>Literatura</b>	<b>107</b>
	<b>Standardy</b>	<b>111</b>
	<b>Vybrané publikace autora vztahující se k disertaci</b>	<b>114</b>
	Publikace v impaktovaných časopisech . . . . .	114
	Publikace v recenzovaných časopisech . . . . .	114
	Další publikace excerpované WoS . . . . .	115
	<b>Další publikace autora</b>	<b>116</b>
	Publikace v recenzovaných časopisech . . . . .	116
<b>A</b>	<b>Korelace TOM a JFI</b>	<b>117</b>

# Seznam obrázků

2.1	Reakce protokolu TCP na řízení - propustnost. . . . .	11
2.2	Reakce protokolu TCP na řízení - zpoždění. . . . .	11
2.3	Zpoždění ve vztahu ke světové poloze (vzdálenosti) komunikujících bodů. . . . .	14
2.4	Ukázka výstupu metriky založené na JFI (interval 600 s) pro analýzu dat scénáře CSMA/CA. . . . .	23
2.5	Vliv intervalu na hodnotu JFI metriky při analýze dat (profil Dual) scénáře CSMA/CA. . . . .	24
2.6	TCP spojení vs. TCP přenosy. . . . .	26
2.7	Ukázka reálného grafu analýzy založené na sledování stavových informací protokolu TCP. . . . .	27
2.8	Ukázka výstupu metriky CER při analýze dat (profil Dual) scénáře CSMA/CA. . . . .	28
2.9	Ukázka výstupu metriky TER při analýze dat (profil Dual) scénáře CSMA/CA. . . . .	29
4.1	Základní topologie typu DumbBell (FIFO). . . . .	35
4.2	Topologie založená na modelu CSMA/CA modemu. . . . .	37
4.3	Topologie založená na modelu TDMA modemu. . . . .	37
4.4	Sekvenční diagram - profil IEC 60870-5-104. . . . .	40
4.5	Časový diagram - profil IEC 60870-5-104. . . . .	40
4.6	Sekvenční diagram - profil Dual. . . . .	41
4.7	Časový diagram - profil Dual. . . . .	41
4.8	Sekvenční diagram - profil ZigZag. . . . .	42
4.9	Časový diagram - profil ZigZag. . . . .	43
4.10	Krabicový diagram. . . . .	44

5.1	JFI, interval 600 s, CSMA/CA, profil Dual. . . . .	49
5.2	JFI, interval 600 s, CSMA/CA, profil ZigZag. . . . .	50
5.3	JFI, interval 600 s, CSMA/CA, profil IEC 60870-5-104. . . . .	51
5.4	JFI, interval 1800 s, CSMA/CA, profil IEC 60870-5-104. . . . .	51
5.5	Analýza IPGA v rovině vzdáleností paketů. . . . .	52
5.6	Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů. . . . .	53
5.7	Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, CSMA/CA, profil Dual. . . . .	54
5.8	Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, CSMA/CA, profil Dual. . . . .	54
5.9	Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, CSMA/CA, profil Dual, EWMA. . . . .	56
5.10	Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, CSMA/CA, profil Dual, EWMA. . . . .	56
5.11	Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, TDMA. . . . .	57
5.12	Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, TDMA. . . . .	58
5.13	Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, TDMA, EWMA. . . . .	59
5.14	Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, TDMA, EWMA. . . . .	59
5.15	Nejlepší možný případ. . . . .	64
5.16	Nejhorsí možný případ. . . . .	64
5.17	Vývojový diagram procesu analýzy a vyhodnocení výsledků dle TOM a IPGA. . . . .	65
5.18	JFI interval 300 s, DumbBell (FIFO). . . . .	67
5.19	TOM limit 20 s, DumbBell (FIFO). . . . .	68
5.20	JFI, interval 300 s, CSMA/CA, profil Dual. . . . .	70
5.21	TOM, limit 120 s, CSMA/CA, profil Dual. . . . .	70
5.22	JFI, interval 300 s, CSMA/CA, profil ZigZag. . . . .	71
5.23	TOM, limit 120 s, CSMA/CA, profil ZigZag. . . . .	71
5.24	JFI, interval 60 s, TDMA. . . . .	72
5.25	TOM, limit 10 s, TDMA. . . . .	73
5.26	Ukázka optimalizačních průběhů. . . . .	77
5.27	Ukázka optimalizačních křivek (kvantil 0,92 – 0,999), DumbBell (FIFO). . . . .	78
5.28	Střední hodnoty pro kvantil 0,99 (označeno zelenou barvou), DumbBell (FIFO). . . . .	80
5.29	Ukázka optimalizačních křivek (kvantil 0,92 – 0,999, CSMA/CA, profil Dual). . . . .	82

5.30	Ukázka optimalizační křivky (kvantil 0,96), CSMA/CA, profil Dual. . .	83
5.31	Ukázka optimalizační křivky (kvantil 0,99), CSMA/CA, profil Dual. . .	84
5.32	Ukázka optimalizační křivky (kvantil 0,999), CSMA/CA, profil Dual. . .	85
5.33	Střední hodnoty pro kvantil 0,99 (označeno zelenou barvou), CSMA/CA, profil Dual. . . . .	86
5.34	Ukázka optimalizačních křivek (kvantil 0,6 - 0,999), TDMA. . . . .	88
5.35	Střední hodnoty pro kvantil 0,99 (označeno zelenou barvou), TDMA . .	89
5.36	Korelace výstupů metrik JFI (300 s) a TOM (120 s) pro scénář CSMA/CA a profil komunikace Dual. . . . .	93
5.37	Korelace výstupů metrik JFI (300 s) a TOM (120 s) pro scénář CSMA/CA a profil komunikace ZigZag. . . . .	94
A.1	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 1/4). . . . .	118
A.2	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 2/4). . . . .	119
A.3	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 3/4). . . . .	120
A.4	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 4/4). . . . .	121
A.5	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 1/4). . . . .	122
A.6	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 2/4). . . . .	123
A.7	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 3/4). . . . .	124
A.8	Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 4/4). . . . .	125

# Seznam tabulek

4.1	Nárůst celkového počtu simulačních běhů a celkového času výpočtu. . .	39
5.1	Přepoččet kvantilů na konkrétní časové vzdálenosti, DumbBell (FIFO). .	79
5.2	Intervaly spolehlivosti scénáře DumbBell (FIFO) pro kvantil 0,99 (38,97 s) a hladině významnosti 95%. . . . .	81
5.3	Přepoččet kvantilů na konkrétní časové vzdálenosti, CSMA/CA, profil Dual. . . . .	82
5.4	Intervaly spolehlivosti scénáře CSMA/CA pro kvantil 0,99 (40,87 s) a hladině významnosti 95%. . . . .	87
5.5	Přepoččet kvantilů na konkrétní časové rozdíly paketů, TDMA. . . . .	89
5.6	Intervaly spolehlivosti scénáře TDMA pro kvantil 0,99 (11,38 s) a hladině významnosti 95%. . . . .	90

# Seznam symbolů a zkratek

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam symbolu
$f(k)$	hodnoticí funkce paketů
$f_g(k)$	hodnoticí funkce na základě vzdálenosti paketů
$f_t(k)$	hodnoticí funkce na základě časového odstupu paketů
$k$	index paketu (sekvenční číslo paketu)
$s$	výběrová směrodatná odchylka
$s^2$	výběrový rozptyl
$t_{1-\alpha}$	$\alpha$ kvantil studentova rozdělení
$x$	sledovaná veličina
$x_i$	propustnost datového toku $i$
$\bar{x}$	střední hodnota sledované veličiny
$C_{bad}$	počet neúspěšně dokončených spojení
$C_{good}$	počet úspěšně dokončených spojení
$CI$	interval spolehlivosti
$GA$	mezní absolutní vzdálenost paketů
$J$	celkový počet intervalů
$W$	malá konstanta ( $W \leq 10$ )
$LB$	mezní absolutní vzdálenost paketů

Pokračování na následující straně ...

... pokračování z předchozí strany

Symbol	Význam symbolu
$M$	celkový počet paketů
$M_i$	celkový počet paketů datového toku
$N$	velikost výběru
$NF$	celkový počet datových toků
$O_i$	optimální hodnota datového toku $i$
$P$	poměr požadovaného intervalu spolehlivosti ku směrodatné odchylce
$RI$	požadovaný interval spolehlivosti
$S$	mezní časová vzdálenost paketů
$T_{bad}$	počet neúspěšně dokončených přenosů
$T_{good}$	počet úspěšně dokončených přenosů
$T_i$	měřená hodnota datového toku $i$
$TM$	mezní časová vzdálenost paketů
$X_i$	normalizovaná propustnost datového toku $i$
$X_{ij}$	propustnost datového toku v intervalu $j$



## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam zkratky
<b>3G</b>	Third Generation of Mobile Telecommunications Technology
<b>4G</b>	Fourth Generation of Mobile Telecommunications Technology
<b>5G</b>	Fifth Generation of Mobile Telecommunications Technology
<b>ACK</b>	ACKnowledgement (TCP ACK)
<b>AIMD</b>	Additive Increase and Multiplicative Decrease
<b>AMR</b>	Automated Meter Reading
<b>AS</b>	Autonomous System
<b>BIC</b>	Binary Increase Congestion control
<b>BBR</b>	Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>CER</b>	Connection Error Rate
<b>CoSEM</b>	Companion Specification for Energy Metering
<b>CSMA</b>	Carrier Sense Multiple Access
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance
<b>CSMA/CD</b>	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
<b>CWND</b>	TCP Congestion Window
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>DLMS</b>	Device Language Message specification
<b>DNS</b>	Domain Name System
<b>EDGE</b>	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
<b>ERI</b>	Endpoint Reuse Interval
<b>EWMA</b>	Exponentially Weighted Moving Average
<b>FIFO</b>	First-In First-Out

Pokračování na následující straně ...

... pokračování z předchozí strany

Zkratka	Význam zkratky
<b>FIN</b>	Finish (TCP FIN)
<b>HW</b>	Hardware
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IQR</b>	Inter Quartile Range
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IPGA</b>	Inter Packet Gap Analysis
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ISO/OSI</b>	ISO / Open System Interconnection
<b>ISP</b>	Internet Service Provider
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>JFI</b>	Jain's Fairness Index
<b>LoRa</b>	Long Range
<b>LoraWAN</b>	Long Range Wide Area Network
<b>MSS</b>	Maximum Segment Size
<b>MTU</b>	Maximum Transfer Unit
<b>NB-IoT</b>	Narrow Band - IoT
<b>PCAP</b>	Packet Capture
<b>PER</b>	Packet Error Rate
<b>PPR</b>	Proportional Rate Reduction
<b>RFC</b>	Request for Comments
<b>RST</b>	Reset (TCP RST)
<b>RTO</b>	Retransmission TimeOut

Pokračování na následující straně ...

... pokračování z předchozí strany

<b>Zkratka</b>	<b>Význam zkratky</b>
<b>SCADA</b>	Supervisory Control And Data Acquisition
<b>SCTP</b>	Stream Control Transmission Protocol
<b>SLA</b>	Service Level Agreement
<b>SYN</b>	SYNchronize (TCP SYN)
<b>SW</b>	Software
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access
<b>TOM</b>	Transmission Optimization Metric
<b>TER</b>	Transmission Error Rate
<b>UDG</b>	Universal Data Generator
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>XML</b>	Extensible Markup Language

# Kapitola 1

## Úvod

Vývoj v oblasti telekomunikací je evidentní a nepřetržitě probíhající proces. V současné době jsme svědky nástupu širokopásmových sítí nové generace (NGA) v segmentu pevných přípojek a sítí páté generace (5G) v oblasti mobilních a bezdrátových sítí. Nicméně je zde celá řada oblastí, kde jsou vážné překážky v pokrytí moderními širokopásmovými systémy. Typickým příkladem jsou průmyslové sítě a zvláště pak oblast energetiky. Zejména v této oblasti dochází v poslední době k rozmachu automatizovaných odečtů elektroměrů - Automated Meter Reading (AMR). Avšak na řadě míst je kvalitní síťová infrastruktura špatně dostupná. Řešením je v řadě případů použití proprietárních úzkopásmových systémů či využití přenosu dat v mobilních sítích. Zde jde zejména o nasazení technologie EDGE, a to vzhledem k nedostupnosti pokrytí sítěmi novějších generací, jakými jsou 3G, 4G a nastupující 5G.

Nasazování technologií Internet of Things (IoT) pravděpodobně na situaci nic nezmění, a to především vzhledem k faktu, že protokoly, jako například DLMS/CoSEM používané v energetice, se stále spoléhají na přenos dat pomocí protokolů z rodiny TCP/IP, které jsou pro nasazení v segmentu IoT nevhodné a ve většině současných technologií jako jsou například LoRaWAN nebo Sigfox, není jejich nasazení podporováno nebo jako u NB-IoT je použití značně problematické.

Sice se může zdát, že protokol TCP je zastaralý (poprvé je zmiňován v RFC 739 [S1] ze září roku 1981) a nevhodný pro nasazení v moderních sítích, nicméně je stále používán ve velkém rozsahu jak pro přenos dat v internetové síti, tak i v dalších oblastech. Je to dáno jednak jeho historickou pozicí jakožto spolehlivého a osvědčeného protokolu pro přenos dat, tak i skutečností, že tento protokol je neustále vyvíjen a stále

jsou nasazovány jeho nové varianty snažící se optimalizovat přenosy dat v globální rovině i ve specifických oblastech.

## 1.1 Motivace

V praxi se ukazuje, že postupně narůstají požadavky na stále větší objem přenosů v sítích, které pro ně nejsou dostatečně dimenzovány. Rovněž je velmi problematické v důsledku lokálních podmínek nebo regulací tyto komunikační sítě patřičně dimenzovat. Právě proto hraje významnou roli správná volba komunikační infrastruktury. Správná volba přístupového protokolu v kombinaci s protokolem transportní vrstvy<sup>1</sup> významným způsobem ovlivňují přenosové možnosti sítě. Nesmíme také zapomenout na možnosti, jaké poskytuje fyzická vrstva pro přenos dat, a to především z pohledu šířky pásma a efektivity jeho využití v konkrétních případech. Důležitým faktorem je rovněž charakter přenášených dat, a především jejich provázání na aplikační úrovni.

Problémy s přenosem dat můžeme očekávat právě při nasazení úzkopásmových bezdrátových sítí, které se vyznačují omezenou propustností v důsledku značně omezené šířky přenosového pásma. V úzkopásmových sítích je nutné, aby se transportní protokol vypořádal nejen s možným zahlcením sítě a souběhem více datových toků, ale i s kolísáním přenosových parametrů dle aktuálního stavu fyzické vrstvy. Specifické problémy s sebou nese rovněž volba topologie sítě, která musí často reflektovat spíše geografické možnosti umístění jednotlivých prvků, které musí být v dosahu specifické infrastruktury, než aby bylo možné je rozmístit optimálně s ohledem na topologii. To s sebou často přináší nutnost využití retranslací, které mohou přinášet další omezení v rámci úzkopásmové komunikace.

Aby bylo možné zajistit spolehlivý přenos dat, je třeba dodržet celou řadu parametrů, což se v reálném nasazení ne vždy daří. Typickým příkladem je nesprávné nastavení transportního protokolu či jeho neúplná implementace. S tímto je možné se setkat například v sítích pro energetiku, kde můžeme narazit na situaci, kdy jsou provozována zastaralá zařízení s omezenou implementací rodiny protokolu TCP/IP, případně není povoleno využívání některých mechanismů pro předcházení zahlcení a zmírňování následků zahlcení, jako je například vypnutí mechanismů pro řízení velikosti TCP okna (CWND), což do značné míry omezuje schopnosti protokolu TCP, aby se dokázal

---

<sup>1</sup>V případě odkazu na vrstvý model je uvažován referenční model ISO/OSI, případně zjednodušená varianta v kontextu TCP/IP.

efektivně vypořádat se stavem zahlcení. Dalším případem může být nevhodně zvolený stochastický protokol pro přístup k médiu, který může být efektivnější v případě nízké zátěže sítě, ale selhává při vysoké zátěži. V tomto případě by bylo většinou vhodnější nasadit deterministický protokol apod.

## 1.2 Návaznost na předchozí práci a výsledky

V předchozím období jsem se zabýval převážně způsoby řízení sítí (bakalářská práce na téma Řízení kvality služby v síti lokálního ISP), ale také kvalitativními parametry sítí a to převážně ve vztahu k přenosu hlasu (diplomová práce na téma Adaptivní řízení kvality služby v síti). Toto téma bylo publikováno v rámci článku v online časopise Access [D3]. V průběhu posledních let se věnuji diagnostice a měření v průmyslových sítích s důrazem na energetické sítě a technologii SmartGrids. Pro generování zátěže a diagnostiku sítí jsem vytvořil nástroj Flowping<sup>2</sup>. Jeho velkou výhodou je především možnost definovat komplexní profil síťové zátěže [D1]. Nástroj Flowping je aktivně používán v řadě akademických i komerčních projektů.

---

<sup>2</sup><https://flowping.fel.cvut.cz/>

## 1.3 Struktura práce

Tato práce je rozdělena do 6 samostatných kapitol. V následujícím seznamu je uveden jejich stručný popis.

1. Úvod – V této kapitole se nachází krátký úvod a stručný popis návazností na předchozí práci. V závěru této části je uvedeno krátké shrnutí obsahu jednotlivých kapitol.
2. Současný stav problematiky – Kapitola popisuje současný stav řešené problematiky. V krátkosti je zde vymezena problematika úzkopásmových sítí. Jsou zde popsány základní mechanismy protokolu TCP jakožto zástupce spojově orientovaných protokolů a potencionální rizika selhání těchto protokolů. Rovněž jsou zde popsány běžné metriky a postupy pro hodnocení výkonnostních parametrů sítové komunikace a metriky založené na hodnocení spravedlivosti přístupu k síťovým prostředkům. Na závěr jsou popsány metriky, které se zaměřují na stavové informace protokolu TCP.
3. Vymezení cílů – Vytyčené cíle předložené disertační práce jsou popsány v této kapitole.
4. Zvolené metody a použité prostředky – Tato kapitola obsahuje popis metod použitých pro ověření navrhovaného řešení, dále také způsoby ověření získaných dat. Zvláštní prostor je také věnován popisu použitých nástrojů a SW vybavení ve formě simulačního prostředí, topologií, modelů a použitých postupů.
5. Výsledky disertace a nové poznatky – V kapitole jsou podrobně popsány dosažené výsledky spolu s jejich ověřením a porovnáním vůči současným konkurenčním řešením. Obsah kapitoly je specificky zaměřen na představení postupů pro analýzu paketových mezer IPGA a jejich využití pro optimalizační metriku. V textu jsou rovněž popsány výhody nově představené metriky TOM a její porovnání s ostatními metrikami, které se dnes používají.
6. Shrnutí poznatků – Tato závěrečná kapitola shrnuje prezentované poznatky a dosažené výsledky. Rovněž jsou zde popsány další možnosti rozvoje prezentovaných řešení a shrnutí s ohledem na reálné využití v praxi.

# Kapitola 2

## Současný stav problematiky

V řadě praktických případů se ukazuje, že prosté použití základních postupů a metrik popsaných v dokumentech organizací Internet Engineering Task Force (IETF) a International Telecommunication Union (ITU) není dostatečné, případně je vhodné využít i další postupy a metody pro měření výkonnosti specifických síťových řešení. A to především za účelem zlepšení jejich fungování v konkrétních oblastech. Mezi základní a hojně využívané metriky můžeme zařadit ty založené na RFC 2544 (Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices) [S2] a ITU-T Y.1564 (Ethernet service activation test methodology) [S3]. Metodika ITU-T Y.1564 bývá také označována jako „Ether SAM“.

Na základě těchto metrik dochází k měření veličin jako jsou propustnost sítě, ztrátovost a zpoždění. Nicméně prostá maximalizace propustnosti, respektive zlepšení využití přenosového kanálu, minimalizace ztrátovosti a komunikačního zpoždění z pohledu jednotlivých spojení ještě automaticky neznamenají, že výsledný stav je optimální.

Vzhledem k faktu, že existuje řada oblastí, kde použití zmiňovaných metrik založených na RFC 2544 a ITU-T Y1564 není optimální, vznikla další doporučení pro testování sítí a zařízení, které jednak vyvracejí některé mýty při aplikaci metrik založených na RFC 2544 a poskytují další metriky pro měření a optimalizaci sítí a síťového provozu. Je třeba poukázat především na doporučení RFC 6349 (Framework for TCP Throughput Testing) [S4], které definuje způsoby měření propustnosti za použití transportního protokolu TCP a ITU-T Y.1563 (Ethernet frame transfer and availability performance) [S5], které se zaměřuje i na další aspekty správného fungování přenosových



sítí a rovněž zavádí pojem dostupnosti ethernetové služby.

Otázkou je, jak postupovat při měření a jakou metriku zvolit v případě, že chceme optimalizovat přenos sítí dle jiných kritérií, jako je například spravedlivost přidělování síťových prostředků mezi jednotlivá spojení ve sdíleném přenosovém kanále, či prostá udržitelnost spojení v případě stížených přenosových podmínek. Otázkou rovněž je, zda vůbec existuje další způsob vhodný pro optimalizace sítí na základě jmenovaných kritérií a případně jakým způsobem jsou různé parametry a metriky na sobě závislé.

V praxi se setkáváme s několika oblastmi, u kterých je evidentní, že standardní postupy mohou být neúčinné, případně nejsme schopni dosáhnout optimálního stavu vzhledem k optimalizačním kritériím, nebo je obtížné optimalizovat konkrétní síť v dlouhodobém období. Přitom stabilita sítě je v tomto případě základním požadavkem pro nasazení technologie v produkčním prostředí. I v těchto případech není ovšem výjimkou, že právě při dlouhodobém pozorování sítě je možné, při použití vhodné metodiky, identifikovat nežádoucí jevy [C2].

Typickým příkladem jsou úzkopásmové sítě používané v průmyslových sítích pro měření a regulaci, na které jsou v současné době kladeny značné požadavky. A tak není výjimkou, že jsou dané sítě přetěžovány, případně provozovány na hranici svých možností. Vývoj v dané oblasti navíc naznačuje, že by mohlo v dohledné době dojít ke skokovému nárůstu nároků na přenosovou kapacitu. Řada nově nasazovaných systémů využívá přenosový protokol TCP a původně binární datový obsah je nahrazován objektové orientovanými formáty typu XML nebo JSON. Takto přenášená data lze velmi efektivně a automatizovaně zpracovat napříč různými Hardware (HW) i Software (SW) platformami, nicméně samotný přenos dat je extrémně neefektivní.

## 2.1 Úzkopásmové sítě

Úzkopásmové sítě jsou velmi specifickou oblastí a to především v kontextu bezdrátové komunikace. Jsou nasazovány typicky v oblastech, kde je nutné překonat značné vzdálenosti a nezdědka i v místech, kde je významná úroveň rušení.

Pokud budeme hledat konkrétní definici úzkopásmových sítí, narazíme na problém s jejich přesnějším vymezením. Úzkopásmové sítě jsou sice v odborné literatuře často zmiňovány, nicméně jejich jasné a přesné vymezení chybí. Rovněž hlediska pomocí nichž můžeme na danou problematiku nahlížet, se různí. Nejčastěji používaná hlediska na klasifikaci úzkopásmových sítí jsou šířka frekvenčního kanálu a dosahovaná datová

přenosová rychlost. Na základě těchto hledisek se většinou za úzkopásmové sítě považují takové sítě, kde šířka frekvenčního kanálu nepřesahuje 25 kHz, 100 kHz, či dokonce stovky kilo Hertzů. Jak je patrné, definice je velmi volná a závisí většinou na specifické oblasti použití. Z pohledu datové propustnosti se často za úzkopásmové sítě považují takové, kde šířka přenosového pásma nepřekračuje dva megabity za sekundu.

Pro účely této práce jsou mnohem podstatnější vlastnosti takových sítí, než jejich přesné vymezení. Společným specifickým těchto sítí je omezené přenosové pásmo a problémy, které vznikají, pokud je síť zahlcená požadavky.

Právě v návaznosti na využití úzkopásmových sítí v energetice<sup>1</sup>, je důležité správně volit kompromis mezi maximální propustností a zpožděním. Řada dohledových systémů je nastavena takovým způsobem, aby při detekci zpoždění v komunikaci<sup>2</sup> došlo k signalizaci selhání spojení. To je ovšem nežádoucí stav nejen pro provozovatele, ale i pro dodavatele dané technologie. Proto se ukazuje, že garance určitého zpoždění může být důležitější než maximalizace efektivity přenosu a tím i maximální přenosové rychlosti.

Vlastní chování úzkopásmových sítí z pohledu výkonnostních parametrů je většinou do značné míry předurčeno zvoleným kompromisem mezi efektivitou přenosu dat a stabilitou sítě ve smyslu volby přístupového protokolu a jeho řízení. Situaci do značné míry komplikuje i fakt, že efektivita jednotlivých přístupových metod je závislá na míře využití přenosového pásma.

V případě systémů se stochastickým přístupem k médiu je značně problematické zajistit konkrétní úroveň služby v případě, že objem provozu překročí určitou mez, která je u těchto systémů většinou jen zlomkem maximální kapacity přenosového pásma [L4]. Určitým pokrokem jsou tzv. „Polling protokoly“, které představují určitý mezistupeň mezi ryze stochastickým a plně deterministickým přístupem při realizaci komunikačního protokolu. Tyto protokoly jsou již schopné zajistit značnou efektivitu přenosu [L5, L6], nicméně jsou schopny garantovat přidělení prostředků jen v omezené míře. Na opačném konci stojí plně deterministické přístupové protokoly, které mají plnou kontrolu alokace síťových prostředků. Typickým příkladem je rodina protokolů založená na přístupu k médiu pomocí časového multiplexu (TDMA). V tomto případě záleží pouze na parametrizaci protokolů z pohledu alokace a velikosti slotů ve vzestupném/sestupném směru a použitím protokolu s ohledem na šířku dostupného

---

<sup>1</sup>Jako způsobu připojení odlehklých lokací do Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA) systémů

<sup>2</sup>To často nemusí reflektovat specifika použitého protokolu a může být nastaveno zbytečně přísně.

přenosového pásma a nastavení fyzické vrstvy. V tomto případě je přímo možné optimalizovat zpoždění odpovědi vůči odeslanému požadavku konkrétního typu provozu a to až do plného využití přenosového kanálu (po odečtení režie samotného protokolu). Zpoždění je ovšem možné garantovat jen v systému, který není zahlcen požadavky a nemá naakumulovaná data v rámci mechanismů front.

Vzhledem k výše uvedenému lze konstatovat, že maximalizace propustnosti sítě čistě na základě metrik definovaných v IETF a ITU-T, které jsou zaměřeny na výkonnostní parametry sítě, nemusí být dostatečné a pak není takové řešení optimální. Zvláště, pokud vezmeme v úvahu, že mnohem důležitější je dokončení přenosu dat a vyhovění kritériím na maximální zpoždění ve vztahu požadavek a odpověď, než vlastní doba trvání samotného přenosu. V případě nasazení systémů SCADA na úzkopásmových sítích jde většinou o automatické vyčítání dat a prodloužení doby přenosu je možné ospravedlnit vyšší pravděpodobností, že se dané spojení podaří dokončit.

Selhání přenosu, respektive vyhodnocení daného spojení jako selhání, znamená zásadní problém. Přenos je v tom případě nutné opakovat. Zajištění podkritické hodnoty reakce na požadavek je v tomto případě důležitější než to, že přenos bude méně efektivní a to i v řádu desítek procent. Tyto sítě jsou rovněž v případě použití stochastických přístupových metod v mnohem větší míře náchylné na zahlcení a pak do značné míry závisí na tom, jak dobře nebo špatně je přenos sítí optimalizován.

Samostatnou kapitolou zůstávají úzkopásmové sítě v rámci problematiky IoT, kde vzhledem k odlišným požadavkům a celkové koncepci těchto sítí, je třeba volit zcela odlišný přístup [C1].

## 2.2 Spojově orientované protokoly

Spojově orientované protokoly mají zásadní význam pro fungování velké škály služeb tak, jak je dnes známe a jsou nosným prvkem fungování Internetu, kde dominantní roli hraje rodina protokolů TCP/IP [L8]. Základní úkolem spojově orientovaných protokolů je sestavení, udržování a korektní ukončení spojení, případně zajištění dalších služeb pro protokoly vyšších vrstev. Mezi nejdůležitější služby můžeme zahrnout ty, které zajišťují spolehlivý přenos dat a ty, které mají za úkol předcházet a řešit zahlcení sítě.

Základním protokolem pro spolehlivý přenos dat je v dnešní době stále protokol TCP. TCP je protokol, který byl představen již v roce 1981 organizací IETF pod RFC 793 [S6]. I přes jeho stáří je stále nejrozšířenějším protokolem pro zajištění spolehlivého

přenosu dat. Navíc je patrná tendence používat tento protokol i v oblastech, které byly donedávna doménou spíše binárních protokolů. Jako příklad je vhodné uvést přidání rozšíření IEC 60870-5-104 [S7] k protokolu IEC 60870-5-101, či snaha používat protokol TCP v IoT sítích, ačkoliv z principu funkce je použití toho protokolu v těchto sítích diskutabilní z hlediska funkčnosti a režie [L9]. Pokud je nutné i přesto nasadit v sítích IoT protokol TCP, je nutné dodržet celou řadu omezení [L10].

Protokol TCP prošel během několika posledních dekad značným vývojem a rozličnými modifikacemi v oblastech jeho adaptace na přenosové podmínky a jeho schopností přenášet data velkou rychlostí na vysokokapacitních linkách a to i na velmi dlouhé vzdálenosti [S8, S9, S10, S11].

V dnešní době jsme svědky stále rostoucí složitosti komunikačních protokolů a rovněž mnohem větší diversity telekomunikačních zařízení, což také klade vyšší nároky na optimalizaci transportních protokolů. I přes své staří dokáže protokol TCP dobře sloužit i dnešním potřebám z důvodu neustálých optimalizací v rámci jeho kontrolních a řídicích mechanismů. Díky zpětné kompatibilitě mohou systémy spolu komunikovat bez ohledu na to jakou verzi nebo modifikaci TCP protokol používá.

Pokud se zaměříme čistě na chování protokolu TCP při velké zátěži či dokonce při úplném zahlcení komunikačního kanálu, což není v případě úzkopásmových sítí možné vyloučit, je příhodné použití algoritmů a metrik, které nám pomohou odhalit příčiny, nebo alespoň konkrétní místa, kde dochází k potížím při přenosu dat.

Kromě základního zajištění spolehlivého přenosu je hlavní přínos protokolu TCP v udržení férového přístupu k médiu a to především díky mechanismům pro kontrolu a předcházení zahlcení přenosového kanálu.

Cílem této práce není podrobně popsat protokol TCP, nicméně pro lepší představu o mechanismech a základním fungování protokolu TCP při velkém zatížení je vhodné zmínit některé jeho základní mechanismy pro předcházení a řízení zahlcení [L11, L12], či pomáhající řešit některé problémy v návrhu původní verze protokolu TCP.

## 2.2.1 Řízení komunikace protokolu TCP

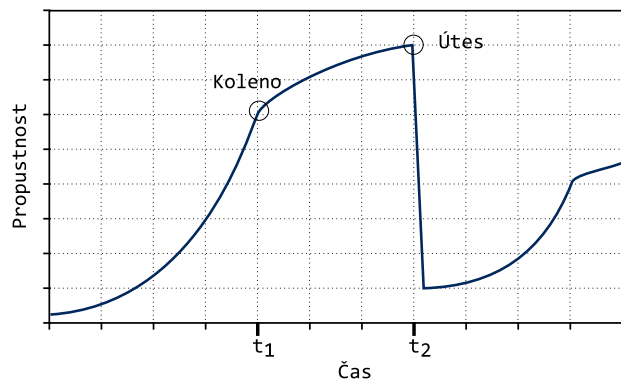
### 2.2.1.1 Pomalý start (Slow start)

Jedná se o jeden ze základních mechanismů předcházení zahlcení. Protože v době zahájení přenosu nemá ještě protokol TCP dostatek informací pro svoji regulaci tak, aby nedošlo k zahlcení sítě ihned na začátku spojení, je přenosový kanál postupně za-

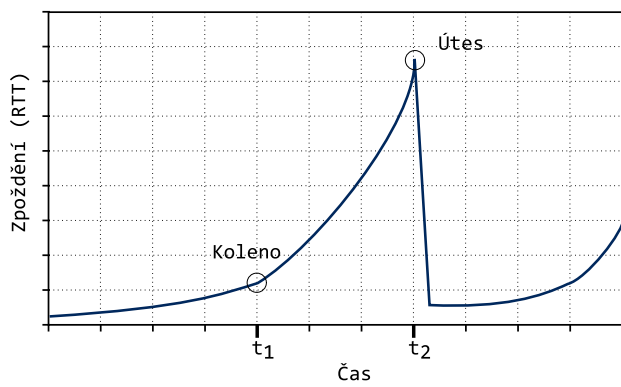
těžován stále se zvyšujícím množstvím odchozích dat. S přibývajícím časem je dovoleno odesílat stále více a více dat během daného intervalu. Předpokládá se, že nedochází k žádným obtížím při přenosu dat jako například ke ztrátě segmentu dat, nebo nárůstu zpoždění ve smyčce (RTT). Název této metody může vést mylně k domněnì, že náběh protokolu na optimální rychlost je pomalý, ale je třeba si uvědomit, že ve své podstatě jde o exponenciální náběh. Průběh otevírání spojení je zobrazen v první části grafu na obrázku 2.1, která končí takzvaným „kolenem“. Po něm následuje část, která již podléhá algoritmu, který je aktivní v době detekovaného zahlcení sítě.

### 2.2.1.2 Předcházení a řízení zahlcení

Tento mechanismus se uplatňuje ve chvíli, kdy je v síti detekováno zahlcení. Mechanismus je aktivní po celou dobu, kdy dochází ke specifickým problémům v síti. Na obrázku 2.1 je to oblast mezi kolenem a propastí. Typicky je tento algoritmus opřen o parametr, který se nazývá Congestion Window (CWND). Nastavení CWND má za úkol omezit množství nepotvrzených dat, které je schopno TCP vyslat do sítě v rámci konkrétního spojení. V případě aktivního zahlcení je vysílací okno zvyšováno pouze o velikost jednoho segmentu v intervalu odpovídajícímu zpoždění ve smyčce pro dané spojení. V případě, že zahlcení sítě odezní, je možné škálovat vysílací okno směrem nahoru mnohem agresivněji (režim pomalého startu). Naproti tomu, pokud je detekována ztráta segmentu dochází k okamžitému zmenšení velikosti odesílacího okna. Na obrázku 2.1 je tento jev vyznačen propastí. Běžnou strategií může být například zmenšení okna na polovinu. Popsaný algoritmus je označován jako AIMD (Additive Increase and Multiplicative Decrease). Výhodou tohoto algoritmu je, že mimo jiné vede i ke spravedlivějšímu přidělování síťových prostředků na rozdíl třeba od strategie, kdy se odesílací okno zmenšuje pouze o jednotky segmentů. Toto by sice zajistilo efektivní využívání prostředků, ale mělo by to dopad na spravedlivost jejich přidělování, jak je popsáno v článku „Analysis of the Increase and Decrease Algorithms for Congestion Avoidance in Computer Networks“ [L13]. Analogicky je možné zobrazit daný průběh i pro zpoždění 2.2.



Obr. 2.1: Reakce protokolu TCP na řízení - propustnost.



Obr. 2.2: Reakce protokolu TCP na řízení - zpoždění.

### 2.2.1.3 Rychlé přeposlání a rychlé zotavení

Rychlé přeposlání je mechanismus, který dává možnost druhé straně signalizovat, že došlo ke ztrátě dat a navíc konkrétně určit, o jaký segment dat se jedná. Mechanismus se opírá o zaslání duplicitních potvrzení ACKnowledgements (ACK). V případě přijetí tří duplicitních potvrzení je aktivován mechanismus pro přeposlání chybějícího segmentu dat. V tomto případě se nečeká na vypršení časovačů pro přeposlání nepotvrzených segmentů, což v řadě případů vede k mnohem rychlejší náhradě ztracených dat.

Mechanismus rychlého zotavení je aktivní v době, která nastává po přeposlání chybějícího segmentu, a je aktivní do doby, než dojde k příjmu neduplicitního ACK. Ve většině případů je možné se vyhnout aktivaci algoritmu pomalého startu a zmenšení CWND až na velikost 1 segmentu.

## 2.2.2 Další algoritmy protokolu TCP

Kromě dříve jmenovaných algoritmů pro zajištění základních funkcí a optimálního využití přenosového pásma protokolem TCP obsahuje moderní implementace tohoto protokolu celou řadu dalších vylepšení, která jsou často zaměřena na řešení potíží ve specifických oblastech.

### 2.2.2.1 Nagleho algoritmus

Tento algoritmus je odpovědí na problém s efektivitou přenosu, pokud je potřeba přenášet velké množství paketů s minimální velikostí uživatelských dat. Daná situace nastává například, pokud je třeba přenášet jednotlivé znaky zadávané na vzdálený terminál. Nagleho algoritmus je schopen sloučit specifické množství dat a poslat je jako jediný paket. Daný algoritmus je popsán v RFC 896 [S12]

### 2.2.2.2 Opožděné zasílání potvrzení (Delayed ACKs)

Tento mechanismus opět pomáhá řešit problém s efektivitou přenosu. Je popsán v RFC 1122 [S8] a jeho cílem je omezit počet zasílaných potvrzení tím, že čeká až 500 ms a pak se pošle sdružené potvrzení.

### 2.2.2.3 Algoritmus exponenciálního ustupování (Exponential backoff)

Tento algoritmus pomáhá řešit situaci, kdy dojde k zahlcení sítě. Namísto toho, aby se nepotvrzená data posílala v pravidelné periodě znovu, tak se vždy Retransmission TimeOut (RTO) interval prodlouží (typicky na dvojnásobek předchozího intervalu).

## 2.2.3 Specifické varianty protokolu TCP

Protokol TCP jako takový je definován množinou společných vlastností, které jednotlivé varianty sdílejí, a vzhledem ke zpětné kompatibilitě se staršími verzemi protokolu jsou jen těžko modifikovatelné v budoucnu. Mezi mechanismy, které je možné modifikovat a docílit tak různého chování protokolu za různých podmínek a tak protokol na dané podmínky lépe adaptovat, patří především mechanismy v oblasti předcházení a řízení zahlcení. Podle varianty těchto mechanismů dostávají různé verze TCP i svoje jméno. Mezi typické zástupce patří varianty jako jsou TAHOE, RENO, VEGAS, NewRENO, BIC, CUBIC, BBR a další.

Specifickou variantou protokolu TCP, která se opírá o rozsáhlejší zásahy do základů protokolu TCP, je Multipath-TCP. Tento protokol dokáže využívat současně více přenosových cest a to za účelem zvýšení celkové přenosové rychlosti nebo robustnosti spojení. Vzhledem k faktu, že funkčnost tohoto protokolu je značně závislá na rozšířené hlavičce protokolu TCP, je jeho praktické použití značně problematické [B4].

## 2.2.4 Některá rizika při komunikaci pomocí protokolu TCP

I přes implementaci velmi robustních mechanismů lze v řadě oblastí TCP protokol vyvézt z rovnováhy. V oblasti telekomunikací je běžné, že pokud se vyvíjí nový protokol, je současně optimalizován, tak aby byl šetrný k datovým tokům stejného typu a ostatnímu provozu, a to především v situacích, kdy se dá přímo předpokládat souběh více datových toků daného protokolu, nebo i případně souběh s dalšími typy komunikačních protokolů. To se zatím ukazuje jako jeden z největších problémů mechanismů řízení algoritmu BBR, který sice dokáže využít síťové prostředky mnohem lépe než ostatní algoritmy představené v rámci řízení protokolu TCP, nicméně se potýká s celou řadou problémů právě v oblasti férového přístupu k prostředkům [L15, L16].

Je velmi obtížné optimalizovat konkrétní protokol tak, aby dokázal být šetrný ke všem ostatním protokolům bez ohledu na způsob jejich fungování. Vždy se jedná o kom-



promis a většinou je daný protokol, když už je optimalizován směrem k šetrnosti, optimalizován vůči konkrétnímu typu provozu. Otázkou je jeho chování v reálném prostředí, kde se může jeho optimalizace částečně míjet účinkem. Napomáhá tomu i fakt, že dnešní algoritmy jsou stavěné pro maximalizaci propustnosti na dlouhých trasách s vysokou datovou propustností a není žádoucí, aby docházelo ke zpomalování přenosů v důsledku ojedinělých výpadků, nebo vysokého ale přitom konstantního<sup>3</sup> zpoždění ve vztahu ke světové poloze [L17].

	Barcelona	Paris	Tokyo	Toronto	Washington
Amsterdam	39.676ms	15.627ms	238.256ms	93.048ms	86.212ms
Auckland	285.893ms	263.233ms	235.311ms	203.635ms	208.4ms
Copenhagen	44.081ms	24.066ms	255.646ms	119.512ms	104.218ms
Dallas	138.955ms	119.339ms	137.424ms	43.744ms	48.118ms
London	33.75ms	5.589ms	219.682ms	96.684ms	84.256ms
Los Angeles	156.053ms	136.205ms	107.617ms	59.784ms	57.105ms
Moscow	72.634ms	52.267ms	207.6ms	131.76ms	129.318ms
New York	94.027ms	74.763ms	213.779ms	21.089ms	22.153ms
Paris	34.175ms	—	232.061ms	103.365ms	78.558ms
Prague	60.49ms	30.8ms	270.549ms	119.17ms	130.747ms
Stockholm	51.084ms	26.63ms	279.202ms	114.646ms	116.395ms
Tokyo	284.585ms	241.268ms	—	180.023ms	160.582ms

Obr. 2.3: Zpoždění ve vztahu ke světové poloze (vzdálenosti) komunikujících bodů.

Za typickou ukázkou můžeme považovat právě algoritmy pro předcházení a řízení zahlcení v protokolu TCP, jak se můžeme dočíst v článku „Tcp congestion avoidance algorithm identification“ [L18]. Tento článek popisuje situaci, kdy většina používaných algoritmů, ze kterých můžeme jmenovat například AIMD, CUBIC, CTCP, DCTP a SCTP [L19, L20, L21][S13, S14], je navržena tak, aby byly šetrné právě k algoritmu AIMD. Již v roce 2012 byla penetrace internetu tímto algoritmem pouze na úrovni 26% v oblasti webových serverů [L18]. Nevím o žádné novější studii a tak se můžeme jen domnívat, jaká je situace dnes. Můžeme si nicméně dovolit předpokládat, že situace bude ještě nepříznivější, a to i vzhledem k faktu, že algoritmus CUBIC se stává dominantním algoritmem jak na straně platformy Linux tak i Microsoft Windows.

<sup>3</sup>V kontextu poměru malého kolísání zpoždění vůči celkovému velkému zpoždění v řádech až stovek ms viz obrázek 2.3.

I přes robustnost protokolu TCP, nebo možná právě díky ní, existuje řada případů, kdy může TCP protokol selhávat, nebo není optimálně nasazen. V tomto případě se většinou jedná o případy, kdy je síťová infrastruktura provozována na hranici, případně i za hranicí svých možností a mechanismy pro řízení zahlcení již nedokáží efektivně řídit stav zahlcení. V důsledku velkého zahlcení sítě provozem pak můžeme očekávat, že na úrovni protokolu TCP začne docházet k opakovanému vypršení časovačů RTO, případně může dojít k vypršení časovačů pro celé spojení.

## 2.3 Doporučení IETF RFC v oblasti řešené problematiky

### 2.3.1 RFC 2330 a RFC 7312

Doporučení RFC 2330 [S15] popisuje základní principy pro sestavení metrik, které jsou zaměřeny na analýzu a hodnocení služeb poskytovaných na bázi protokolu IP. Mimo jiné slouží právě k tomu, aby nově definované metriky byly dobře srozumitelné a hlavně správně koncipované a to jak z hlediska použití na úrovni ISP tak i z hlediska užití a porozumění na uživatelské úrovni. Toto doporučení dává jasný návod, jak by se měly nově vyvíjené metriky koncipovat, včetně správného formátu testovacích paketů. Doporučení rovněž upřednostňuje vytváření deterministických metrik před těmi pravděpodobnostními. Jako příklad prezentují, že z pohledu metriky RFC 2330 je užitečnější přímo definovat ztrátovost paketů poměrem ztracených paketů (např. 73 paketů ze 100), než používat výstup ve formě pravděpodobnosti ztráty 0,73.

Doporučení RFC 7312 [S16] doplňuje a aktualizuje některé pojmy a postupy zavedené v rámci doporučení RFC 2330. V odkazu na doporučení RFC 6985 [S17] a RFC 2679 [S18] je zmiňováno použití různých délek paketů. Vzhledem k požadavku na opakovatelnost měření, který byl představen v rámci doporučení RFC 2330, je doporučeno pro testování používat přesně definované a hlavně při opakování identické předpisy provozu z pohledu velikostí paketů. Jisté míry náhodnosti je v tomto případě dosaženo náhodnou volbou počátku přenosu a variabilitou přenášených dat (payload).

### 2.3.2 RFC 2544

V doporučení RFC 2544 [S2] je popsána jedna ze základních testovacích metodik. Toto doporučení je doplněno o doporučení RFC 1242 [S19], které upřesňuje použitou terminologii. Implementaci měření na základě metodiky z doporučení RFC 2544 můžeme nalézt v širokém spektru měřících zařízení. Jako příklad lze jmenovat produkty firem FORTINET, EXFO, Ixia či GL<sup>4</sup>. Ne vždy je ovšem metodika používána zcela v souladu s doporučením, a proto nastávají situace, kdy je používána i pro testování sítí, viz například poslední jmenovaný výrobce a jeho zařízení z řady PacketExpert. A proto mimo jiné, vydala organizace IETF doporučení RFC 6815 [S20], které do datečně vysvětluje správný rámec využití metodiky popsané v RFC 2544 a to jako metodiku určenou výhradně pro testování zařízení v izolovaných testovacích sítích (rozuměj laboratořích). Z tohoto důvodu je metrika nevhodná pro měření za účelem optimalizace sítí či síťových protokolů v kontextu celého komunikačního řetězce, ačkoliv se tak často používá.

Zásadním omezením metrik dle RFC 2544 je fakt, že metriky se zaměřují pouze na hledání limitních parametrů a nijak nereflktují například úroveň služeb dle dohodnutého Service Level Agreement (SLA).

### 2.3.3 RFC 6349

V doporučení RFC 6349[S4] je popsána metodika zaměřená na testování výkonu protokolu TCP. Důležitost této metodiky spočívá v tom, že se jedná o první a víceméně o jedinou metodiku, která byla vytvořena po 30 letech od prvního RFC 793 popisujícího protokol TCP. Jedná se o metodiku, která je zaměřena ryze na TCP protokol, a proto dokáže postihnout celou řadu aspektů chování tohoto protokolu v různých prostředích. Navíc je tato metodika zaměřena na testování, které je navrženo tak, aby poskytovalo zpětnou vazbu i s ohledem na specifické vnímání uživatelů.

### 2.3.4 RFC 7799

Doporučení RFC 7799 [S21] je dalším z řady, které se zabývá postupem při návrhu metrik. Toto konkrétní doporučení vymezuje základní pojmy a rozděluje metriky do tří základních skupin. Za prvé na metriky a metody aktivní, které jsou používány

---

<sup>4</sup><https://www.gl.com/optical-and-ethernet-testing-packetexpert.html> (12.5.2018)

na základě uměle vygenerovaného síťového provozu. Za druhé na metriky a metody pasivní, které využívají běžně dostupný provoz pro analýzu a vyhodnocení. Za třetí na metody, které používají kombinaci předchozích postupů a jsou označovány jako hybridní metriky a metody. Každá z uvedených skupin má svou oblast využití. Rovněž každý přístup s sebou nese jistá pozitiva a negativa a to s ohledem na ovlivnění okolního provozu v případě aktivního přístupu, či složitosti měření některých parametrů za použití pasivního přístupu.

## 2.4 Doporučení ITU-T Y.15xx v oblasti řešené problematiky

Z pohledu analýzy datových přenosů a jejich optimalizací stojí za pozornost následující doporučení z řady ITU-T Y.1500-1599. Vybrána jsou doporučení, která skrývají potenciál v oblasti diagnostiky a měření sítí za účelem jejich optimalizací. Jmenovitě se jedná o doporučení: Y.1540, Y.1545.1, Y.1560, Y.1562, Y.1563 a Y.1564.

### 2.4.1 ITU-T Y.1540

Doporučení ITU-T Y.1540 [S22] se zaměřuje na analýzu výkonnostních parametrů protokolu IP a základní dostupnost poskytované služby opřenu především o ztrátovost paketů. Jedná se tedy o analýzu zaměřenou především na ne-spojově orientované protokoly. Daný dokument definuje základní metriky, které jsou založeny na době přenosu paketu v rámci segmentu sítě, kolísání zpoždění při přenosu paketů z pohledu koncových bodů, poměru paketů obsahující chyby, poměru ztracených paketů, počtu chybně doručených paketů, počtu paketů v nesprávném pořadí, poměru ztracených bloků paketů, duplicitních paketů a případně jinak poškozených paketů.

### 2.4.2 ITU-T Y.1545.1

Doporučení ITU-T Y.1545.1 [S23] se stejně jako ITU-T Y.1540 zabývá analýzou sítí na úrovni protokolu IP. Tento dokument se zaměřuje spíše na oblast kvality služby QoS (Quality of Service) a slouží jako podklad pro diagnostiku a hodnocení kvality služby, která je poskytována na straně poskytovatelů internetových služeb (ISP). Dané doporučení je koncipováno pro využití regulátory, aby poskytovalo rámec pro testování

služeb, které poskytují ISP svým zákazníkům. Kromě základní definice a vymezení pojmů daný dokument zkoumá poskytované služby ve vztahu k aktivaci spojení na úrovni IP protokolu (DHCP), reakčního času systému DNS, počtu mezilehlých autonomních systémů (AS), zpoždění ve smyčce RTT, rozptylu zpoždění, ztrátovosti paketů, přenosové rychlosti na úrovni síťové vrstvy a celkové dostupnosti poskytované služby.

### 2.4.3 ITU-T Y.1560

Doporučení ITU-T Y.1560 [S24] specifikuje základní parametry při měření výkonostních parametrů TCP. Zaměřuje se specificky na výkonnostní parametry jako jsou zpoždění při sestavení spojení, propustnost datové komunikace nebo zpoždění při ukončení spojení. Rovněž stručně popisuje spolehlivostní parametry, jakými jsou pravděpodobnost selhání během sestavování spojení, pravděpodobnost selhání sestavení spojení, pravděpodobnost předčasného rozpojení spojení, pravděpodobnost selhání ukončovací fáze spojení a dostupnost spojení. Je škoda, že se tento dokument nijak nevěnuje bližší specifikaci či popisu algoritmů, které by standardizovaly měření uvedených parametrů.

Tento dokument rovněž přináší důležitou definici pojmů: datová komunikační propustnost a celková komunikační propustnost, jak je uvedeno v následujícím popisu.

#### 2.4.3.1 Datová komunikační propustnost

Datovou komunikační propustností se rozumí podíl celkového počtu přenesených bytů během datové komunikační fáze (do ní se nepočítá vlastní sestavení a zrušení spojení) a času, který uplyne mezi odesláním prvního datového paketu a přijetím posledního datového paketu. Běžně se rozlišuje vzestupný (upstream) a sestupný (downstream) komunikační směr.

#### 2.4.3.2 Celková komunikační propustnost

Celkovou komunikační propustností se rozumí podíl celkového počtu přenesených bytů během celé komunikační fáze a času, který uplyne mezi odesláním prvního paketu, který zahajuje sestavení spojení, a přijetím posledního paketu, který dané spojení ukončuje. V tomto případě je tedy do výpočtu zahrnuto sestavení spojení, vlastní přenos dat

a ukončení spojení. Rozlišení na jednotlivé směry komunikace je stejné jako v předchozím případě.

#### **2.4.4 ITU-T Y.1562**

Doporučení ITU-T Y.1562 [S25] je zaměřeno na výkonnostní parametry a postupy při měření protokolů vyšších vrstev. Toto doporučení odhlíží od problematiky vlastního přenosu rámců a zaměřuje se na uživatelskou rovinu. Tento dokument mimo jiné zavádí definice pojmů jako je rychlost odezvy vyšší vrstvy, kterou definuje jako časový interval mezi odesláním požadavku a přijetím odpovědi. V podstatě se jedná o reakční dobu serveru na klientský požadavek a počítá se do ní i režie potřebná k sestavení spojení. Dále specifikuje zpoždění při autentizaci, jako dobu potřebnou pro zaslání uživatelského jména a hesla a přijetí odpovědi o výsledku autentizace. Rovněž specifikuje dobu přenosu dat od zaslání požadavku po přijetí posledního datového paketu. Rovněž jsou specifikovány i parametry, které reflektují dostupnost služby, úspěšnost sestavení spojení a úspěšnost obsluhy požadavku.

#### **2.4.5 ITU-T Y.1563**

Kromě standardního popisu ethernetové sítě a jejích hranic je doporučení ITU-T Y.1562 [S5] zaměřeno na definici parametrů ethernetové sítě ve vztahu k parametrům jakými jsou: rychlost přenosu dat, správnost doručení, spolehlivost a dostupnost služeb. Z důvodu kompatibility jsou uvedené postupy v tomto dokumentu směřovány v podobném duchu jako je definována výkonnostní matice „3x3“ v doporučení ITU-T Y.350 (General Aspects of Quality of Service and Network Performance in Digital Networks, Including ISDN) [S26]

#### **2.4.6 ITU-T Y.1564**

Doporučení ITU-T Y.1564 [S3] je považováno v řadě případů za náhradu či doplnění měření síťových parametrů na základě RFC 2544. Toto doporučení nspecifikuje architekturu Ethernetu nebo poskytovaných služeb, nýbrž se zaměřuje na aktivaci služeb, které jsou založeny na Ethernetu. Respektive zaměřuje se na pokrytí oblastí, které nejsou pokryty doporučením RFC 2544.

Smyslem této metodiky je poskytnout rámec pro testování sítí založených na Ethernetu. Toto doporučení především specifikuje metodický postup pro takzvanou aktivaci služeb. V tomto kontextu to znamená, že definuje testy, které umožňují porovnat poskytovanou službu s její specifikací na úrovni SLA. To je velmi důležité jak z pohledu zákazníka, který ví, že obdržel dohodnutou službu, za kterou platí, a rovněž i z pohledu poskytovatele služby, který ví, že zákazníkovi dodává službu, která vyhovuje dohodnutým specifikacím.

Nicméně vzhledem k faktu, že tato metodika je cílena na nižší vrstvy komunikace, není schopná pokrývat vrstvy vyšší. To mimo jiné znamená, že není schopná pokrýt vnímání služby z pohledu samotného uživatele, který využívá služeb vyšších vrstev.

## 2.5 Metriky založené na férovém přístupu k prostředkům

Tyto metriky a na nich založené algoritmy mají za cíl zkoumat a hodnotit, jakým způsobem jsou síťové prostředky přidělovány jednotlivým požadavkům na přenos dat. Respektive mají za cíl hodnotit, zda jsou prostředky přiděleny na základě předem specifikovaných kritérií, případně nějakým způsobem vyhodnotit odchylku od optimálního stavu. To je následně využíváno k nastolení specifické férovosti v přidělování síťových prostředků.

Po té, co byl v roce 1984 publikován článek „A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System“ [L22], začaly se pro hodnocení rovnosti přístupu k prostředkům hojně používat právě metriky založené na Jain's Fairness Indexu (JFI).

JFI je výhodná v tom, že to není konkrétní metrika, která by byla svázána s měřením konkrétního parametru sítě, ale vytváří rámec pro sestavení vhodné metriky, který se bude opírat o konkrétní optimalizovaný či měřený parametr. A tak máme na výběr, zda budeme hodnotit férové přidělení prostředků s ohledem na zpoždění, propustnost sítě, či férovost alokace prostředků.

### 2.5.1 Jain's Fairness Index

JFI je jeden z nejvýznamnějších indexů pro hodnocení spravedlivého přidělování prostředků. V případě, že se zaměříme na hodnocení férovosti propustnosti datových toků, pak je zmíněný index v obecné rovině definován rovnicí 2.1, kde je pozorovaná propustnost jednotlivých spojení označena  $x_i$ . Pro index  $i$  konkrétního datového toku platí, že  $1 \leq j \leq NF$ , kde  $NF$  je celkový počet sledovaných toků.

$$JFI = f(x_1, x_2, \dots, x_{NF}) = \frac{(\sum_{i=1}^{NF} x_i)^2}{NF \sum_{i=1}^{NF} x_i^2} \quad (2.1)$$

JFI dává značnou volnost při tvorbě specificky zaměřeným metrik. To ovšem přináší problémy s její parametrizací, kdy je nutné dobře znát podmínky, pro které je metrika, založená na JFI, realizována. Využití metrik založených na JFI je v prostředí sítí a jejich optimalizací celkem běžné. Dost často můžeme zaznamenat použití JFI při ověřování nových algoritmů, které mají za cíl řídit, či předcházet zahlcení sítě. Především pro ověření férové alokace prostředků mezi jednotlivé datové toky.

Výstupem metrik, které jsou založeny na JFI, je číslo v rozmezí od  $\frac{1}{NF}$  do 1, kde  $NF$  je rovno počtu souběžných datových toků. Spodní hranice odpovídá situaci, kdy je detekována nejmenší spravedlnost přidělení prostředků. V případě síťové propustnosti to značí, že jeden z pozorovaných toků dostal přiděleny všechny prostředky a ostatní toky žádné. Naopak maximální férovosti je dosaženo v případě, že všechny datové toky dostanou přiděleny prostředky optimálně. To nicméně ještě neznamená, že prostředky musí být přiděleny rovnoměrně.



Výhody a nevýhody včetně důvodů pro použití metrik založených na JFI jsou shrnuty v následujícím seznamu.

- **Výhody:**

- Nezávislost na měřítku,
- průběžný výpočet,
- omezený v rozsahu  $(0, 1)$ ,
- aplikace na libovolně rozsáhlá data,
- intuitivní vazba na zkoumanou veličinu.

- **Nevýhody:**

- Závislost na délce intervalu,
- náchylnost na špatné nastavení parametrů<sup>5</sup>.

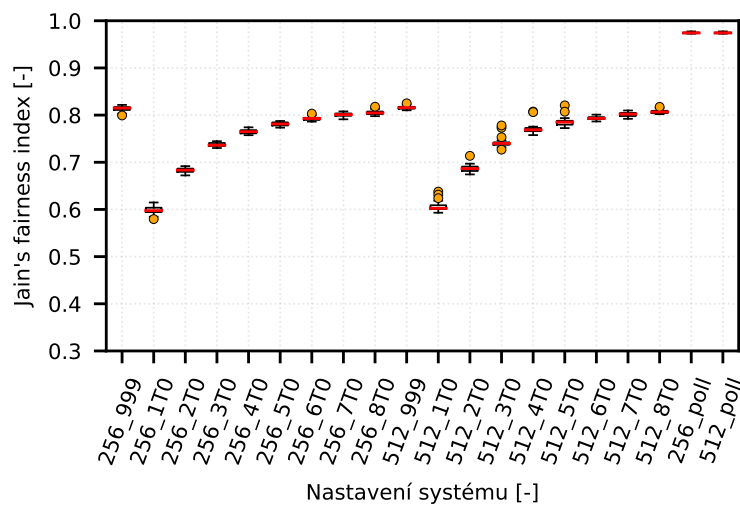
Graf na obrázku 2.4 ukazuje možnosti využití metriky založené na JFI pro optimalizaci síťových přenosů. Jedná se o použití metriky založené na JFI ve smyslu porovnání dosažené přenosové rychlosti. V tomto konkrétním případě bylo sledováno využití přenosového pásma jednotlivými toky protokolu TCP. Jak ukazuje obrázek 2.4, metrika založená na JFI celkem dobře odráží změny provedené v síťovém nastavení<sup>6</sup>. Jednalo se o nastavení specifického typu spojové vrstvy (případně času maximálního setrvání paketů ve frontě před jejich zahazením) a rovněž nastavení maximální velikosti segmentu (MSS) na úrovni transportního protokolu TCP.

Přístup založený na JFI se zdá být vhodný pro optimalizaci datových toků TCP. Rovněž můžeme přirozeně předpokládat, že spravedlivé přidělování prostředků povede k lepší stabilitě a udržitelnosti síťové komunikace spojově orientovaných protokolů. Otázkou ovšem zůstává, zda základní metriky založené na JFI vyhoví těmto předpokladům za všech okolností, nebo zda je třeba hledat vhodnější způsob pro optimalizaci přenosu dat pomocí spojově orientovaných protokolů.

---

<sup>5</sup>V obecné rovině se nepředpokládá, že síťové prostředky budou přidělovány rovnoměrně, ale spíše dle předem zadaných kritérií, které mohou vyplývat například z požadavků na úrovni aplikační vrstvy referenčního modelu ISO/OSI, která nemusí být známá pro správné nastavení metriky. Rovněž se jako problematické jeví nastavení vhodné délky intervalu vyhodnocení metriky JFI, jak bylo uvedeno v předchozím bodě.

<sup>6</sup>Hodnoty na ose  $x$  reprezentují různé konfigurace simulátoru.



Obr. 2.4: Ukázka výstupu metriky založené na JFI (interval 600 s) pro analýzu dat scénáře CSMA/CA.

Použití metrik založených na JFI s sebou přináší některé komplikace. Vzhledem k faktu, že pro výpočet JFI je nutné stanovit délku intervalu, nad kterým je metrika počítána<sup>7</sup>, může být správné nasazení metrik založených na JFI náročné. Stanovení délky intervalu má totiž v některých případech zásadní vliv na dosažené výsledky.

Obecně se nabízí dvě možnosti, jak provádět výpočet intervalové metriky založené na JFI. Jedna z možností je průběžný výpočet metriky nad JFI a získání průběžných hodnot JFI. Tento postup je vhodný především pro získání představy o vývoji hodnot JFI v průběhu konkrétního měření.

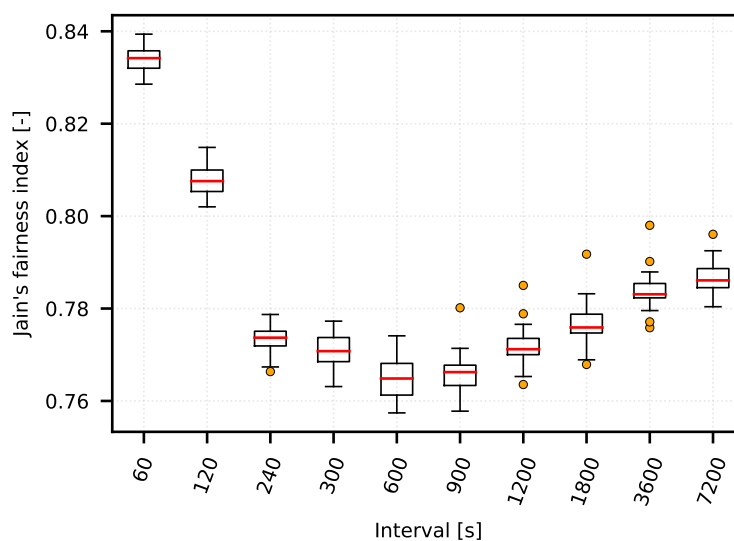
Další z možností je rozdělení zkoumané komunikace na jednotlivé intervaly a následně vypočítání metriky nad těmito intervaly. Tato metoda je vhodnější pro celkové zhodnocení analyzovaného měření a jeho případné porovnávání s dalšími měřeními. Výsledné JFI je možné vypočítat jako střední hodnotu či medián ze získaných dílčích výsledků. Problémem ovšem je, že hodnoty JFI, jak již bylo zmíněno, závisí na délce zvoleného intervalu [L23], což může vnést do měření značné nepřesnosti.

Další problém vyvstává pokud v komunikaci koexistují spojení, která jsou po většinu času neaktivní a v době aktivity přenášejí data ve shlucích. Pokud takové spojení koex-

<sup>7</sup>Výpočet nad celou délkou měření nemusí být vhodný z důvodů zamaskování lokálních problémů v rámci probíhající komunikace a to specificky v případech, kdy jsou data měřená v delším období. Běžně pracujeme s měřeními dat, která jsou zaznamenávána po dobu 24h.

istuje s mixem dalších rychlejších a chceme počítat metriku založenou na JFI, přináší to další zásadní problém, jakým způsobem stanovit délku intervalu pro výpočet JFI. Obrázek 2.5 ukazuje jakým způsobem může být ovlivněna hodnota metriky založené na JFI. Obrázek jasně demonstruje závislost metriky založené na JFI na délce zvoleného intervalu a to navíc za situace, kdy analyzované datové toky měly podobný charakter.

Problematika použití metrik založených na JFI je rovněž popsána v článku [B1], kde je ukázána jejich závislost na správné aplikaci a parametrizaci, která musí odpovídat specifikům zdroje komunikace a charakteru zátěže měřené sítě.



Obr. 2.5: Vliv intervalu na hodnotu JFI metriky při analýze dat (profil Dual) scénáře CSMA/CA.

Je nutné si uvědomit, že vybrat správný interval není jednoduché. Pokud vybereme příliš krátký interval, pak lze vyzpozorovat, že daný interval nemusí pokrývat síťové události, které se vyskytují periodicky v čase, pokud je perioda delší než zvolený interval. V případě příliš dlouhého intervalu, zase naopak dochází ke ztrátě informace díky průměrování výsledků napříč sledovaným intervalem.

Další problém se skrývá ve skutečnosti, že metriky založené na JFI sice mohou dobře fungovat i za situace, kdy optimální přidělení prostředků neznamena, že jsou prostředky přiděleny rovnoměrně. Nicméně v tomto specifickém případě je nutné znát, jak mají být prostředky přiděleny.

## 2.5.2 Ostatní metriky

Kromě hojně používaného JFI existují i další metriky založené na férovém přístupu k prostředkům. Nicméně postrádají některé vlastnosti JFI a většinou jsou orientované na řešení specifického problému. Jako zástupce můžeme jmenovat epsilon fairness [L25], proportional fairness [L26], či max-min fairness [L27].

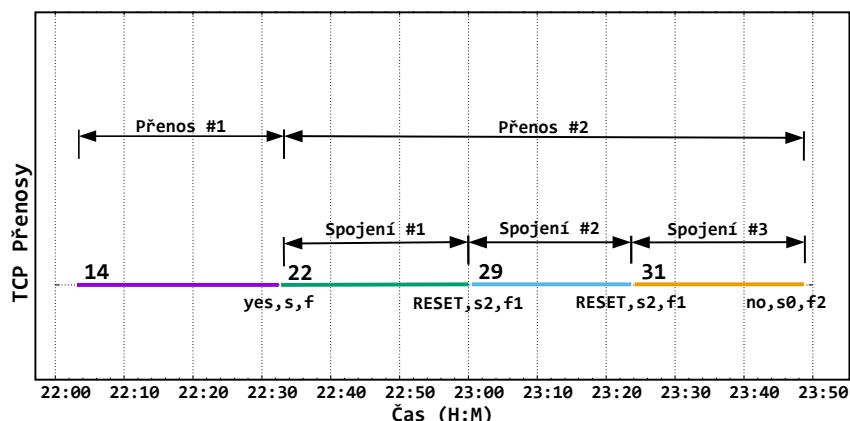
## 2.6 Metriky založené na sledování stavových informací protokolu TCP

Při analýze dat z energetických sítí jsme v rámci naší pracovní skupiny narazili na problém, jakým způsobem analyzovat komunikaci zachycenou ve formě PCAP souborů z reálné úzkopásmové komunikační sítě a hlavně, jakým způsobem tuto síť následně optimalizovat. Při zvážení řady aspektů a zhodnocení různých přístupů k řešení jsme došli k závěru, že bude výhodnější zaměřit se na jednodušší metriky, než složitě zpracovávat komplexní data. Na základě těchto úvah vznikla metrika, která byla opřena o vyhodnocení přenosu TCP na základě stavových informací tohoto protokolu.

V rámci naší pracovní skupiny na katedře telekomunikací byly vytvořeny dvě velmi podobné metriky, které se liší způsobem, jakým hodnotí jednotlivá spojení. První metrika byla označena jako CER (Connection Error Rate) a druhá jako TER (Transmission Error Rate). Případně pro danou skupinu metrik používáme označení CER/TER [B3].

Graf na obrázku 2.6 ukazuje rozdíly v definici pojmů spojení (connection) a přenos dat (transmission) tak, jak jsou chápány v kontextu metrik CER a TER. Tento typ reprezentace a zobrazení jednotlivých spojení v rámci zachyceného provozu je významný pro vizualizaci a následné porozumění průběhu jednotlivých spojení a celkové úspěšnosti přenosu dat. Tento typ zobrazení rovněž umožňuje jednoduchým způsobem identifikovat, kde dochází k rozpadům spojení (RST, jednostranná signalizace FIN, vypršení spojení), (znovu) navázání (3-way handshake) a úspěšnému dokončení přenosů dat (4-way handshake). V rámci uvedeného grafu jsou rovněž vyobrazeny stavové informace protokolu TCP, které signalizují, v jakém stavu se spojení nachází, případně, proč bylo ukončeno a zda je dané spojení či přenos vyhodnocen jako řádně ukončený či nikoliv.

Na obrázku 2.7 je ukázka zpracování reálného PCAP záchytu právě ve formě



Obr. 2.6: TCP spojení vs. TCP přenosy.

časového diagramu TCP spojení.

Analýzu protokolu TCP z pohledu sledování stavových informací je možné provádět například pomocí nástroje TCPtrace [L29]. Tento nástroj umožňuje analyzovat protokol TCP a vytvářet specifické grafy vztahující se k jednotlivým parametrům tohoto protokolu. Pomocí TCPtrace lze rovněž získat detailní informace o analyzovaném TCP spojení. Tyto informace je možné následně využít právě pro sestavení grafu, který byl představen na obrázku 2.6.

Obrázek 2.7 následně ukazuje, jak vypadá reálná analýza zachyceného provozu z pohledu sledování stavových informací protokolu TCP.

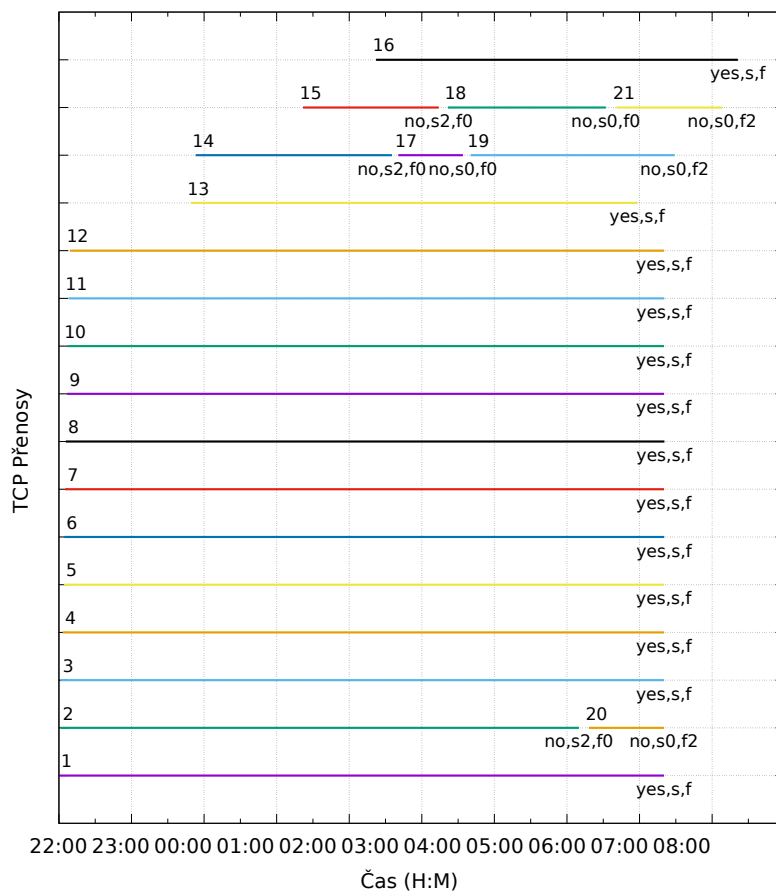
### 2.6.1 Metrika CER

Tato metrika hodnotí komunikaci z pohledu samostatných spojení. Jak vyplývá ze vzorce 2.2, dává metrika do poměru všechna úspěšně dokončená spojení vůči všem spojeníům za sledovanou dobu.

$$CER = \frac{C_{bad}}{C_{good} + C_{bad}} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Kde:

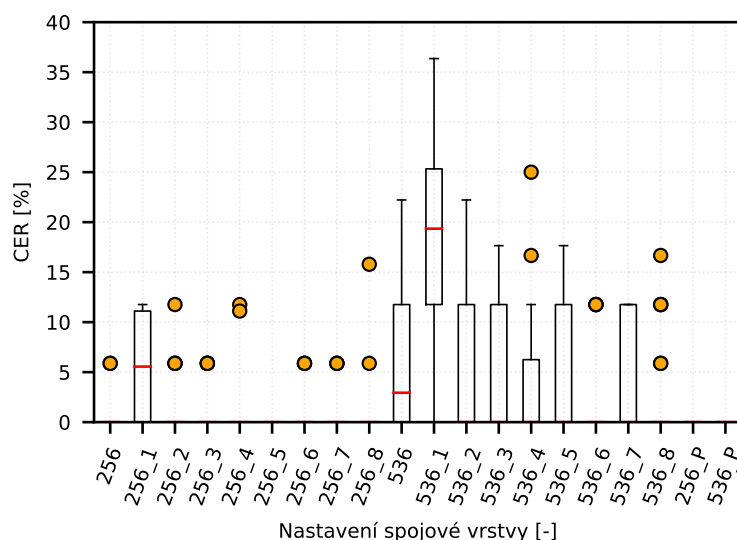
- $C_{good}$  – počet úspěšně dokončených spojení,
- $C_{bad}$  – počet neúspěšně dokončených spojení.



Obr. 2.7: Ukázka reálného grafu analýzy založené na sledování stavových informací protokolu TCP.

Tato metrika se ukázala být funkční a přínosná v oblasti optimalizací přenosového řetězce v rámci původního řešení firmy Racom s.r.o. modemu RipEX-300. Metrika umožnila jednoduchým způsobem analyzovat velké množství dat, která byla výstupem ze simulačního modelu v prostředí Omnet++. Metrika ukázala, že současnou komunikaci je možné optimalizovat jednak v rovině nastavení samotného TCP protokolu a to především zmenšením velikosti TCP segmentu (MSS) ze standardní hodnoty 536 B na hodnotu 256 B, případně nižší (s ohledem na podíl velikosti přenášených paketů). Dále také v rovině úpravy samotného protokolu spojové vrstvy, kde se aplikací specifického časovače nad pakety ve frontách podařilo dosáhnout zlepšení udržitelnosti spojení.

Graf na obrázku 2.8 ukazuje možnosti použití metriky CER.



Obr. 2.8: Ukázka výstupu metriky CER při analýze dat (profil Dual) scénáře CSMA/CA.

## 2.6.2 Metrika TER

Tato metrika hodnotí komunikace z pohledu realizovaných přenosů. Jak vyplývá ze vzorce 2.2, metrika dává do poměru všechny úspěšně realizované přenosy vůči všem přenosům v analyzované komunikaci. Metrika vypadá na základě předpisu velmi podobně jako CER, nicméně zásadní rozdíl spočívá právě v pohledu na průběh komunikace. V rámci metriky TER není podstatné, zda dojde při přenosu k jednotlivým selhání spojení, ale komunikace v rámci konkrétního přenosu se hodnotí jako celek. Jediné měřítko tedy je, zda se podaří přenos mezi dvěma páry komunikujících uzlů správně dokončit či nikoliv. Nehraje roli, kolikrát se musí znovu navazovat spojení v důsledku předchozího selhání.

$$TER = \frac{T_{bad}}{T_{good} + T_{bad}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

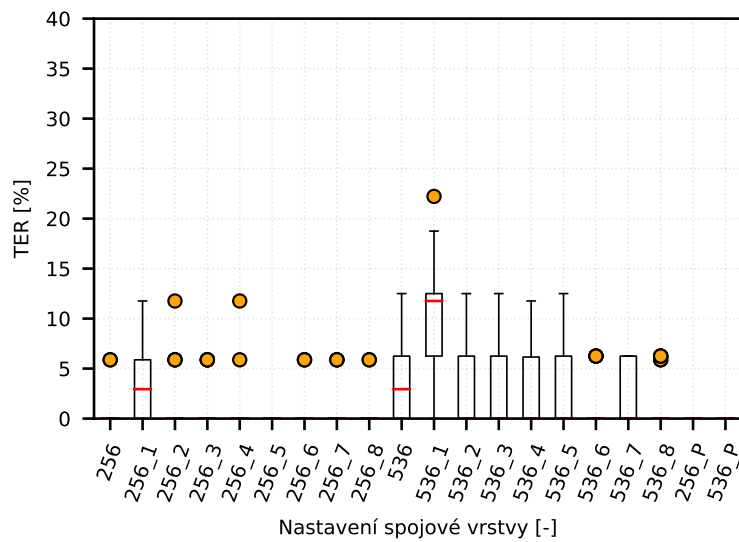
Kde:

- $T_{good}$  – počet úspěšně realizovaných přenosů,
- $T_{bad}$  – počet přenosů, které se nepodařilo dokončit.

Z podstaty fungování metriky CER a TER můžeme odvodit vztah 2.4. To znamená, že výstup metriky TER bude vždy shora ohraničen metrikou CER.

$$TER \leq CER \quad (2.4)$$

Graf na obrázku 2.9 představuje ukázkou použití metriky TER.



Obr. 2.9: Ukázkou výstupu metriky TER při analýze dat (profil Dual) scénáře CSMA/CA.



# Kapitola 3

## Vymezení cílů

Tato práce se zabývá především metodami, které jsou zaměřeny na úzkopásmovou komunikaci v průmyslových sítích. Oproti běžným požadavkům na komunikační infrastrukturu, které jsou většinou opřeny o dohodnuté SLA, je třeba volit odlišný přístup. Běžná hodnocení jsou opřena o tradiční metriky definované v dokumentech IETF a ITU-T, které byly popsány v předchozí kapitole této práce v části 2.3 a 2.4.

V případě úzkopásmových sítí nemusí být zcela relevantní klasické metriky založené na sledování maximální propustnosti, minimální ztrátovosti a minimalizaci zpoždění, tak jak jsou popisovány v doporučeních a standardech IETF a ITU-T. Je evidentní, že v kritických situacích se jeví udržení funkčního, byť o něco pomalejšího spojení, jako výhodné, a to zvláště za předpokladu, že by došlo k selhání spojení takovým způsobem, že by musel být celý přenos opakován. Tímto se zásadním způsobem eliminuje výhoda rychlejšího spojení, protože opakování přenosu může v součtu časů trvat déle, a navíc je mnohem více zatěžován přenosový kanál a tak mohou být ovlivněna i další souběžná spojení.

Cílem této práce je nalezení vhodných algoritmů pro optimalizace přenosového řetězce, které povedou ke zvýšení pravděpodobnosti, že se podaří udržet probíhající spojení a to takovým způsobem, že nebude nutné přenos opakovat v důsledku vypršení spojení. V rámci této práce se budu věnovat převážně tomu, jakým způsobem optimalizovat postupy při sledování a řízení datové komunikace tak, aby bylo možné jednoduchým způsobem identifikovat, zda změny propagované do sítě umožní zlepšit kontinuitu přenosu dat a zvýšit tak pravděpodobnost na udržitelnost aktivního spojení.

Z tohoto důvodu jsem si v disertační práci zvolil následující cíle:

- Analyzovat charakter úzkopásmových sítí z pohledu jejich přenosových vlastností, typického využití a specifických problémů, které jsou spojeny s omezeným přenosovým pásmem.
- Analyzovat problematiku testování sítí s ohledem na úzkopásmové sítě a spojově orientované protokoly.
- Navrhnout novou optimalizační metriku se zaměřením na zlepšení udržitelnosti spojově orientovaných přenosů v úzkopásmových sítích.
- Navrhnout topologii sítě a vybrat vhodné prostředí pro ověření návrhu.
- Vytvořit vhodné modely pro ověření funkce navržené metriky.
- Ověřit vlastnosti nové metriky na vhodném modelu.
- Porovnat novou metriku s aktuálně dostupnými metrikami.
- Na základě výsledků simulací formulovat konkrétní závěry o vhodnosti a způsobu použití nové metriky pro optimalizaci spojově orientovaných protokolů za účelem zlepšení jejich udržitelnosti.

# Kapitola 4

## Zvolené metody a použité prostředky

Na základě stanovených cílů a uvedených skutečností byla využita celá řada pokročilých postupů [L30], které umožnily prozkoumat danou problematiku, navrhnout vhodné řešení a následně ho otestovat.

Na začátku bylo třeba vyhodnotit současný stav problematiky. Vzhledem ke slibným výsledkům metrik CER a TER bylo zajímavé vydat se tímto směrem a dále prozkoumat možnosti, jaké se nabízí v případě, že se zaměříme na pozorování doby přerušování samostatných datových toků. Jistou náповědu poskytuje možnost nastavení nástroje tcptrace. V rámci analýzy je možné upravit hodnotu intervalu pro znovunavázání spojení (ERI), který umožňuje zaujmout v rámci metrik CER/TER kritičtější pohled na analyzovaná data. Při snížení intervalu ERI pod hodnotu vypršení časovače TCP spojení, jsou pak následně všechny prodlevy v komunikaci delší než tento interval považovány za selhání TCP spojení.

Na základě získaných poznatků se jeví výhodné rozdělit další postup na:

1. Analýzu paketových vzdáleností a časových odstupů paketů.
2. Sestavení nové metriky, která bude reflektovat změny v paketových vzdálenostech z pohledu zlepšení kontinuity a udržitelnosti spojení.
3. Sestavení algoritmu, který poskytne rámec pro použití analýzy paketů a nové metriky.

Za účelem ověření daných postupů se jeví jako výhodné použití simulačních nástrojů a modelů. Zejména pro základní ověření navržených postupů včetně pokročilejšího testování. Rovněž lze předpokládat, že nejen při reálném měření, ale i na úrovni simulací, je možné hledat budoucí uplatnění navrhovaných postupů. Použití simulace v úvodní fázi ověřování správnosti návrhu metriky hodnocení paketových vzdáleností se jeví jako výhodné a to zejména vzhledem k faktu, že je takto možné provést mnohem rozsáhlejší testování. Důležitým faktem je, že je možno využít model úzkopásmové sítě založené na modelu úzkopásmového modemu RipEX-300 firmy Racom s.r.o. To je i jeden z důvodů, proč bylo pro ověření návrhu a fungování nově vytvořené metriky zvoleno simulační prostředí Omnet++ [L31] s nadstavbou INET [L32].

Aby bylo možné lépe přiblížit proces testování reálnému nasazení, byl vytvořen speciální generátor síťového provozu UDG (Universal Data Generator) [B1], který je schopný na základě předpisu ve formátu XML vkládat do sítě patřičný profil datového provozu.

Pro záznam a vyhodnocení dat byl použit univerzální formát PCAP, který umožňuje zachytit síťový provoz pro pozdější zpracování. Proto i návrh nástrojů pro zpracování nové metriky musí umět zpracovávat právě tento formát. Velkou výhodou formátu PCAP je, že do stejného formátu je možné zachytávat data jak v rámci simulačního prostředí, tak i v reálné síti, a proto je možné použít metriku, jak nad daty ze simulací tak i nad daty z reálné sítě.

Vzhledem k faktu, že pro simulace je možné využívat výpočetní cluster Metacentrum [L33], jeví se jako výhodné zvážit vhodnost nasazení metriky případně úpravu metodiky tak, aby bylo možné využít výhody, které poskytuje výpočetní cluster. V tomto případě se jedná především o možnost spouštění velkého množství úloh souběžně. Díky tomu se nabízí možnost zkrácení jednotlivých simulačních běhů, což má za následek zmenšení hladiny spolehlivosti. Nicméně lze provádět souběžně značné množství simulací, což nám umožní provést mnoho stejných simulací pouze s tím rozdílem, že použijeme jiné nastavení generátoru náhodných čísel a tím docílíme opětovné navýšení hladiny spolehlivosti.

Následně je možné použít pro reprezentaci výsledků zobrazení pomocí krabicových diagramů, které umožňují zobrazit data přehledným způsobem právě v situacích, kdy je jedno měření mnohokrát opakováno.

Dále je nutné stanovit podmínky, za kterých bude metrika fungovat a případně zvolit postup jakým dosáhnout požadovaných podmínek. Rovněž je nutné porov-

nat výpočetní náročnost nové metriky s již existujícím řešením. Analýza dosažených výsledků bude následně použita jako podklad pro stanovení závěru a doporučení pro další výzkum.

## 4.1 Modelování a simulace sítí

Modelování a simulace sítí s sebou jednak nese celou řadu specifických obtíží ve smyslu přiblížení simulace reálné aplikaci daného modelu a jednak vzhledem k faktu, že v rámci diskrétních simulací je možné implementovat reálné algoritmy s libovolnou mírou abstrakce, je možné celou řadu algoritmů simulovat velmi věrně. Problematika modelování a simulací síťového provozu je popsána v řadě publikací [L34, L35].

Vzhledem k předchozím zkušenostem a dostupnosti modelů úzkopásmových sítí (ať už se jedná o model modemu RipEX-300, tak nově připravovaný model modemu, který by ho měl v řadě oblastí v budoucnosti nahradit), jeví se použití simulačního prostředí Omnet++ a jeho nadstavby INET jako vhodná volba.

Pro ověření navrhovaných algoritmů byly vybrány tři základní topologie. Jednoduchá DumbBell s jednou frontou FIFO v úzkém hrdle sítě pro základní ověření funkčnosti. Dále topologie s modelem modemu RipEX-300, která implementuje přístupové metody na bázi CSMA/CA. Nakonec byla použita topologie využívající nově vyvíjený modelem modemu, který funguje na bázi přístupových metod z rodiny TDMA. Protože vlastní sestavení modelů a simulačních scénářů není až tak podstatné ve vztahu k cílům této práce, je popis omezen na základní vlastnosti jednotlivých modelů, což je dostatečné pro ilustraci simulačních scénářů a důvodů pro jejich užití. Specifická nastavení budou uvedena v pozdějším textu.

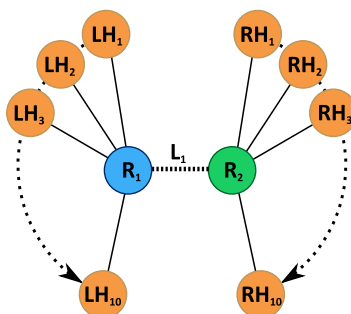
### 4.1.1 Prostředí Omnet++/INET

Toto řešení má výhodu v tom, že daná kombinace prostředí v sobě nese implementaci potřebných základních síťových modulů jako je podpora emulace nižších vrstev komunikace (L1-L3) včetně bezdrátových sítí. Dále je možné zmínit podporu rodiny protokolů TCP/IP včetně základních aplikací pro generování a obsluhu provozu. Prostředky pro omezení šířky pásma, chybovost a zpoždění jsou rovněž implementovány. Velkou devizou tohoto řešení je modulárnost a možnost implementace vlastních modulů. Simulace tak nejsou omezeny pouze na předem definované scénáře či využívání

interních modulů, ale je možné jednoduchým způsobem implementovat vlastní moduly a sestavovat vlastní scénáře pro simulace.

#### 4.1.2 Základní testovací scénář DumbBell (FIFO)

Tento scénář je výhodný pro základní sadu testů a jednoduché ověření funkčnosti navrhovaného řešení. Výhodou je značná predikovatelnost výsledků, a proto je možné snadno posoudit, zda výsledky odpovídají zadaným kritériím. V kombinaci topologie DumbBell a jedné fronty FIFO v úzkém hrdle sítě je možné vytvořit právě takové prostředí, které dobře poslouží pro základní sadu testů. Ukázka takové topologie je na obrázku 4.1. Výhodou použití fronty FIFO a kanálu s protokolem PtP je možnost jednoduše definovat šířku přenosového pásma v bitech za sekundu a navíc je možné definovat zpoždění a chybovost BER (Bit Error Rate) či PER (Packet Error Rate). S vhodným nastavením takto omezeného kanálu můžeme, velmi zjednodušeně řečeno, simulovat průchod dat úzkopásmovou sítí. A navíc, protože používáme pouze jednoduchou FIFO frontu v rámci definovaného kanálu, můžeme i předpovídat vliv daných parametrů na přenášený provoz. Především tedy ve smyslu zlepšení, či zhoršení přenosových podmínek.



Obr. 4.1: Základní topologie typu DumbBell (FIFO).

Na obrázku 4.1 pak  $LH_x$  a  $RH_x$  označují sady komunikujících hostů.  $R_1$  a  $R_2$  jsou směrovače, které sdružují komunikaci jednotlivých hostů a rovněž slouží pro záchyt dat do PCAP souborů.  $L_1$  pak označuje sdílený omezený přenosový kanál.

### 4.1.3 Testovací scénář CSMA/CA

Scénář je založený na modelu modemu RipEX-300. Tento scénář je významný z několika konkrétních důvodů. Práce nad diagnostikou reálného zachytu komunikace ze sítě postavené nad touto technologií vedla k vytvoření sady diagnostických nástrojů, včetně již zmiňované metriky CER/TER. Rovněž jde o simulační model, u kterého známe výsledky reálného porovnání výkonnostních parametrů vůči reálnému nasazení v produkčním prostředí. Další skutečností je, že i použitá topologie byla konfrontována s reálnou topologií a její nastavení bylo optimalizováno tak, aby alespoň v základních aspektech odpovídala jedné z reálných topologií. Další nesporná výhoda se skrývala v možnosti otestovat různé nastavení MAC vrstvy daného modemu a to nejen z pohledu úpravy některých minoritních parametrů, ale i z pohledu komplexní změny celého protokolu MAC vrstvy. V tomto konkrétním případě můžeme jmenovat jak původní řešení na bázi CSMA/CA přístupu, tak i vylepšenou variantu, které umožňovala modifikovat dobu maximální setrvání paketů ve frontě před jejich zahazením.

V rámci představeného modelu je rovněž možnost využít experimentální implementaci polling protokolu (modifikovanou pro tento typ sítě) na úrovni MAC vrstvy, což de facto posunulo původní přístup k médiu z CSMA/CA na úroveň zjednodušeného modelu TDMA<sup>1</sup>.

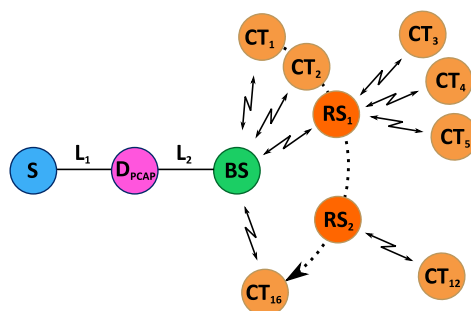
Zmíněné důvody umožňují porovnávat chování algoritmů metrik nad celou škálou testovacích scénářů, ale i provádět testování nad modelem, který má reálné základy v produkčním nasazení. Rovněž lze považovat za výhodu možnost porovnat nově navrhovanou metriku s metrikami CER/TER, které byly právě vyvíjeny za účelem testování výstupů měření nad tímto typem sítě.

Ukázka použité topologie je uvedena na obrázku 4.2.

Na obrázku 4.2 jsou komunikující terminály označeny  $CT_x$ .  $RS_1$  označují retranslace,  $BS$  pak označuje základovou stanici, která sdružuje veškerou komunikaci jednotlivých terminálů.  $D_{PCAP}$  je bodem zachytu dat do PCAP souborů. A  $S$  označuje server vůči kterému byla testována komunikace skrz jednotlivé terminály. Propojení  $L_x$  zde nepředstavuje žádné omezení z pohledu komunikace.

---

<sup>1</sup>I přes použití polling protokolu v některých měřeních bude tento scénář označován jako CSMA/CA a to z důvodu minoritního významu výsledků měření polling protokolu, které slouží spíše pro ukázkou širokého rozsahu nasazení uvedených metrik a ukázkou diametrálně odlišného chování při změně přístupové metody k médiu.

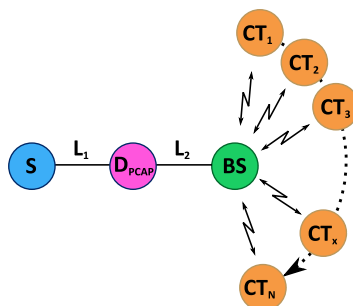


Obr. 4.2: Topologie založená na modelu CSMA/CA modemu.

#### 4.1.4 Testovací scénář TDMA

Jedná se o scénář založený na modelu nově vyvíjeného modemu, který by měl v budoucnu nahradit modem RipEX-300. Ten je založen na přístupové metodě TDMA. Na vývojové verzi nového modemu je tedy možné testovat algoritmy prezentované metrikou právě za účelem optimalizace přenosových vlastností nového modemu. Specifikem tohoto modelu je řízení čistě na bázi algoritmu round-robin, což předurčuje, že síťové prostředky by v rámci tohoto scénáře měly být přidělovány férově.

Ukázka použité topologie je v tomto případě bez retranslací<sup>2</sup> a lze ji nalézt na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Topologie založená na modelu TDMA modemu.

I zde  $CT_x$  označuje komunikující terminály.  $BS$  je základovou stanicí, která sdružuje a navíc i řídí veškerou komunikaci jednotlivých terminálů.  $D_{PCAP}$  označuje bod pro záchyt dat do PCAP souborů. A  $S$  je serverem, vůči kterému byla testována komunikace skrz jednotlivé terminály. Propojení  $L_x$  zde nepředstavuje žádné komunikační omezení.

<sup>2</sup>V době psaní této práce nebyl simulační model bohužel v takovém stavu, aby umožnil rozsáhlé simulace s použitím retranslací, i tak lze považovat dosažené výsledky za významné



## 4.2 Význam paralelních simulací

Vzhledem ke zvoleným metodám vyhodnocení výsledků, které budou diskutovány v jedné z dalších sekcí a faktu, že s komplexností simulačního modelu rovněž zásadním způsobem klesá i poměr plynutí času v simulacích vůči reálnému času, je třeba zvolit vhodnou strategii měření a vyhodnocování výsledků. Za předpokladu, že máme možnost využívat systémy, které umožňují souběžné zpracování více úloh, jeví se jako výhodné upřednostnit raději více opakování simulačních běhů, které je tím pádem možné zkrátit. To má sice negativní dopad na přesnost výsledku v rámci jednoho simulačního běhu, ale na druhou stranu pokud současně budeme simulační běh se stejným nastavením opakovat, můžeme docílit požadované přesnosti výsledků. Opakování simulačního běhu má samozřejmě význam jen v případě, když provedeme odlišnou inicializaci generátoru náhodných čísel pro konkrétní simulační běhy. Výsledky je nutné následně zpracovat na základě statistiky.

Při rozložení simulací do více běhů jsou kladeny vyšší nároky na složitost provedení jednotlivých simulací a rovněž je rozumné očekávat, že objem dat pro zpracování bude výrazně větší než v případě simulace jednoho běhu, nicméně lze předpokládat, že v řadě případů je možné provádět simulace přesněji a v konečném důsledku, při paralelním zpracování, i mnohem rychleji. Vliv počtu potřebných opakování simulací na základě požadované míry spolehlivosti střední hodnoty je popsán v části 4.4.2.

To je i jeden z důvodů, proč je výhodné použít výpočetní infrastrukturu Metacentra. Při dostatečně volné kapacitě výpočetních uzlů je možné dosáhnout počtu běhů sahající k hranici tisíce současně prováděných úloh. Což je za situace, kdy je třeba simulovat dlouhé běhy a kdy simulace jednoho běhu zabere několik hodin reálného času, velká výhoda. A navíc počet běhů velmi rychle roste s počtem parametrů, u kterých se hledá optimální kombinace v rámci jednotlivých scénářů.

Náročnost výpočtu v závislosti na počtu optimalizačních parametrů, počtu možností nastavení jednotlivých parametrů a počtu opakování měření pro základní čas výpočtu jednoho běhu 300 s. demonstruje tabulka 4.1.

Parametry	Nastavení parametru	Opakování	Počet běhů	Čas výpočtu
1	12	20	240	20 hodin
2	12	20	2880	10 dní
3	12	20	34560	120 dní
4	12	20	414720	~ 4 roky

Tab. 4.1: Nárůst celkového počtu simulačních běhů a celkového času výpočtu.

### 4.3 Modelování a simulace síťového provozu

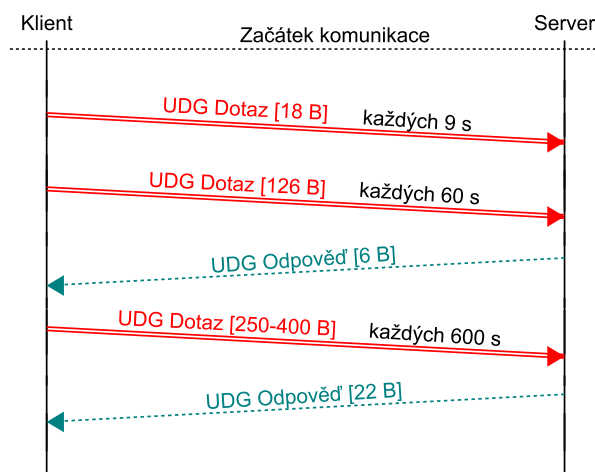
Volba vhodné zátěže sítě je důležitým faktorem při testování sítí i při ověřování správného návrhu optimalizačních metrik. Vhodný charakter provozu z pohledu intenzity, změn intenzity, velikosti zpráv a jejich vzájemného provázání hraje významnou roli při odhalování potenciálně slabých míst v návrhu.

Pokud se zaměříme na úzkopásmové sítě je specifická charakteristika provozu velmi důležitá. Konkrétní nasazení úzkopásmové technologie je většinou svázáno i s konkrétním typem provozu a dá se předpokládat, že jejich využití je jiné, než u sítí jejichž smyslem je prosté zpřístupnění internetových služeb.

Pro testování úzkopásmových sítí je vhodné použít několik specifických profilů pro generování různorodé zátěže a modelování datového provozu, pro který jsou tyto sítě určeny. Vzhledem k faktu, že jedna z rozsáhlých oblastí jejich využití je také přenos telemetrický dat v průmyslových oblastech, je vhodné zaměřit testování i tímto směrem. V následujících odstavcích budou detailněji popsány specifika testovacího datového provozu.

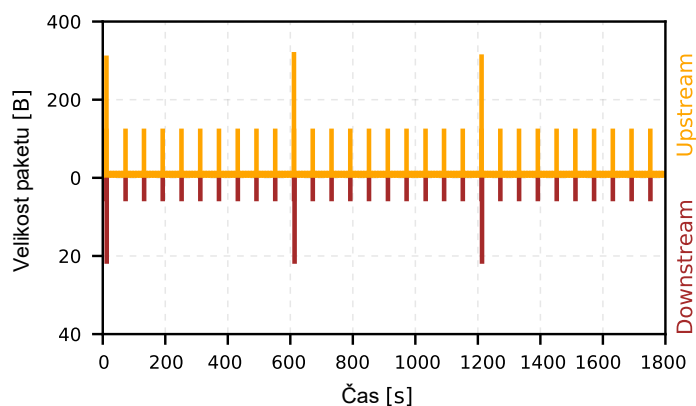
#### 4.3.1 IEC 60870-5-104

Jedním z významných protokolů, který se dnes používá pro komunikaci v rámci systémů SCADA, je protokol IEC 60870-5-104. Po prozkoumání konkrétních záchyťů tohoto protokolu byl vytvořen jeho model pro následné simulace [L36]. Sekvenční diagram na obrázku 4.4 detailně popisuje, jakým směrem a způsobem (vztah požadavek a odpověď) jsou zasílány jednotlivé zprávy.



Obr. 4.4: Sekvenční diagram - profil IEC 60870-5-104.

Na diagramu 4.5 je zachycen časový profil generovaného provozu v rámci simulací. Na rozdíl od sekvenčního diagramu poskytuje lepší přehled o množství generovaného provozu, nicméně nelze z něho vyčíst, jak jsou jednotlivé zprávy závislé.



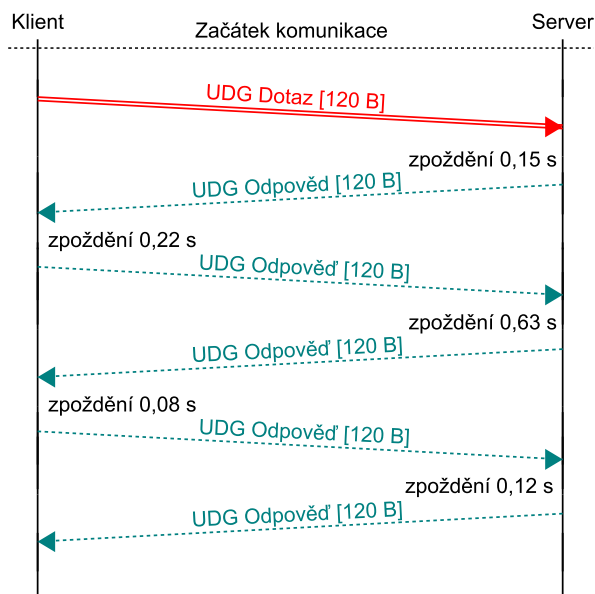
Obr. 4.5: Časový diagram - profil IEC 60870-5-104.

### 4.3.2 Dual

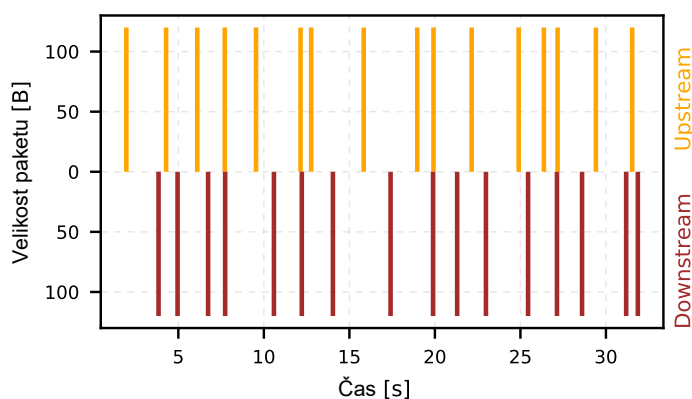
Tento profil byl sestaven za účelem testování sítě při zvýšeném zatížení. Důležitou vlastností tohoto profilu je určitá schopnost samo-regulace. Zatížení sítě je v tomto profilu závislé pouze na počtu současných spojení a velikosti přenášených zpráv. Regulace tohoto protokolu probíhá tím způsobem, že v daný moment může síť putovat

pouze jedna zpráva v rámci každého spojení, jak je patrné ze sekvenčního diagramu 4.6.

Časový diagram 4.7 pro jedno spojení ukazuje pravidelné střídání zpráv ve směru „upstream“ a „downstream“. V případě tohoto profilu je nutné dodat, že není vhodný pro simulaci zátěže, která nemá zaručené doručení zpráv. Pokud dojde ke ztrátě zprávy, je komunikace pro dané spojení nenávratně přerušena.



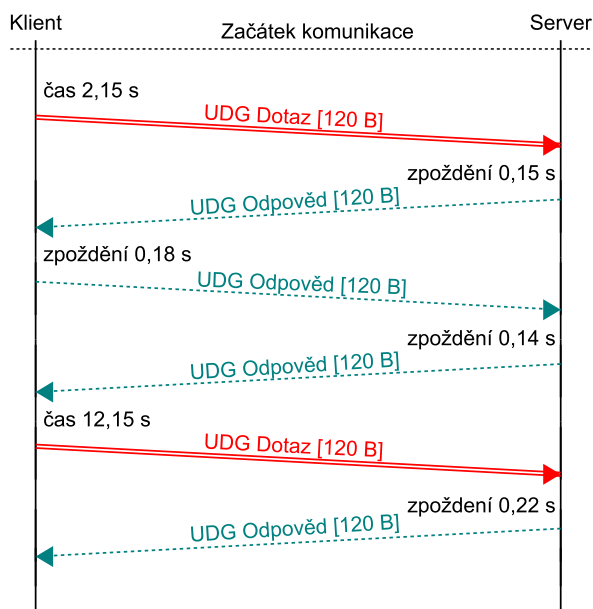
Obr. 4.6: Sekvenční diagram - profil Dual.



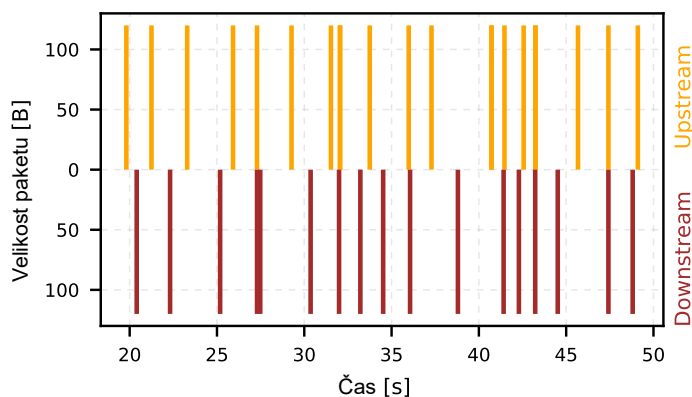
Obr. 4.7: Časový diagram - profil Dual.

### 4.3.3 ZigZag

Tento profil byl také sestaven za účelem testování sítě při zvýšeném zatížení. Pokud porovnáme časový diagram 4.9 s datovým profilem Dual, pak na první pohled neuvidíme žádný zásadní rozdíl. Stejně tak sekvenční diagram 4.8 je téměř stejný. Zásadní rozdíl je ukryt ve skutečnosti, že v tomto profilu je komunikace startována opakovaně v předem definovaný čas bez ohledu na to, zda se stihla dokončit předchozí sekvence. To má zásadní dopad na síť, která je zahlcená provozem, protože na rozdíl od předchozího profilu, který měl regulační vlastnosti, tento profil naopak míru zátěže ještě dále zvyšuje.



Obr. 4.8: Sekvenční diagram - profil ZigZag.



Obr. 4.9: Časový diagram - profil ZigZag.

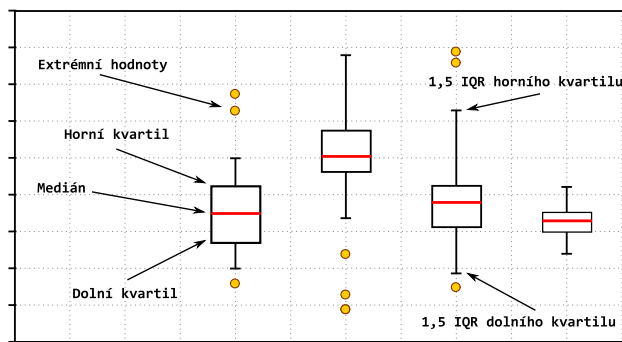
## 4.4 Zpracování výsledků simulací

Vhodná a srozumitelné prezentace výsledků je velmi důležitá, a proto bylo zvoleno ve většině případů grafické znázornění. A to jak pro ukázky týkající se samotné metriky TOM, tak i pro porovnání s dalšími přístupy.

Vzhledem k faktu, že ve většině případů dochází ke zpracování celých datových sad a k tomu, že u simulací bylo výhodné volit více kratších simulačních běhů je výsledné grafické zpracování provedeno pomocí krabicových diagramů (Box Plot). Toto zobrazení přináší celou řadu výhod. Umožňuje totiž přehledným způsobem zobrazit celou škálu statisticky zajímavých informací, jakými jsou kvartil, střední a maximální hodnota a to takovým způsobem, který zachovává snadnou čitelnost a přehlednost samotného grafu. Zvláště v případě velkého počtu zpracovávaných hodnot v rámci konkrétní datové sady.

### 4.4.1 Krabicový diagram

Obrázek 4.10 ukazuje, jakým způsobem jsou data interpretována pomocí krabicového diagramu. Jak je patrné z obrázku, tak v rámci krabicového diagramu jsou zobrazeny: medián, horní a dolní kvartil včetně navýšení o 1,5 násobek kvartilového rozpětí (IQR) a odlehlé hodnoty. Ve většině případů se používá varianta diagramu, kde je zobrazen pouze medián. Nicméně je zde i možnost zobrazení střední hodnoty, případně obou hodnot.



Obr. 4.10: Krabicový diagram.

#### 4.4.2 Ověření míry spolehlivosti výsledků

Pro docílení požadované přesnosti je třeba stanovit specifický počet opakování, který je závislý na řadě faktorů. Vzhledem k faktu, že není možné jednoduše vzít v potaz celou škálu parametrů, které mají vliv na přesnost výsledku, používá se odhad počtu opakování a následně vyhodnocení dosažené hladiny přesnosti [L37]. Pokud není dosaženo požadované hladiny přesnosti, je nutné přidat další opakování a to do doby, než je dosaženo dostatečně úzkého intervalu spolehlivosti výsledků. V tomto konkrétním případě střední hodnoty či mediánu<sup>3</sup>.

V prvním kroku je třeba z naměřených dat vypočítat rozptyl, potažmo směrodatnou odchylku metriky viz rovnice 4.1.

$$s^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N - 1} \quad (4.1)$$

V dalším kroku je možné na základě kvantilů Studentova rozdělení přímo vypočítat interval spolehlivosti, kde se výpočet v případě předpokládané symetrie řešení zredukuje na rovnici 4.2.

$$CI_{1-\alpha} = 2 \cdot t_{(1-\frac{\alpha}{2}), N-1} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (4.2)$$

V posledním kroku zbývá pouze vyhodnotit velikost intervalu spolehlivosti vůči požadavkům na jeho velikost. V případě, že se ukáže, že je velikost intervalu příliš

<sup>3</sup>Výpočet se liší pro výpočet intervalu spolehlivosti mediánu

velká, je nutné navýšit počet opakování simulací, případně prodloužit dobu jejich trvání z pohledu objemu dat.

V některých případech, především pokud chybí další vodítka pro stanovení vhodné velikosti intervalu spolehlivosti, může být rovněž užitečné stanovení poměru intervalu spolehlivosti vůči směrodatné odchylce (viz nerovnice 4.3). V tomto případě je možné stanovit požadavek na nějaký konkrétní poměr (3/2, 1/1 či 1/2). V případě stanovení poměru pod úrovní 1/2 můžeme očekávat, že potřebný počet opakování bude značný a v řadě případů je toto kritérium mnohem přísnější, než vyžaduje praxe.

$$\frac{RI}{s} < P \quad (4.3)$$

V rámci ověřování výsledků optimalizačních metrik se jako optimální přístup jeví stanovení intervalu spolehlivosti tak, aby nedocházelo k překryvu potenciálního výskytu výsledků na dané hladině významnosti vůči dalším měřením. Samozřejmě i s přihlédnutím k dalším parametrům zkoumaných metrik a jejich výsledků.



# Kapitola 5

## Výsledky disertace a nové poznatky

Tato kapitola je tématicky rozčleněna do několika částí:

- První část je věnována charakteru provozu a jeho vlivu na výstupy optimalizačních metrik.
- Druhá část je věnována principům analýzy komunikace na úrovni paketů a vzdáleností mezi nimi.
- Třetí část je věnována nové metrice pro optimalizaci datových přenosů.
- Čtvrtá část je věnována problematice parametrizace nové optimalizační metriky.
- Pátá část je věnována testování nové optimalizační metriky.
- Šestá část je věnována porovnání s metrikami založenými na JFI.
- Závěrečná část je věnována porovnání výpočetní náročnosti nové metriky.

## 5.1 Vliv charakteru provozu

Za účelem testování úzkopásmových sítí jsem vytvořil univerzální datový generátor (UDG), který je možné využít v simulačním prostředí Omnet++ s nadstavbou INET. Výhodou tohoto generátoru je bezesporu fakt, že je nejen schopný generovat data dle připraveného XML předpisu 5.1, ale zasílání zpráv je možné podmínit přijetím konkrétní zprávy a to nejen v rámci daného komunikačního spojení, ale napříč celou komunikací mezi danými uzly. Je tak možné vytvořit komplexní schéma, které umožňuje testovat přenos dat na základě komunikace konkrétních aplikací a rovněž je možné simulovat i případné procesní zpoždění [B2] vkládáním prodlev do komunikace, které odpovídají například době zpracování či průchodu paketu konkrétním systémem.

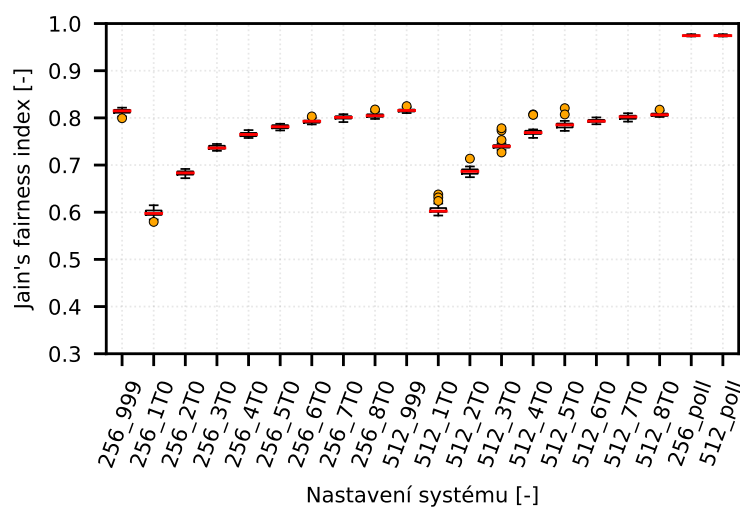
UDG není omezen pouze na odesílání jednotlivých paketů, ale vzhledem k možnosti nastavit velikost paketu na libovolnou velikost, dokáže rovněž emulovat komunikaci na úrovni datových zpráv. Je tedy možné emulovat zaslání požadavku o velikosti v řádu kilobytů a v reakci na úspěšné přijetí dané zprávy odeslat odpověď o velikosti v řádu megabytů, respektive dané velikosti jsou omezeny pouze technickými možnostmi simulačního prostředí. To umožňuje simulovat velkou škálu protokolů včetně přenosu souborů různých velikostí. Nicméně to neeliminuje možnost simulací datového provozu na paketové úrovni (stačí držet velikost zasílaných zpráv na požadované velikosti a správně nastavit časy odesílání jednotlivých zpráv) [B1]. Následující výpis představuje XML ukázkou komunikačního předpisu pro UDG.

Ukázka datového profilu UDG ve formátu XML.

```
<profiles ver="0.1">
  <profile id="0">
    <params>
      <type>TCP/IP</type>
      <src_ip>10.0.0.2</src_ip>
      <src_port>15000</src_port>
      <dst_ip>10.0.0.14</dst_ip>
      <dst_port>2400</dst_port>
    </params>
    <data>
      <pkt dir="sd" id="0">
        <time>11.242</time>
        <payload size="120" type="rnd"/>
      </pkt>
      <pkt dir="ds" id="1" pprev="-1" prev="0">
        <time>0.703</time>
        <payload size="120" type="rnd"/>
      </pkt>
      <pkt dir="sd" id="2" pprev="-1" prev="1">
        <time>1.42</time>
        <payload size="120" type="rnd"/>
      </pkt>
      <pkt dir="ds" id="3" pprev="-1" prev="2">
        <time>0.875</time>
        <payload size="120" type="rnd"/>
      </pkt>
    </data>
  </profile>
  <profile id="1">
    ...
  </profile>
  ...
</profiles>
```

Grafy na obrázcích 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4 ukazují jaký má různý typ provozu dopad na férovost přidělení síťových prostředků, respektive, jak řízení na aplikační úrovni ovlivňuje přidělování prostředků na síťové úrovni.

Pokud porovnáme grafy průběhů JFI pro měření na základě datových profilů Dual a ZigZag, pak na první pohled vypadají průběhy podobně. Nicméně při bližším zkoumání zjistíme, že hodnoty JFI v případě měření u profilu ZigZag jsou přibližně o 20% nižší, což jasně ukazuje na významně menší férovost při přidělování síťových prostředků.



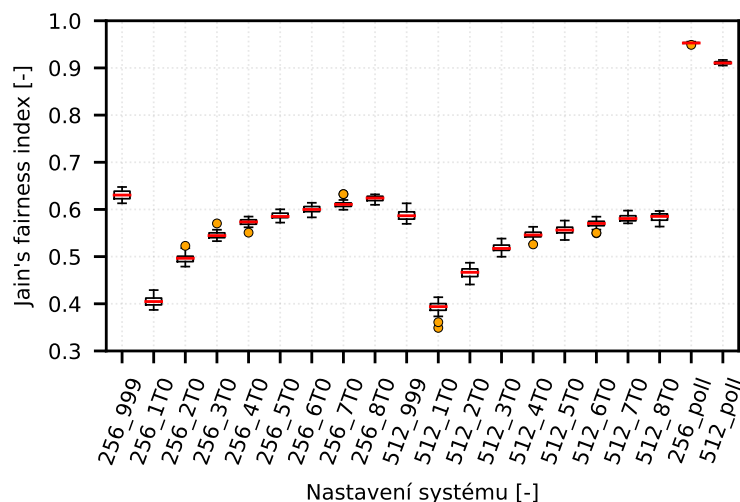
Obr. 5.1: JFI, interval 600 s, CSMA/CA, profil Dual.

Rovněž si můžeme všimnout, že v případě použití profilu „ZigZag“, jsme schopni zaznamenat různou hodnotu JFI i v případě použití „Polling protokolu“ (poslední dva výsledky v grafu) na úrovni spojové vrstvy<sup>1</sup>.

Zásadně jinou situaci můžeme pozorovat v případě použití datového profilu IEC 60870-5-104. Na základě obrázku 5.3 se zdá, že interval délky 600 sekund není pro výpočet hodnot JFI vhodně zvolený, respektive je otázkou, zda je problém ve volbě délky intervalu, nebo zda je na vině zvolený datový profil. To se dobře ukazuje v případě, že porovnáme grafy na obrázcích 5.3 a 5.4, kde je JFI počítáno na intervalu 1800 sekund. Došlo k ustálení výsledků, jak je patrné z kvartilového rozpětí, které je v tomto případě menší.

I když jsou na grafu na obrázku 5.4 patrné trendy ve změně JFI na základě volby

<sup>1</sup>Tady je ovšem třeba upozornit na fakt, že výsledky jsou do jisté míry ovlivněny volbou délky intervalu a v případě jinak dlouhého intervalu, by nemusely být srovnatelné.



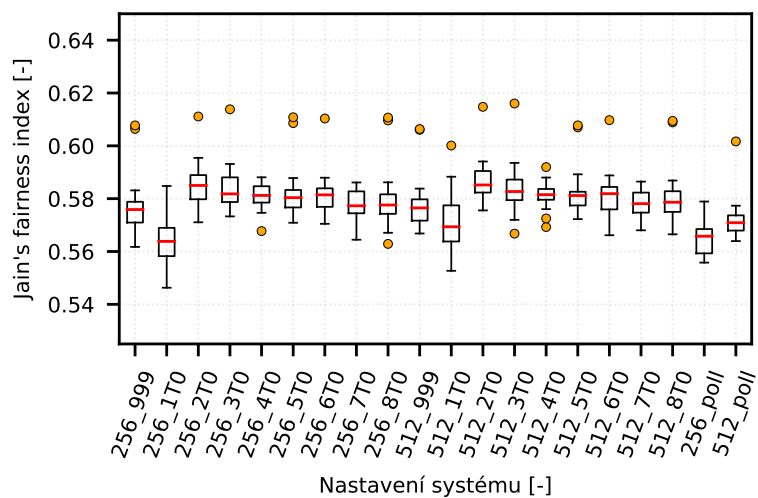
Obr. 5.2: JFI, interval 600 s, CSMA/CA, profil ZigZag.

doby setrvání paketů ve frontách, je rozmezí hodnot JFI značně omezené, a proto se domnívám, že optimalizace provozu vůči tomuto typu provozu nebude snadný úkol.

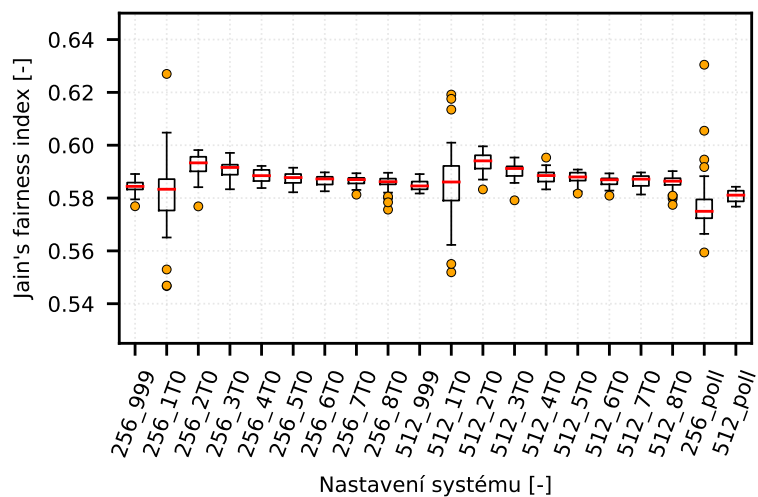
Na zmiňovaných výsledcích pro měření pomocí datového profilu „IEC-60870-5-104“ je rovněž zajímavé, že ačkoliv hodnota JFI byla v případě použití protokolu spojové vrstvy „Polling“ značně vyšší (blížila se hodnotě jedna) u profilů Dual a ZigZag však vykazuje nižší a z pohledů optimalizací dokonce horší výsledky na základě JFI metriky než v případě použití stochastického (CSMA/CA) protokolu spojové vrstvy.

### 5.1.1 Shrnutí dílčích výsledků

Tato část se věnovala zkoumání, jakým způsobem je ovlivněn datový přenos na základě volby specifického datového profilu komunikace. Jak měření a jejich vyhodnocení ukázala, vliv charakteru provozu je značný a je možné jej demonstrovat například při použití metriky, která byla založena na JFI. Výsledky jsou názorně ukázány ve formě krabicových grafů na obrázcích 5.1, 5.2, 5.3 a pro vyloučení volby příliš krátkého intervalu metriky založené na JFI i na obrázku 5.4. Měření ukázala, že se specifický charakter provozu projeví jak u přístupových metod na bázi CSMA/CA, tak i v případě přístupových metod na bázi TDMA.



Obr. 5.3: JFI, interval 600 s, CSMA/CA, profil IEC 60870-5-104.



Obr. 5.4: JFI, interval 1800 s, CSMA/CA, profil IEC 60870-5-104.

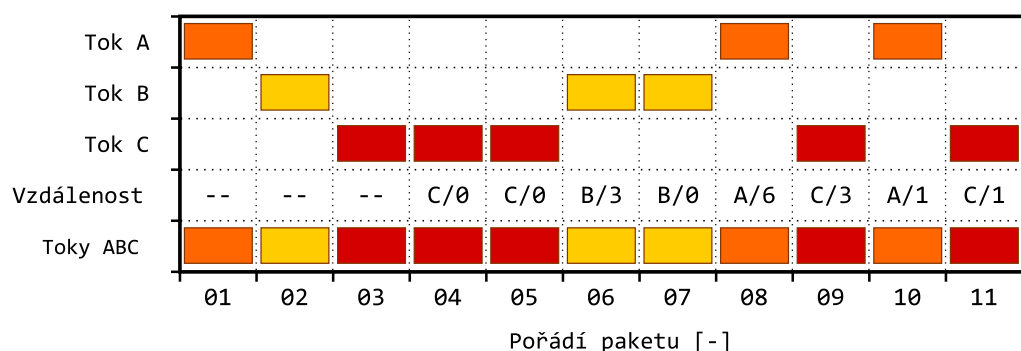
## 5.2 Paketová analýza – IPGA

V návaznosti na metriky CER/TER a jejich princip fungování, bylo přirozené podívat se na hlubší analýzu absolutních vzdáleností a časových mezer jednotlivých paketů v rámci analyzovaného provozu. Specificky v situacích, kdy více datových toků soupeří o omezenou přenosovou kapacitu datového spojení. Jako výchozí bod byla využita právě skupina metrik CER/TER. Cílem rovněž bylo minimalizovat závislost na externích nástrojích typu TCPtrace a obecně se oprostit od stavových informací protokolu. Hlavně poslední zmiňovaná vlastnost je důležitá ve vztahu k neúplným záchytům. V tomto případě stačí použít jakoukoliv část záchytu pouze s ohledem na to, aby obsahovala dostatečně velké množství informací (paketů) pro provedení spolehlivé analýzy a následného vyhodnocení.

Vzhledem k faktu, že se analýza zaměřuje na získávání informací o absolutních a časových rozdílech pozorování jednotlivých paketů v návaznosti na konkrétní komunikující uzly, byla tato analýza pojmenována jako „Inter-Packet Gaps Analysis“ (IPGA) [A2].

### 5.2.1 Analýza v rovině vzdáleností paketů

IPGA analýzu je možné provádět ve dvou na sobě nezávislých rovinách. V prvním případě je možné se zaměřit čistě na analýzu vzájemných pozic paketů ve smyslu střídání paketů jednotlivých spojení v rámci analyzovaného přenosu dat. V dalším textu bude tato analýza zjednodušeně označována jako vzdálenost paketů. Tuto situaci ilustruje obrázek 5.5.



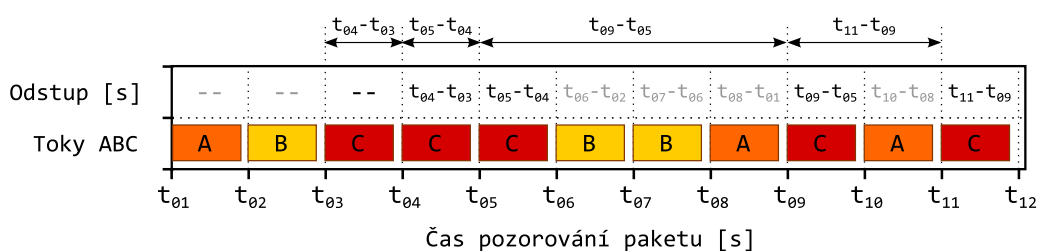
Obr. 5.5: Analýza IPGA v rovině vzdáleností paketů.

Algoritmus výpočtu paketových vzdáleností je možné popsat následujícím způsobem. Vzdálenosti paketů jsou počítány tak, že se spočítá absolutní počet paketů z ostatních spojení, které se vyskytují mezi dvěma po sobě jdoucími pakety stejného spojení v rámci analyzované komunikace.

Výpočetní náročnost algoritmu je v tomto případě zanedbatelná, protože během jediného průchodu daty je možné, jak data klasifikovat do jednotlivých spojení, tak rovněž udržovat sekvenční číslování všech paketů, a následně pro každý paket dopočítat absolutní vzdálenost, ze znalosti posledního sekvenčního čísla posledního výskytu paketu daného spojení a aktuální hodnoty sekvenčního čísla paketu.

### 5.2.2 Analýza v rovině časových odstupů paketů

V druhém případě je možné se zaměřit čistě na analýzu časových odstupů paketů. Základní algoritmus pro získání časových odstupů je podobný jako v předchozím případě. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že nyní již není podstatné, jak jsou pakety v datové komunikaci řazeny. Nicméně se sledují pouze časové odstupy jednotlivých paketů, které náleží stejnému datovému spojení. V tomto případě, tedy místo přidělení vzdálenosti na základě počtu mezilehlých paketů, jsou odstupy paketů počítány čistě jako čas mezi pozorováním dvou po sobě následujících paketů téhož datového spojení, tak jak je prezentována na obrázku 5.6. Tato varianta IPGA bude označována v následujícím textu jako analýza v rovině časových odstupů paketů.



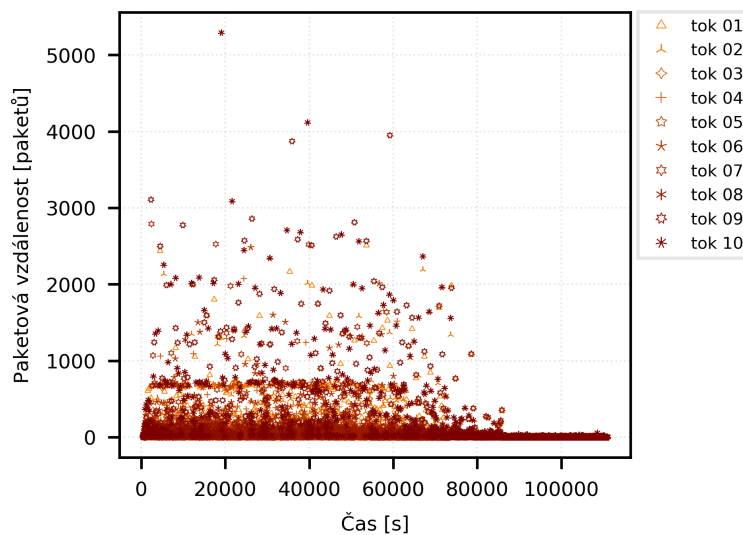
Obr. 5.6: Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů.

### 5.2.3 Základní možnosti využití analýzy IPGA

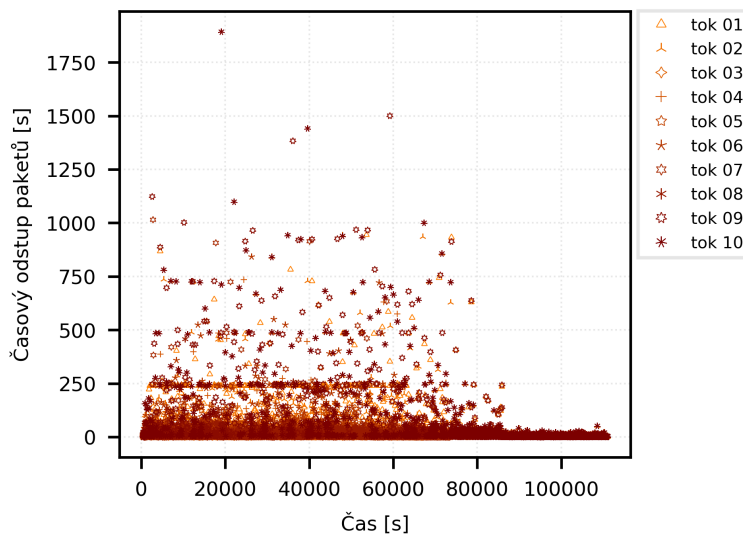
Analýzu IPGA je možné s výhodou aplikovat všude tam, kde je třeba rychle vyhodnotit chování datového přenosu, a to především pokud jde o to, jakým způsobem jsou síťové



prostředky alokovány pro jednotlivá spojení. Ukázka použití analýzy IPGA pro tento účel je představena na obrázcích 5.7, 5.8, 5.9 a 5.10 pro scénář CSMA/CA. Ukázka analýzy IPGA pro scénář TDMA je představena na obrázcích 5.11, 5.12, 5.13 a 5.14.



Obr. 5.7: Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, CSMA/CA, profil Dual.



Obr. 5.8: Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, CSMA/CA, profil Dual.

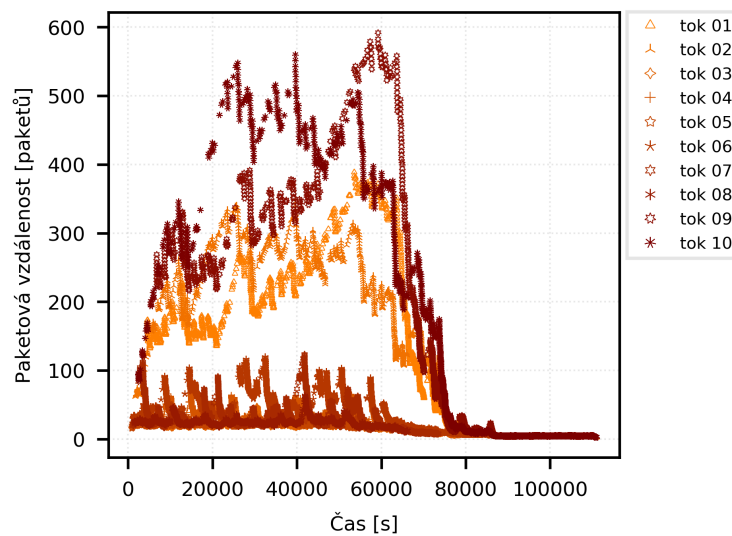
Na obrázku 5.7 je zachycena analýza komunikace, která byla získána simulací sítě

s topologií 4.2. Důležitost analýzy spočívá v tom, že ihned názorným způsobem pomáhá identifikovat místa v komunikaci, kde dochází ke specifickým problémům, respektive, kde je komunikace z nějakého důvodu na dlouhou dobu přerušena. Na zmiňovaném obrázku je patrné, že během komunikace v rámci některých spojení docházelo k extrémům v rovnováze přidělených prostředků. Na grafu jsou patrné hodnoty v řádu tisíců, což u komunikace, kde je aktivních pouze 16 datových spojení, lze považovat za velmi problematické.

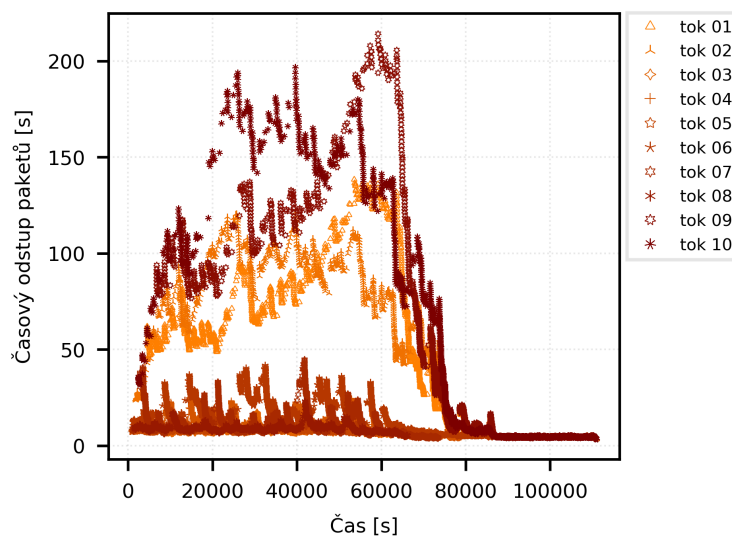
Obrázek 5.8 popisuje stejnou situaci. V tomto případě jsou vzdálenosti mezi jednotlivými pakety hodnoceny v časové rovině. To dává celé analýze IPGA nový rozměr. Na obrázku je patrné, že řada spojení obsahuje časové prodlevy v komunikaci v řádu stovek sekund a některé prodlevy jsou dokonce delší než tisíc sekund. Dokonce se zde vyskytuje prodleva delší než 1800 sekund (30 minut), což znamená, že při výchozím nastavení TCP spojení (časovač rozpadu spojení je nastaven na dobu 30 minut), muselo dojít k jeho rozpadu a případně k jeho znovunavázání.

Předchozí dva obrázky 5.7 a 5.8 jsou velice užitečné pro rychlé zhodnocení, zda se v komunikaci objevují nějaké extrémní časové prodlevy, či jakým způsobem jsou přidělovány síťové prostředky mezi jednotlivé datové toky. Nedostatkem předchozího zobrazení je fakt, že skrývá charakter jednotlivých datových toků a jen těžko se identifikují nejproblematictější spojení. Pro tento případ je vhodné provést zpracování dat pomocí algoritmu pro vyhlazení výsledků, aby bylo možno lépe odhalit charakter jednotlivých toků a případné trendy.

Při použití vyhlazení dat pomocí metod plovoucího průměrování se jako jedna z účinných metod jeví metoda exponenciálně váhovaného průměrování EWMA (Exponentially Weighted Moving Average). Tato metoda na rozdíl od prostého průměrování hodnot v daném intervalu lépe reflektuje rychlé poklesy či nárůsty hodnot a nedochází k jejich maskování v důsledku volby dlouhého okna pro průměrování.



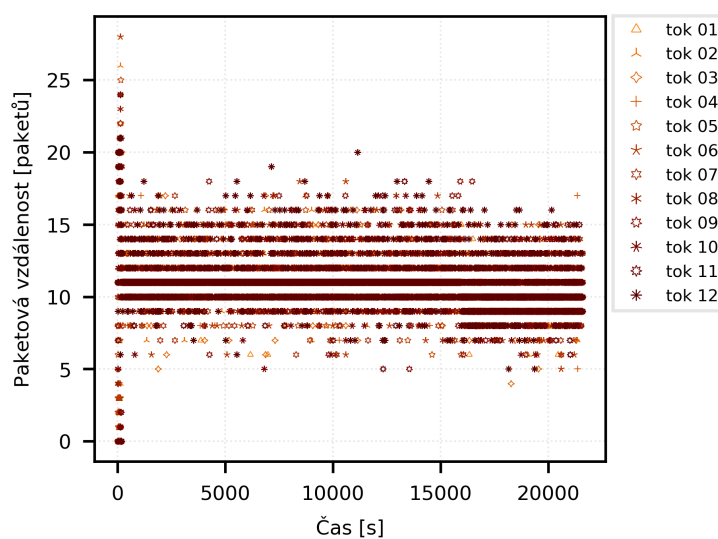
Obr. 5.9: Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, CSMA/CA, profil Dual, EWMA.



Obr. 5.10: Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, CSMA/CA, profil Dual, EWMA.

Obrázky 5.9 a 5.10 ukazují data vyhlazená právě pomocí metody EWMA<sup>2</sup>. Na obrázcích jsou nyní patrná jednotlivá spojení a také trendy. Nyní je rovněž patrné, jakým způsobem byly alokovány prostředky a je evidentní, že zde bylo několik dominantních spojení, která dostávala prostředky přiděleny na pravidelné bázi. Rovněž je patrné několik spojení, která v komunikaci silně zaostávala.

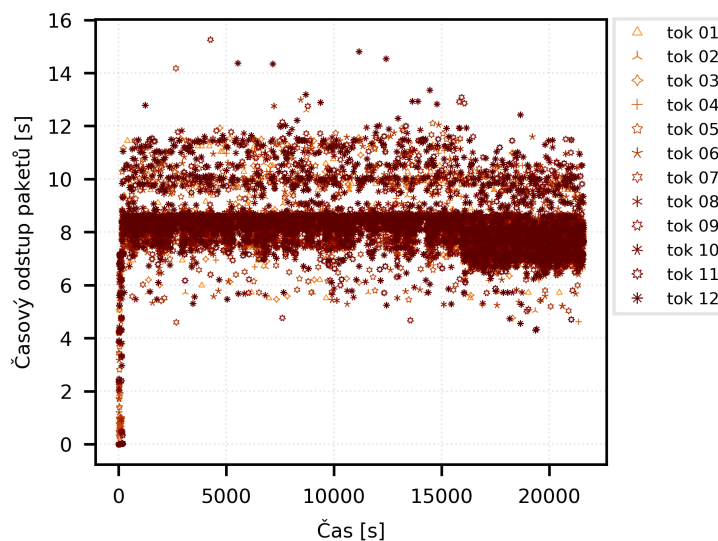
V případě analýzy dat scénáře TDMA je situace značně odlišná. Vzhledem ke striktnímu řízení na bázi algoritmu round-robin dochází k pravidelnému přidělování prostředků pro přenos dat jednotlivých datových toků 5.11 a 5.13. Drobné odchylky jsou způsobeny převážně přenosovými podmínkami.



Obr. 5.11: Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, TDMA.

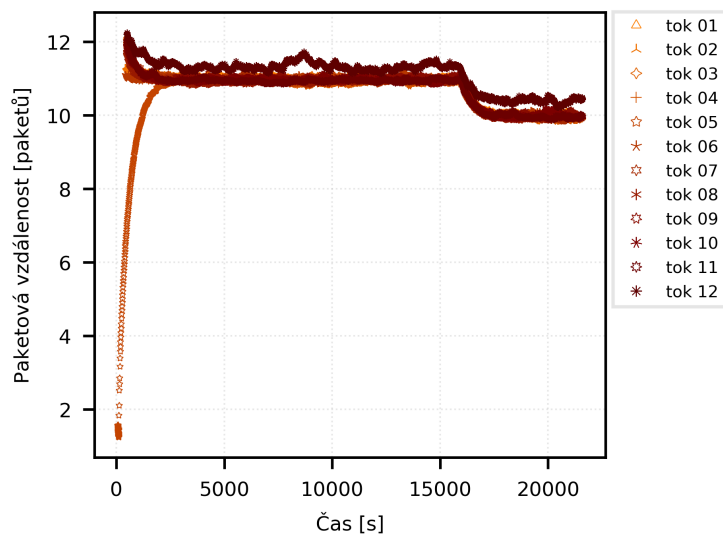
Stejná situace je pozorovatelná i v rovině časových rozdílů paketů na obrázku 5.12 a 5.14.

<sup>2</sup>Parametry pro nastavení funkce EWMA byly následující: funkce Python Pandas DataFrame EWM, span = 512, min\_periods = 32, adjust = True

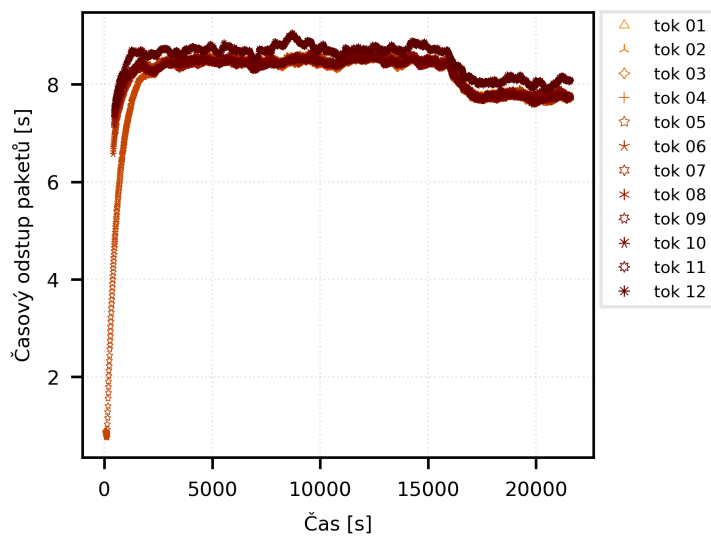


Obr. 5.12: Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, TDMA.

V případě zpracování výsledků pomocí metody EWMA se opět ukazují zřetelněji jednotlivé trendy. V tomto případě se jasně ukazuje, že jeden z datových toků (tok 5), je výrazně dominantnější na začátku simulace. V průběhu času se jednotlivé datové toky postupně vyrovnávají. Pokles na konci měření je pravděpodobně způsoben dokončením jednoho ze spojení v kratším čase než ostatní. Dá se předpokládat, že se jedná o dominantní tok ze začátku spojení. Díky přidělení většiny prostředků na začátku spojení dokázal daný tok pravděpodobně přenést značnou část dat právě na začátku měření.



Obr. 5.13: Analýza IPGA v rovině paketových vzdáleností, TDMA, EWMA.



Obr. 5.14: Analýza IPGA v rovině časových odstupů paketů, TDMA, EWMA.

#### 5.2.4 Shrnutí dílčích výsledků

Tato část se věnovala zkoumání možností analýzy paketových vzdáleností. Základní myšlenka vychází z metrik CER a TER, kde v případě příliš velké prodlevy mezi pakety je spojení vyhodnoceno jako přerušené. Analýza, která je ve zkratce označena jako IPGA, umožňuje klasifikovat pakety na základě paketových vzdáleností, kdy je vzdálenost určena jako počet mezilehlých paketů ostatních datových toků mezi pakety pozorovaného datového toku. Dále umožňuje klasifikovat pakety na základě časových odstupů mezi pakety, které přísluší stejnému datovému toku. Na první pohled se může zdát prosté určení paketových vzdáleností, respektive časových odstupů paketů, značně jednoduché. Hlavním přínosem tohoto postupu je jasná identifikace extrémních prodlev v komunikaci v rámci scénářů jako je scénář CSMA/CA. V případě scénářů jako je scénář TDMA, je možno využít daný postup k detailnější analýze férovosti přidělování síťových prostředků. Například pro identifikaci dominantních datových toků, které za předpokladu férového přidělování síťových prostředků mohou indikovat nějaký typ anomálie.

Vzhledem k podobnosti trendů v případě porovnání analýzy založené na paketových vzdálenostech a časových odstupech paketů budou další části této práce zaměřeny především na zkoumání v rovině časových odstupů paketů. V řadě případů se totiž jeví parametrizace v této oblasti snadnější. V rámci dalšího výzkumu se nabízí možnost prověřit, jak a zda vůbec se výsledky metriky TOM liší na základě zvoleného přístupu.

### 5.3 Optimalizační metrika – TOM

Tato nově představovaná metrika si klade za cíl poskytnout podporu při optimalizacích přenosového řetězce, a to především v oblasti úzkopásmových sítí. Tato metrika byla nazvaná „Transmission Optimization Metric“ (TOM) [A2].

Metrika využívá analýzu paketových vzdáleností IPGA. Stejně jako v případě IPGA je možné využít dvě roviny pohledu na analýzu datových sítí. I v případě metriky TOM je možné využít jednak informace o absolutních paketových vzdálenostech, ale také data z časových rozdílů paketů.

V obou případech pracuje metrika na podobném principu. V případě absolutních paketových vzdáleností se provoz hodnotí na základě přesně dané velikosti paketové vzdálenosti, která je považována jako kritická pro specifické potřeby konkrétní optimalizace. V případě časových rozdílů paketů je ve stejném duchu stanovena kritická časová vzdálenost.

Metriku TOM je možné využít několika způsoby:

- Můžeme využít přímý výstup základní metriky, který nám dá představu o tom, jaké množství paketů překračuje stanovené hranice.
- Můžeme použít normalizovaný tvar metriky, který umožňuje omezit výstupní hodnoty v ohraničeném intervalu.

#### 5.3.1 Definice metriky TOM

Vzorec 5.1 reprezentuje TOM metriku v základním tvaru.

$$TOM = \sum_{i=1}^{NF} \sum_{k=1}^{M_i} f(k) \quad (5.1)$$

Vzorec 5.2 reprezentuje TOM metriku v normalizovaném tvaru.

$$TOM_{norm} = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{NF} \sum_{k=1}^{M_i} f(k) \quad (5.2)$$



Na základě zvolené metody použití analýzy IPGA rozlišujeme dvě varianty funkce  $f(k)$  ( $f_g(k)$  a  $f_t(k)$ ).

Funkce  $f_g(k)$  je v případě použití IPGA na základě vzdáleností paketů definována následovně:

$$f_g(k) = \begin{cases} 1, & \text{pokud je absolutní vzdálenost} > G \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$$

Funkce  $f_t(k)$  je v případě použití IPGA na základě časových odstupů paketů definována následovně:

$$f_t(k) = \begin{cases} 1, & \text{pokud je časový odstup} > T \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}$$

### 5.3.2 Vlastnosti normalizované metriky TOM

Jedna z výhod uvedeného výpočtu TOM metriky v normalizovaném tvaru je možnost porovnání výsledků s metrikami, které jsou založeny na JFI indexu. Je to umožněno tím, že rozsah výstupních hodnot je v obou případech omezen v intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ .

Tím, jak je metrika TOM konstruována, je dána i jedna negativní vlastnost. Zaměřuje se na pakety, které překračují stanovenou vzdálenost. Pokud předpokládáme, že těchto paketů je menšina, pak je evidentní, že rozsah výstupních hodnot bude ve značném počtu případů velmi blízko číslu 1.

### 5.3.3 Ohraničení metriky shora a zdola

Pokud se zaměříme na metriku založenou na časovém rozdílu paketů, je situace celkem jednoduchá. V případě, že jsou vzdálenosti mezi pakety u všech toků pod rozhodovací mezí, pak má metrika v normalizovaném tvaru hodnotu jedna. Případně se můžeme zaměřit na nejlepší možný případ a to je situace, kdy je provoz jednotlivých toků pravidelně obsluhován striktním mechanismem „round-robin“, tak jak je naznačeno na obrázku 5.15. V tomto případě stačí, aby rozhodovací mez byla nastavena na hodnotu menší než je celkový počet souběžně pozorovaných toků.

V případě, že nastavíme mez až příliš nízko (pro demonstraci nejhoršího scénáře), pak všechny vzdálenosti paketů spadnou do oblasti nad rozhodovací mezí a v tomto případě je metrika TOM v normalizovaném tvaru rovna nule. To platí pro analýzu paketů

v časové rovině. Samozřejmě, že mez může být nastavena libovolně a pak pokrývá celý interval od nuly do jedné 5.3. Je nutné si rovněž uvědomit, že vzhledem k faktu, že metrika zpracovává konečný počet paketů, tak také hodnoty, kterých může nabývat, jsou diskrétní v definovaném intervalu.

$$TOM \in \langle 0, 1 \rangle \quad (5.3)$$

Složitější situace nastává v případě, že použijeme metriku, která se opírá o pake-  
tové vzdálenosti namísto časových. V tomto případě můžeme opět uvažovat případ  
s příliš nízkým nastavením rozhodovací meze. V tomto případě můžeme uvažovat, že  
hodnoty metriky opět patří do stejného intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ , jako v předešlém případě.  
Nicméně pokud se zaměříme na zajímavější případ, kdy předpokládáme, že meze nebu-  
dou nastaveny níže než je počet souběžných datových spojení (domnívám se, že toto  
můžeme považovat za rozumné omezení.), pak je vhodné stanovit přesné rozmezí hod-  
not metriky. Navíc je možné provést změnu měřítka hodnot metriky tak, aby následně  
opět pokrývaly interval od nuly do jedné.

Obrázek 5.16 ukazuje situaci, kterou je možné chápat jako nejhorší možný případ,  
kdy je rozhodovací mez nastavena na nejnižší možnou úroveň pro daný počet souběžně  
pozorovaných spojení. Pokud se podíváme na rovnici 5.2 podrobněji, uvidíme, že jde  
o poměr paketů, které jsou vyhodnoceny nad rozhodovací mezí vůči celkovému počtu  
paketů. Na základě nejhoršího možného scénáře můžeme spodní mez za výše zmíněných  
podmínek odvodit na základě uvedené rovnice následovně.

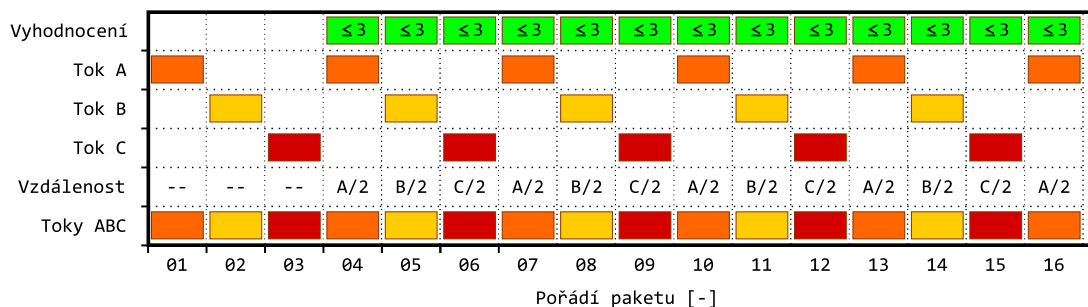
Nejneprůzračnější situace nastává za předpokladu, že je zde dominantní datový tok  
a ostatní toky dostanou příležitost poslat jeden paket ihned po překročení rozhodovací  
meze. Proto je nutné brát v úvahu, že jeden datový tok má všechny své pakety pod  
rozhodovací mezí a všechny ostatní datové toky je mají co nejbližší za touto hranicí.  
Danou situaci popisuje již zmiňovaný obrázek nejhoršího možného scénáře 5.16.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro odvození vztahu je třeba vzít v úvahu pouze násle-  
dující informace: počet pozorovaných spojení (NF) a rozhodovací mez (G). Následně  
můžeme odvodit vztah pro spodní hodnotu metriky TOM (LB), která je vyčíslena  
rovnici 5.4.

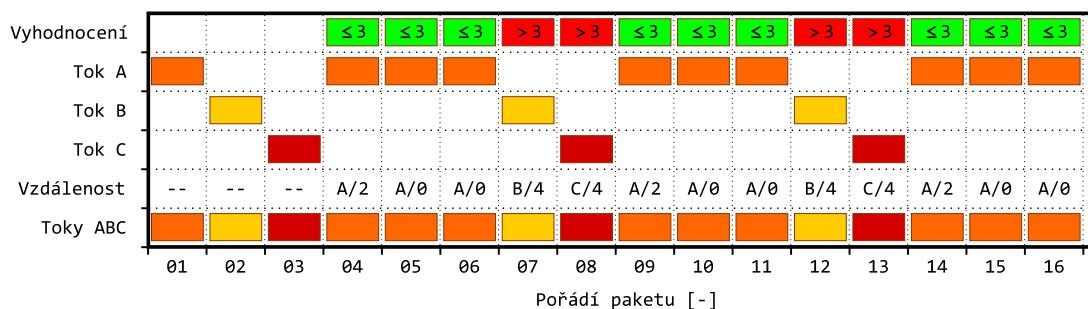
$$LB = \frac{NF - 1}{G - (NF - 1)} \quad (5.4)$$

Rozsah hodnot je možné poté specifikovat vztahem 5.5

$$TOM \in \langle LB, 1 \rangle \tag{5.5}$$



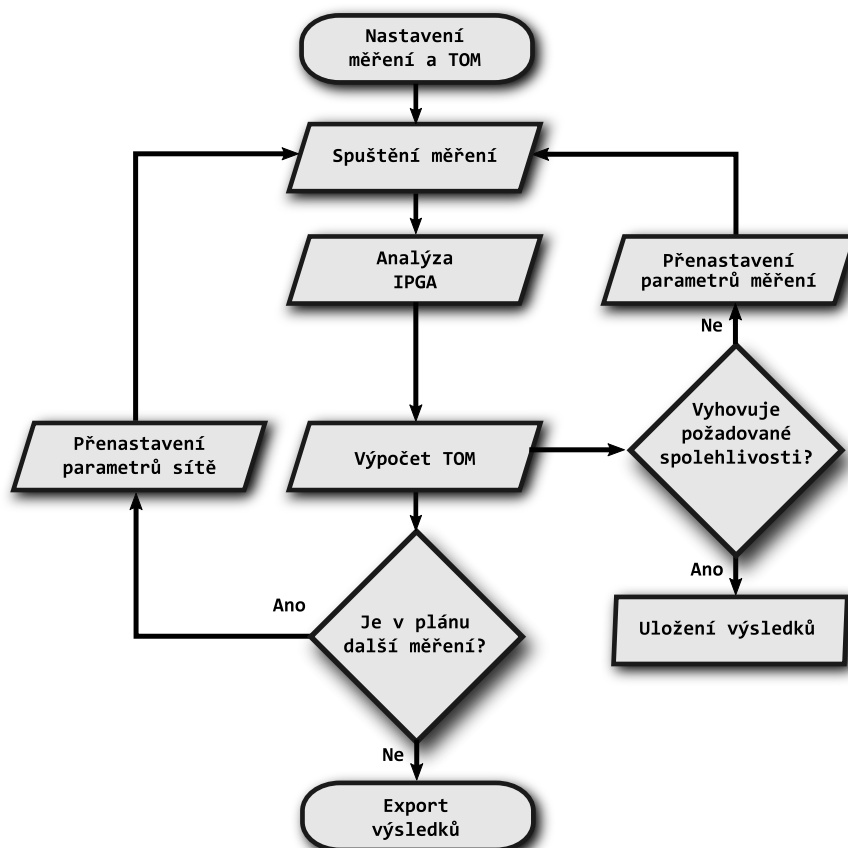
Obr. 5.15: Nejlepší možný případ.



Obr. 5.16: Nejhorší možný případ.

### 5.3.4 Metodika použití metriky TOM

Metodika vyhodnocení metriky TOM se opírá o základní optimalizační algoritmus, který je uveden na obrázku 5.17. Uvedený algoritmus byl navíc optimalizován pro situace, kdy bylo zvoleno větší množství kratší měřících běhů. Jako typický příklad dané situace je možné uvést masivní paralelní měření v rámci infrastruktury Metacentra. Popis jednotlivých kroků algoritmu odpovídá následujícímu výčtu.



Obr. 5.17: Vývojový diagram procesu analýzy a vyhodnocení výsledků dle TOM a IPGA.

1. Prvním krokem je sestavení měřicích scénářů. Ty definují rozsah prováděné analýzy ve vztahu k požadované spolehlivosti výsledků. V rámci scénáře jsou kritickými parametry délka měření, počet opakování a výchozí délka paketových mezer pro vyhodnocení metriky TOM. Je možno stanovit rovněž požadovanou míru spolehlivosti výsledků.
2. Následuje vlastní měření dle definovaných scénářů a jejich parametrů. Předpokládá se, že bude provedena celá sada měření, ve kterých je jedinou změnou nastavení generátoru náhodných čísel.
3. Nad získanými daty se provede analýza IPGA. Výstupem provedené analýzy jsou délky paketových vzdáleností či časové odstupy paketů.

4. Na paketové vzdálenosti, případně časové odstupy paketů, získané analýzou IPGA je aplikován výpočet dle metriky TOM.
5. Nad získanými výsledky se provede výpočet intervalu míry spolehlivosti a porovná se s požadovanou hodnotou, která je stanovena na začátku měření. Pokud vyjde interval míry spolehlivosti příliš velký, je třeba provést korekci v podobě úpravy délky měření nebo navýšení počtu opakování měření či simulací. Případně je možno korigovat obojí. Měření je následně třeba buď opakovat, nebo alespoň doplnit o dodatečná měření tak, aby bylo dosaženo požadovaného intervalu spolehlivosti.
6. Pokud jsou naplánována další měření s modifikovanými parametry, pak se pokračuje v dalším měření na základě nově nastavených parametrů, a následně se pokračuje ve vyhodnocování nově naměřených dat.
7. Na závěr se provede export výsledků a případné vyhodnocení vlivu jednotlivých úprav sledovaných parametrů.

### 5.3.5 Základní ověření funkčnosti metriky TOM

Pro základní ověření funkčnosti a správnosti návrhu metriky TOM byly použity scénáře uvedené v kapitole 4.

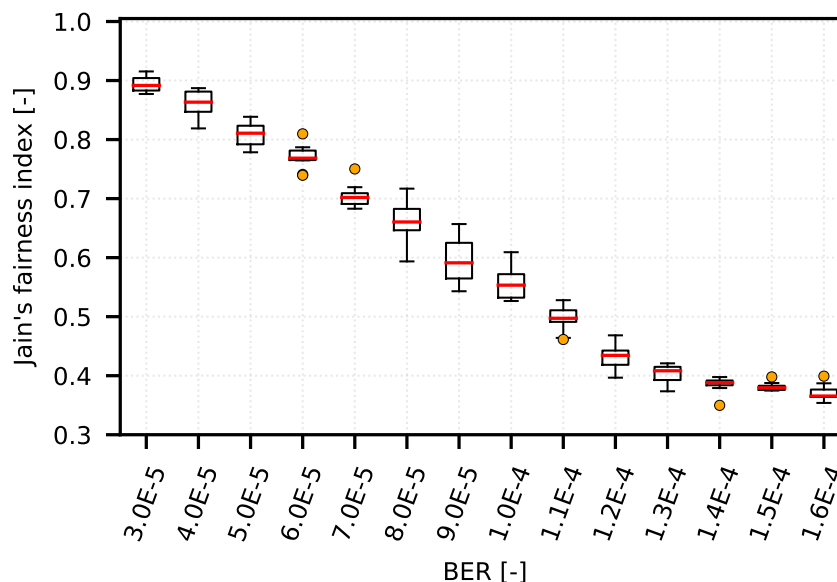
#### 5.3.5.1 Testovací scénář DumbBell (FIFO)

V první řadě bylo nutné ověřit, zda je vůbec možné použít metriku TOM pro optimalizační proces. To znamená, že metrika musí reflektovat změny v nastavení jednotlivých vrstev sítě a do jisté míry musí zlepšení podmínek přenosu odpovídat patřičné změně výstupů metriky. K tomuto základnímu testování je vhodná právě topologie DumbBell, která v kombinaci s možností nastavení parametrů sdíleného kanálu a jedinou frontou typu FIFO umožňuje do jisté míry predikovat chování sítě. Díky jisté míře předvídatelnosti je možné předpokládat, že nárůst chybovosti, nebo zatížení sítě bude mít přímý dopad na výstup testované metriky.

Konkrétní nastavení testovacího scénáře, které bylo použité v rámci tohoto testování, je popsáno v následujícím výčtu:

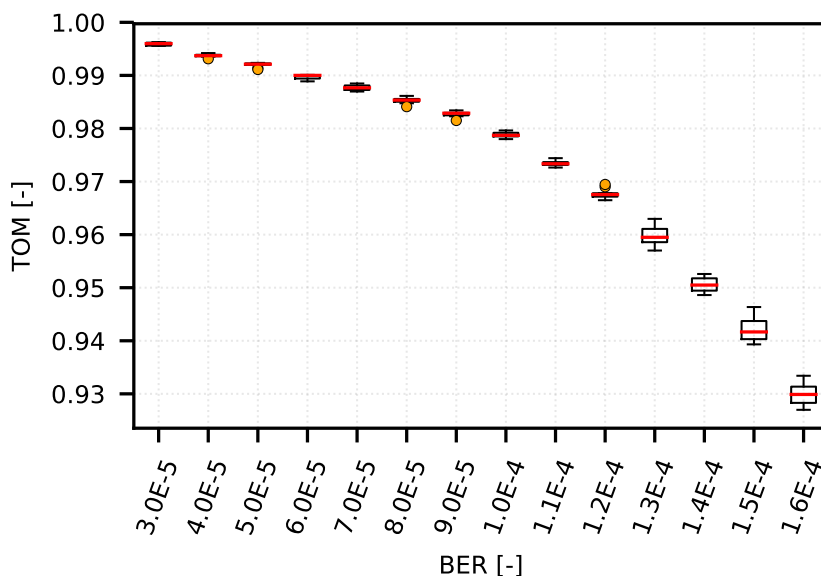
- Topologie: DumbBell s omezenou propustností a jedinou frontou FIFO.
- Počet komunikujících uzlů: 10 (1 TCP spojení každý)
- Omezení propustnosti sdílené linky: 19 kbit/s
- Zpoždění omezené sdílené linky: uniform (0,25 s, 2 s)
- Chybovost sdílené linky (BER): od  $3,0 \cdot 10^{-5}$  do  $1,6 \cdot 10^{-4}$
- Velikost požadavku: 4 KiB
- Velikost odpovědi: 1024 KiB
- Čas začátku spojení: rovnoměrné rozdělení na intervalu (1 s - 30 s)
- TCP algoritmus: NewReno, povoleno škálování TCP okna.

V úvodní fázi byla data zpracována na základě metriky JFI 5.18. Především proto, aby se ukázalo, jak bude provoz ve zvoleném scénáři reagovat na podmínky v síti. Měření ukázalo, že od jisté úrovně chybovosti přebírají kontrolu nad provozem především regulační algoritmy dané verze protokolu TCP a díky tomu dochází k vyrovnání datových toků a tím i větší férovosti přidělení síťových prostředků.



Obr. 5.18: JFI interval 300 s, DumbBell (FIFO).

Následovala měření, která již byla zaměřená na ověření funkčnosti metriky TOM 5.19. V rámci základního měření se ukázalo, že metrika reflektuje nastavené podmínky pro přenos dat sítí. Se zvyšující se úrovní chybovosti hodnota metriky TOM klesá.



Obr. 5.19: TOM limit 20 s, DumbBell (FIFO).

Měření dále ukázala, že prezentovaná metrika vykazuje stabilní výsledky dokladované minimálním rozptylem hodnot v rámci jednotlivých opakování měření.

V této úvodní fázi ověřování metriky založené na TOM byly hodnoty mezních vzdáleností metriky TOM nastaveny na základě empiricky zjištěných podkladů. Díky tomu je možné předpokládat, že nastavení metriky nebylo optimální, ale i přesto se ukazuje, že v tomto konkrétním případě reflektuje podmínky síťových přenosů.

### 5.3.5.2 Testovací scénář CSMA/CA

Pro další testování základní funkčnosti metriky TOM byl zvolen testovací scénář založený na přístupové metodě CSMA/CA. Tak jak byl popsán v kapitole 4. Vzhledem k faktu, že topologie věrně odráží reálný scénář nasazení, můžeme považovat výsledky za významné. Použitá datová sada nabývá na významu rovněž i tím, že byla reálně naměřena při optimalizačním procesu modemu RipEX-300 v kontextu využití metrik JFI a CER/TER. Proto je příhodné otestovat stejná data pomocí metriky TOM a následně porovnat výsledky.

V následujícím výčtu jsou uvedeny podmínky, za kterých byla data získána.

- Topology: hvězda s retranslacemi <sup>3</sup>
- Počet koncových uzlů: 16 (1 TCP spojení každý)
- Kapacita spojové vrstvy: přibližně 30 kbit/s
- Přístupová metoda k médiu: CSMA/CA (1T0 – 999), Polling (poll)
- TCP algoritmus: NewReno, CW = 8192 B, bez podpory škálování TCP okna.

Porovnání metrik nad různými přístupovými metodami (CSMA/CS a Polling) může vypadat na první pohled zvláště, nicméně existuje několik důvodů, proč testovat dané metody v rámci jednoho datového souboru. Jednak je možné v přímém porovnání ukázat přednosti jednotlivých přístupových metod. Rovněž je možné pro demonstraci výsledků jednoduše vynést data v rámci jednoho grafu a v neposlední řadě dané srovnání dává odpověď na otázku, jaký protokol je v dané situaci výhodnější. Široké spektrum dat rovněž dobře poslouží k prověření nově představovaného postupu pro vyhodnocování datové komunikace.

Obrázky 5.20, 5.21, 5.22 a 5.23 poskytují různé pohledy na analyzovaná data. Porovnání výsledků metriky založené na JFI a TOM je v některých aspektech podobné (z pohledu pozorovaných trendů) a v některých značně odlišné (pokud se zaměříme na některé naměřené hodnoty).

Jak ukazují výsledky vyhodnocení na uvedených obrázcích je zjevné, že použití datových profilů s různou vazbou mezi jednotlivými zprávami rovněž ovlivňuje významným způsobem dosažené výsledky.

Pokud se podíváme na srovnání výsledků pro datový profil, který je označen jako Dual, pak je na porovnání trendů metrik JFI a TOM vidět značná podobnost<sup>4</sup>.

Pokud se podíváme na výsledky, které byly získány analýzou dat naměřených ze simulací s datovým profilem ZigZag, pak vidíme, že sice trend grafu je podobný, ale u některých hodnot jsou výsledky odlišné. To jednak ukazuje na fakt, že použití různých datových profilů má svůj význam a jednak, že i použití různých metrik má svůj význam ve vztahu ke specifickému účelu jednotlivých optimalizací.

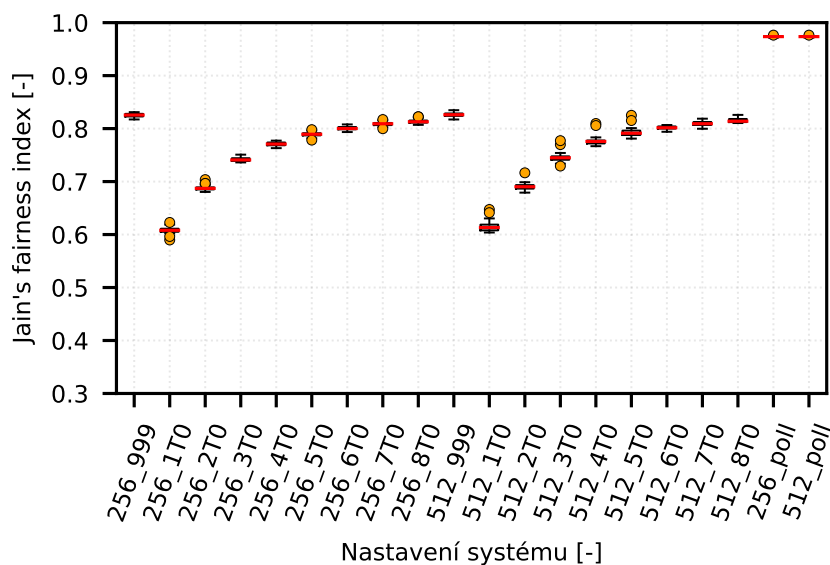
V dané situaci můžeme usuzovat, že pokud budeme optimalizovat datové přenosy na základě JFI metrik, pak dosáhneme větší spravedlnosti v přidělování síťových

---

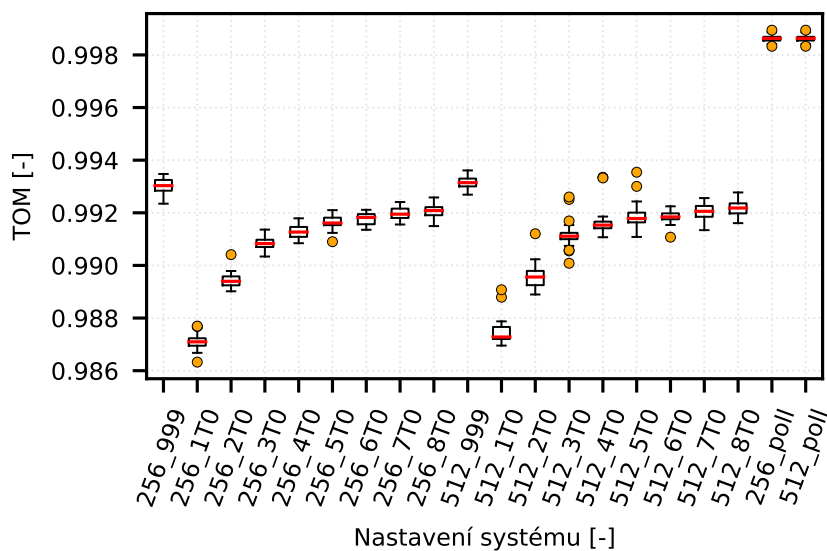
<sup>3</sup>Scénář je založený na obrazu reálné sítě. Vlastnosti fyzické vrstvy byly simulovány především na základě útlumového modelu pro jednotlivé trasy.

<sup>4</sup>Přesnějším porovnání bude věnována jedna z dalších částí této práce.



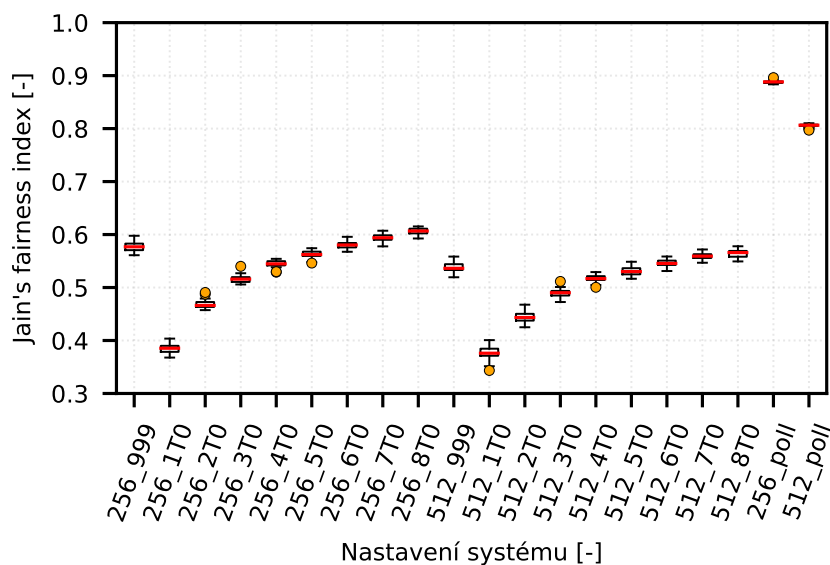


Obr. 5.20: JFI, interval 300 s, CSMA/CA, profil Dual.

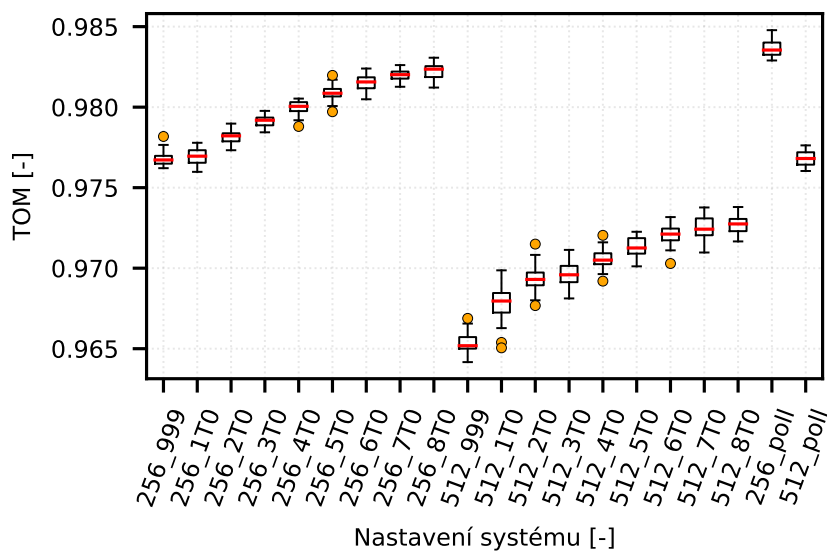


Obr. 5.21: TOM, limit 120 s, CSMA/CA, profil Dual.

prostředků. V případě optimalizací založených na TOM bude dosaženo větší kontinuity provozu a vyšší pravděpodobnosti udržitelnosti spojení. Je jisté, že zde existuje značná spojitost mezi spravedlivým přidělováním prostředků a udržitelnost spojení, to nicméně neplatí absolutně.



Obr. 5.22: JFI, interval 300 s, CSMA/CA, profil ZigZag.

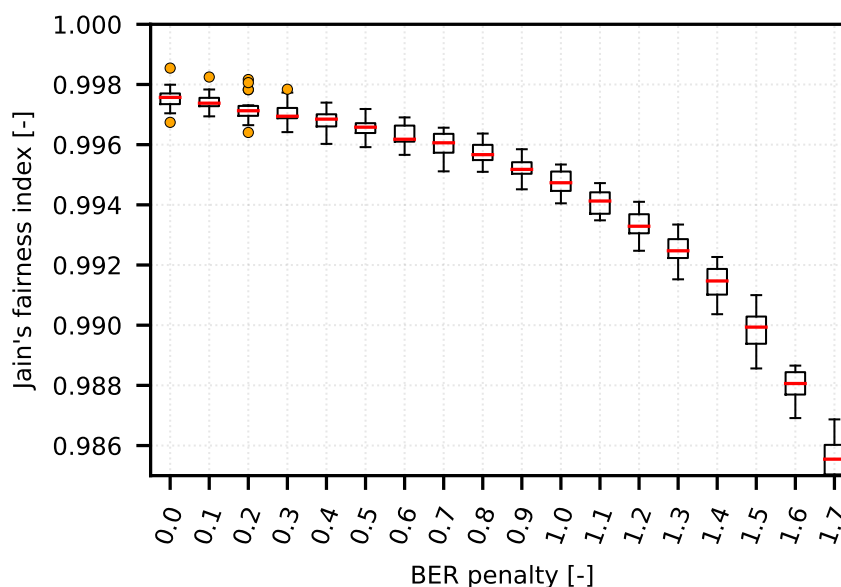


Obr. 5.23: TOM, limit 120 s, CSMA/CA, profil ZigZag.

Jistá nepřesnost měření je také dána tím, že v tomto případě byly mezní parametry pro nastavení metriky TOM získány empiricky a jak ukáže další část této práce, je volba parametrů metriky TOM kritická z pohledu zamýšlených optimalizací.

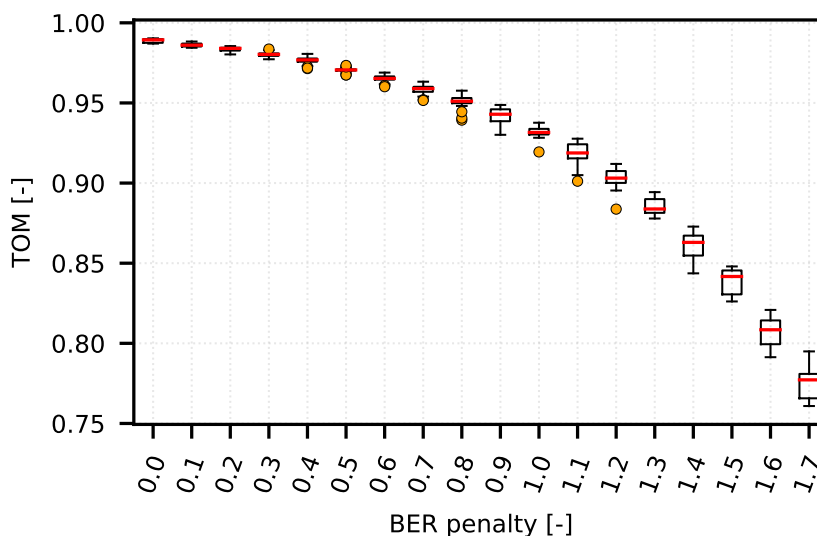
### 5.3.5.3 Testovací scénář TDMA

Testovací scénář, který je založený na metodě přístupu k médiu TDMA, dobře poslouží k ověření návrhu představované metriky TOM z pohledu sítě, kde dochází k mnohem striktnějšímu řízení jednotlivých datových toků. Navíc pokud se ještě pro rozhodování o přidělení prostředků použije algoritmus round-robin, pak se dá předpokládat, že paketové vzdálenosti a to ať už v absolutní nebo časové rovině, budou distribuovány ve velmi úzkém intervalu <sup>5</sup>. Díky tomu je možné ověřit metriku TOM za značně odlišných podmínek oproti předchozímu testování, které bylo provedeno právě na scénáři CSMA/CA.



Obr. 5.24: JFI, interval 60 s, TDMA.

<sup>5</sup>Ve srovnání se scénářem, který byl založený na přístupové metodě CSMA/CA



Obr. 5.25: TOM, limit 10 s, TDMA.

Výsledky prezentované na obrázcích 5.24 a 5.25 ukazují, že jak metrika založená na JFI indexu, tak i metrika TOM reaguje na zhoršující se podmínky přenosu sítí poklesem a obě metriky tedy vykazují stejný trend. Dále je možné u metriky TOM jednoznačně rozlišit sousední hodnoty na základě prostého porovnání hodnot zobrazených v rámci uvedeného grafu.

Vzhledem k faktu, že v rámci testovacího scénáře se používá model sítě, kde každá dvojice komunikující uzlů má nastavenou vlastní chybovost a to navíc na základě parametrů normálního rozdělení, byl do modelu zaveden speciální parametr BER penalty. Tento specifický parametr umožňuje globálně v rámci celého modelu snížit nebo naopak zvýšit chybovost BER při komunikaci jednotlivých uzlů<sup>6</sup>.

<sup>6</sup>Pokud je BER penalty nastavena například na hodnotu 1.2 a původní hodnota chybovosti BER je  $1.0 \cdot 10^{-5}$ , pak dojde k úpravě chybovosti BER na hodnotu  $1,0 \cdot 10^{-3,8}$  ( $1,585 \cdot 10^{-4}$ ).

### 5.3.6 Shrnutí dílčích výsledků

V této části byla představena metrika TOM pro optimalizaci datového provozu na základě informací, které poskytuje analýza provozu IPGA. Metrika byla představena v normalizovaném tvaru, kde výstupní hodnoty v obecné rovině spadají do interval  $(0, 1)$ . Stejně jako v případě analýzy IPGA je možné také metriku TOM používat jak v režimu absolutních paketových vzdáleností, tak i v režimu časových rozdílů paketů specifického datového toku. Základní ověření funkčnosti ukázalo, že je možné aplikovat tuto metriku na stejné datové toky jako při analýze metrikou JFI. Navíc při specifickém nastavení metriky TOM jsou i výsledky srovnatelné, a to především za předpokladu, že je metrika parametrizována v okolí svého optima. V případě nesprávné parametrizace či extrémních přenosových podmínek se ukazuje, že metrika TOM může selhávat<sup>7</sup>, ale stejný problém byl také pozorován u metriky založené na indexu JFI.

---

<sup>7</sup>A to například ve smyslu nemožnosti rozlišit sousední hodnoty a to ani v případě značné změny přenosových podmínek v síti.

## 5.4 Problematika parametrizace TOM

Výstupy metriky TOM jsou silně závislé na nastavení mezních vzdáleností paketů a mezních časových odstupů paketů, viz rozhodovací funkce  $f_g(k)$  a  $f_t(k)$ . Pokud se zaměříme čistě na maximalizaci udržitelnosti spojení, nemusí být správné nalezení mezních vzdáleností pro parametrizaci metriky TOM jednoduchý úkol [A1].

Pokud jsou dostupné informace o protokolech a konfiguraci nižších vrstev je možné je s výhodou při parametrizaci využít. Typicky lze při nastavení pracovat s informací o nastavení různých protokolových časovačů a proti nim optimalizovat. V případě optimalizací komunikace v úzkopásmových sítích mohou hodnoty mezních parametru v časové rovině dosahovat stovek sekund, ale měly by být menší než celkový čas vypršení pro TCP spojení.

Dalším případem je situace, ve které je nutné optimalizovat délku prodlev v komunikaci u konkrétního spojení. V tomto případě může posloužit pro nastavení mezní časové vzdálenosti její požadovaná maximální délka (otázkou ovšem zůstává, zda v tomto specifickém případě není lepší optimalizovat na menší hodnotu paketové vzdálenosti, než je požadovaná horní hranice). Vzhledem k předpokladu mnohem striktnějšího požadavku na nastavení mezních vzdáleností (oproti požadavku na udržitelnost spojení) je nutné provádět konfiguraci mnohem pečlivěji.

Skutečný problém ale nastává v případě, pokud požadujeme využít metriku TOM čistě pro minimalizaci vzdáleností paketů. Pokud je jediným kritériem právě dosažení minimální paketové vzdálenosti, vyvstává otázka, jak danou metriku na začátku nastavit. Navíc zde dochází k překryvu s metrikami založenými na JFI a to z toho důvodu, že minimálních paketových vzdáleností je dosaženo právě ve chvíli, kdy jsou prostředky rozděleny férově mezi jednotlivé datové toky a to z pohledu paketů<sup>8</sup>.

V rámci základního testování jsem zvolil postup, u kterého vycházím z jedné sady měření, která je považována za výchozí stav a vůči té následně porovnáváme měření s modifikovanými parametry a hledáme, zda došlo ke zlepšení sledovaného kritéria či nikoliv. A zde právě narážíme na problém, jakým způsobem nastavit v úvodu měření mezní vzdálenosti metriky TOM tak, aby bylo možné v rámci celého měření nad různými konfiguracemi vyhodnocovat klady či zápory jednotlivých modifikací nastavení.

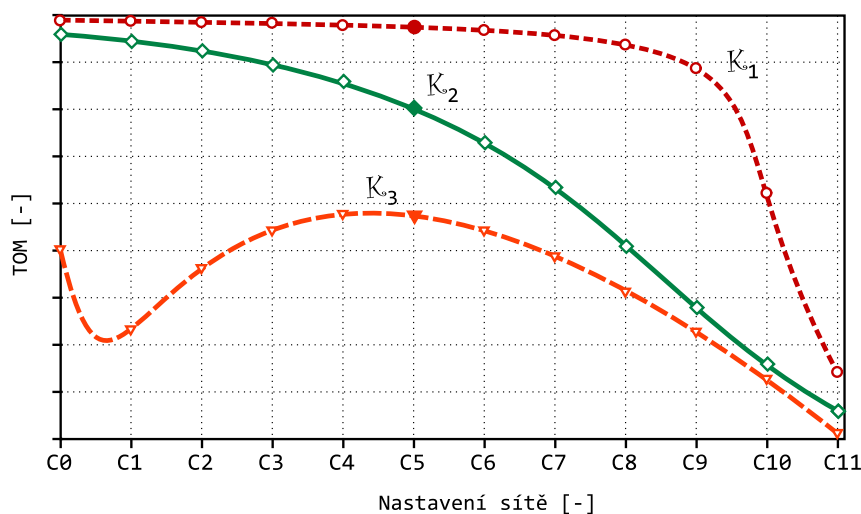
---

<sup>8</sup>Podstatné jsou pouze počty obslužených paketů. V úvahu se nebere počet přenesených bitů v rámci jednotlivých spojení.

Obrázek 5.26 představuje zjednodušený pohled na možné průběhy pomyslných optimalizačních křivek. Pokud předpokládáme, že rozdíly v nastavení nejsou příliš výrazné, to znamená, že při malé změně nastavení nepředpokládáme velkou změnu v rozložení a délce paketových vzdáleností, můžeme si dovolit mezilehlé hodnoty interpolovat a proložit křivkou. Na obrázku 5.26 je naznačeno několik možných průběhů optimalizačních křivek:

- Křivka  $K_1$  ukazuje na situaci, kdy v rámci definovaného kritéria je vyhodnoceno, že optimální je použít nastavení z úvodní části grafu, nicméně sklon křivky je zde minimální, což může přinášet problémy v rozlišení přínosu jednotlivých optimalizací. Ve zbylé části grafu je většinou sklon dostatečný, ale daná oblast není zajímavá z pohledu optimalizací (hodnota metriky TOM klesá a neleží zde maximum ani hodnota blízka maximu).
- Křivka  $K_2$  představuje hledaný optimální průběh, který by měl umožnit vyhodnocovat efekt jednotlivých optimalizací na sledovaný síťový provoz. Monotonní průběh je možné sledovat většinou tam, kde je optimální stav v jednoduché formě závislý na hodnotě optimalizovaného kritéria (například zlepšující se propustnost sítě v důsledku snižující se latence).
- Křivka  $K_3$  reprezentuje další vhodný průběh, kdy ovšem optimum neleží na jednom z konců grafu. Tento případ nastává, pokud existuje složitější závislost ve vztahu paketových vzdáleností a optimalizačního parametru. Zde se ukazuje skutečná síla optimalizační metriky TOM, protože je ve specifických případech schopna odhalit optimální nastavení, které nemusí odpovídat původnímu předpokladu. Obecně se předpokládá, že přenosové podmínky a tudíž i paketové vzdálenosti jsou úměrné chybovosti během přenosu dat. Jak bude prezentováno dále, toto neplatí absolutně, jak by bylo možné předpokládat.

Tvar křivky  $K_1$  ukazuje na fakt, že zhruba u dvou třetin hodnot bude obtížné jejich porovnání a to navíc v oblasti, ve které se nachází optimum dle zvoleného optimalizačního kritéria. Tento problém by mohl být vyřešen snížením mezní vzdálenosti při porovnávání vzdáleností paketů v rámci nastavení metriky TOM. Jak bude ale ukázáno dále v tomto případě dochází rovněž v řadě případů k posunu optima do jiné oblasti grafu a tudíž i jako optimální vychází jiné hledané nastavení.



Obr. 5.26: Ukázka optimalizačních průběhů.

Tvar křivek  $K_2$  a  $K_3$  je možné považovat za optimální z několika důvodů. Křivka a její sklon musí mít takový průběh, aby bylo možné od sebe jednoznačně odlišit sousední hodnoty. To znamená, aby bylo možné identifikovat ty situace, ve kterých dosahuje metrika TOM nejvyšší hodnoty nebo se jí blíží. Dále je nutné, aby tvar křivky odpovídal trendu vývoje optimalizovaných hodnot dle zvoleného optimalizačního kritéria. To znamená, že předpokládáme významnou změnu tvaru a průběhu křivky s odklonem od optimálního stavu v reakci na změnu vstupních podmínek, které v konečném důsledku mají za následek nárůst paketových vzdáleností, či počtu paketů s paketovou vzdáleností větší, než je zvolená mezní vzdálenost pro vyhodnocení metriky TOM.

#### 5.4.1 Závislost metriky TOM na specifických podmínkách síťového přenosu

Ukázka závislosti výsledků metriky TOM na specifických přenosových podmínkách vychází ze scénářů definovaných v kapitole 4. Jednotlivá měření jsou podrobena hloubkové analýze a její výstupy zpracovány do podoby přehledných grafů. Cílem těchto ukázek je demonstrovat, jakým způsobem vypadá použití metriky TOM, ale hlavně jde o to názorným způsobem poukázat na problematiku nastavení parametru mezních vzdáleností

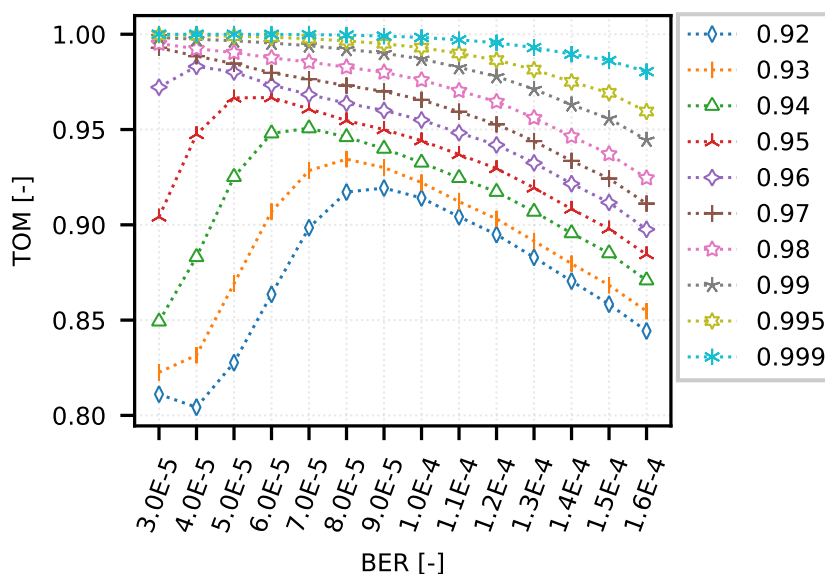


paketů a mezních časových rozdílů paketů u metriky TOM a důsledky, které volba těchto parametru vyvolá.

V dalším textu bude uvedena celá řada měření, ve kterých byl jako výchozí bod zvolen specifický kvantil z naměřených hodnot analýzy IPGA v rámci specifických měření. Volba byla prováděna s ohledem na polohu pomyslného středu optimalizačních průběhů.

V případě scénářů, které jsou označeny jako DumbBell, se vždy hodnota uvažovaného kvantilu vztahuje k sadě měření s chybovostí  $9 \cdot 10^{-5}$ . V případě scénářů, které jsou označeny jako CSMA/CA, se vždy hodnota uvažovaného kvantilu vztahuje k sadě měření při nastavení systému 256\_5T0. V případě scénářů, které jsou označeny jako CSMA/CA, se vždy hodnota uvažovaného kvantilu vztahuje k sadě měření s BER penalty 0,9.

#### 5.4.1.1 Model s topologií DumBell



Obr. 5.27: Ukázka optimalizačních křivek (kvantil 0,92 – 0,999), DumbBell (FIFO).

Obrázek 5.27 ukazuje, jak vypadají pomyslné optimalizační křivky, pokud se jako vstupní hodnota pro nastavení mezních vzdáleností metriky TOM použije hodnota,

která odpovídá zvolenému kvantilu (získanému z IPGA analýzy). Přehled kvantilů a jim odpovídajících hodnot je uveden v tabulce 5.1.

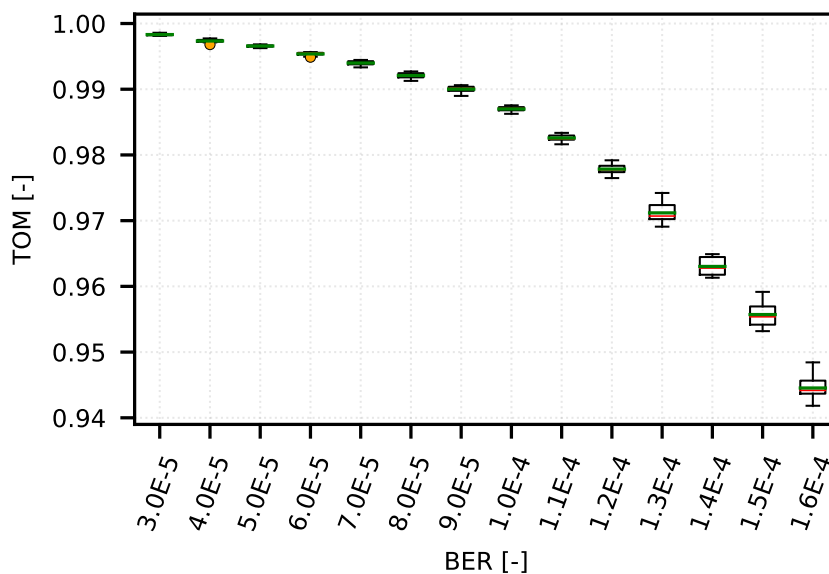
Pokud se podíváme blíže na průběh metriky TOM pro dva konkrétní případy, které odpovídají hodnotám kvantilů 0,95 a 0,99, je z obrázku patrné, že pokud zvolíme jako mezní rozdíl odstupů paketů přibližně 5 sekund (0,95 kvantil), tak nejlépe tomuto kritériu vyhoví síť, kde se pohybuje chybovost na úrovni přibližně  $5 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-5}$ . To je pravděpodobně způsobeno tím, že chybovost vyvolá reakci na straně řídicích algoritmů protokolu TCP a tím dojde k jeho regulaci na takovou úroveň, kdy se jednotlivé datové toky spravedlivěji dělí o prostředky sítě.

V případě optimalizace sítě na větší délku intervalu paketů, a to na úroveň přibližně 39 sekund (0,99 kvantil), se pak jeví jako výhodnější držet chybovost na co nejnižší úrovni.

<b>Kvantil</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>
Časový rozdíl [s]	1,66	2,28	3,36	4,79
<b>Kvantil</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>
Časový rozdíl [s]	6,86	10,16	16,86	38,97
<b>Kvantil</b>	<b>0,995</b>	<b>0,999</b>	-	-
Časový rozdíl [s]	91,48	239,78	-	-

Tab. 5.1: Přepočítání kvantilů na konkrétní časové vzdálenosti, DumbBell (FIFO).

Na obrázku 5.28 je zobrazeno měření na úrovni kvantilu 0,99. Na rozdíl od předchozích je zde ovšem vyobrazena také střední hodnota. Smyslem této ukázky je poukázat na vyhodnocení intervalů spolehlivosti ve vztahu k rozlišitelnosti jednotlivých výstupů metriky TOM.



Obr. 5.28: Střední hodnoty pro kvantil 0,99 (označeno zelenou barvou), DumbBell (FIFO).

V případě, že jsou rozdíly výstupů při měření jednotlivých sad dostatečné a zároveň horní a dolní kvartily dostatečně blízko u sebe, je možné na základě grafického znázornění provést vyhodnocení měření. Správně by mělo být provedeno vyhodnocení na základě intervalů spolehlivosti jednotlivých výsledků tak, jak zachycuje tabulka 5.2.

BER	Střední hodnota (TOM)	Interval spolehlivosti	Dochází k překryvu
3,0E-5	0,998318	0,000142	NE
4,0E-5	0,99734	0,000231	NE
5,0E-5	0,996577	0,000143	NE
6,0E-5	0,995379	0,000241	NE
7,0E-5	0,993983	0,000334	NE
8,0E-5	0,992091	0,000412	NE
9,0E-5	0,990017	0,000438	NE
1,0E-4	0,986994	0,000349	NE
1,1E-4	0,98258	0,000453	NE
1,2E-4	0,977845	0,000749	NE
1,3E-4	0,971183	0,001582	NE
1,4E-4	0,96303	0,001291	NE
1,5E-4	0,95571	0,0019	NE
1,6E-4	0,944534	0,001778	NE

Tab. 5.2: Intervaly spolehlivosti scénáře DumbBell (FIFO) pro kvantil 0,99 (38,97 s) a hladině významnosti 95%.

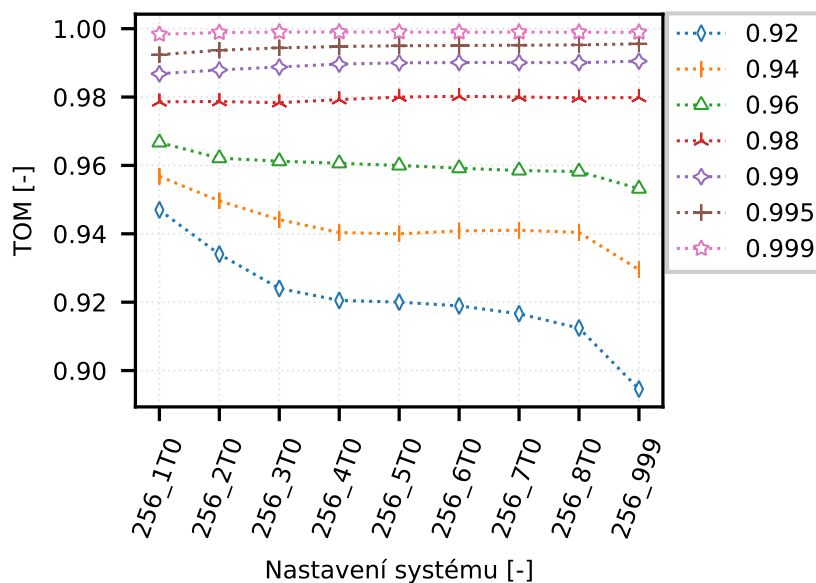
Tabulka zachycuje jednotlivé střední hodnoty pro konkrétní sady měření a rovněž vypočtené velikosti intervalů spolehlivosti konkrétních měření na hladině významnosti 95%. Poslední sloupec v tabulce reflektuje výsledek vzájemného porovnání jednotlivých výstupů včetně zahrnutí intervalů spolehlivosti. Pokud u výsledků nedochází k překryvu, pak je možné jednoznačně určit, zda došlo v dané situaci ke zlepšení, či zhoršení stavů vůči ostatním výsledkům. Pro zjednodušení byl vzat v potaz předpoklad, že rozložení hodnot je značně symetrické kolem střední hodnoty. V rámci této ukázky se prokázalo, že všechny hodnoty jsou na uvedené hladině významnosti jasně rozlišitelné.

<b>Kvantil</b>	<b>0,970</b>	<b>0,975</b>	<b>0,980</b>	<b>0,985</b>
Časový rozdíl [s]	17,77	20,22	23,89	30,06
<b>Kvantil</b>	<b>0,990</b>	<b>0,995</b>	<b>0,998</b>	-
Časový rozdíl [s]	40,87	80,01	218,85	-

Tab. 5.3: Přepočítání kvantilů na konkrétní časové vzdálenosti, CSMA/CA, profil Dual.

#### 5.4.1.2 Model systému CSMA

Následující příklad velmi názorně demonstruje, jakým způsobem je možné využít metriku TOM pro optimalizaci komunikačních systémů úzkopásmových sítí. Na grafu 5.29 je opět zachyceno několik průběhů metriky TOM, které odpovídají volbě hodnoty optimalizačního kritéria odpovídající konkrétnímu kvantilu analyzovaných hodnot dle IPGA. Přehled kvantilů a jim odpovídajících hodnot je uveden v tabulce 5.3.

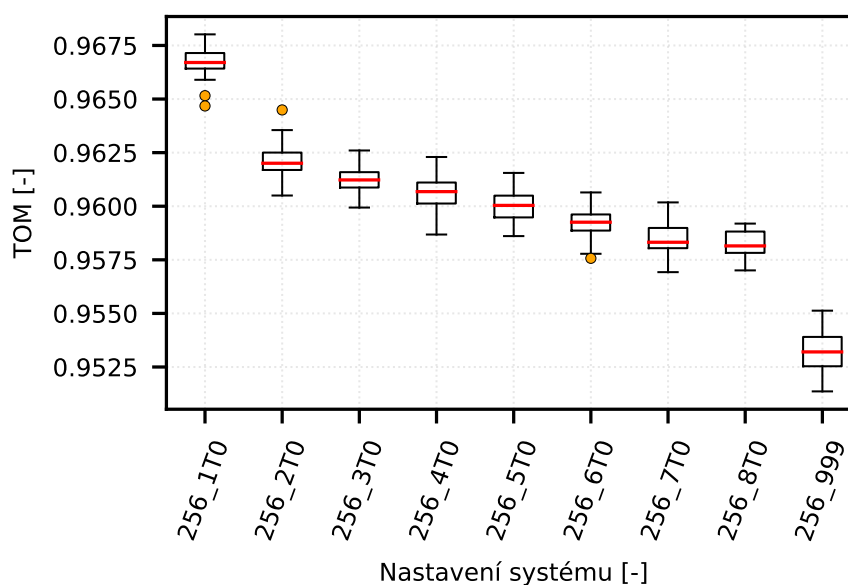


Obr. 5.29: Ukázka optimalizačních křivek (kvantil 0,92 – 0,999, CSMA/CA, profil Dual).

Jak je patrné z obrázku 5.29 je u simulací systému CSMA mnohem menší prostor pro porovnávání hodnot metriky TOM v případě, že je optimalizace komunikace prováděna pro hodnoty odpovídající kvantilu 0,98 a více. To je převážně způsobeno charakterem síťového provozu a podmínkami měření.

Jak ukazuje detailní pohled na jednotlivé optimalizační průběhy kvantilů 0,96, 0,99 a 0,999 na obrázcích 5.30, 5.31 a 5.32, tak lze v těchto případech využít analýzu na základě metriky TOM, i když je nutné počítat s tím, že rozhodování o optimálním nastavení může být problematické. To je způsobeno příliš malým odstupem jednotlivých hodnot metriky TOM. V tomto případě je nutné uplatnit metody statistické analýzy a určit míru spolehlivosti daných výsledků. I poté se může ukázat, že míra množství potřebných dat a doba potřebná na následný výpočet je příliš velká na to, aby byly vyváženy přínosy naprosto minimální optimalizace sítě.

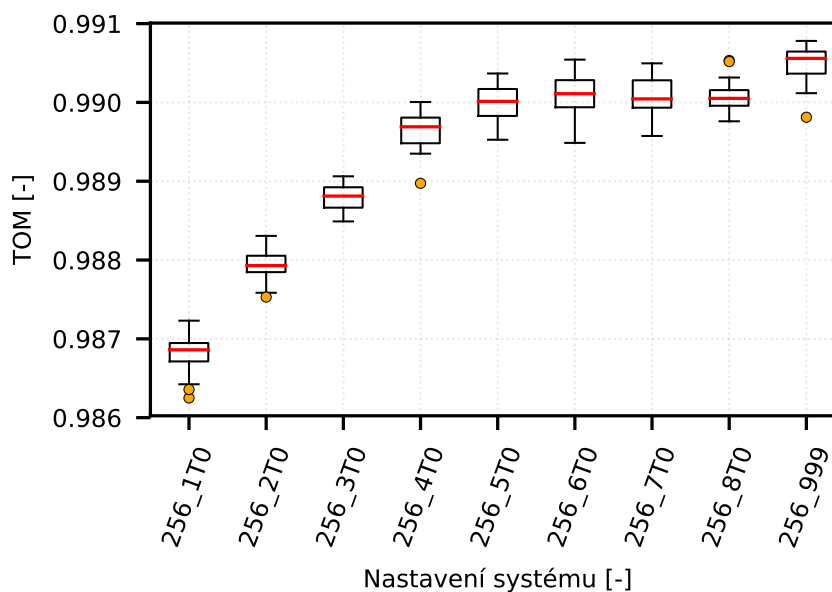
V případě hodnot metriky TOM pro kvantil 0,96 (Obrázek 5.30) leží optimum v oblasti konfigurace „256\_1T0“. Síť je v tomto případě optimalizována na udržení časových vzdáleností pod hranicí přibližně 15 sekund.



Obr. 5.30: Ukázka optimalizační křivky (kvantil 0,96), CSMA/CA, profil Dual.

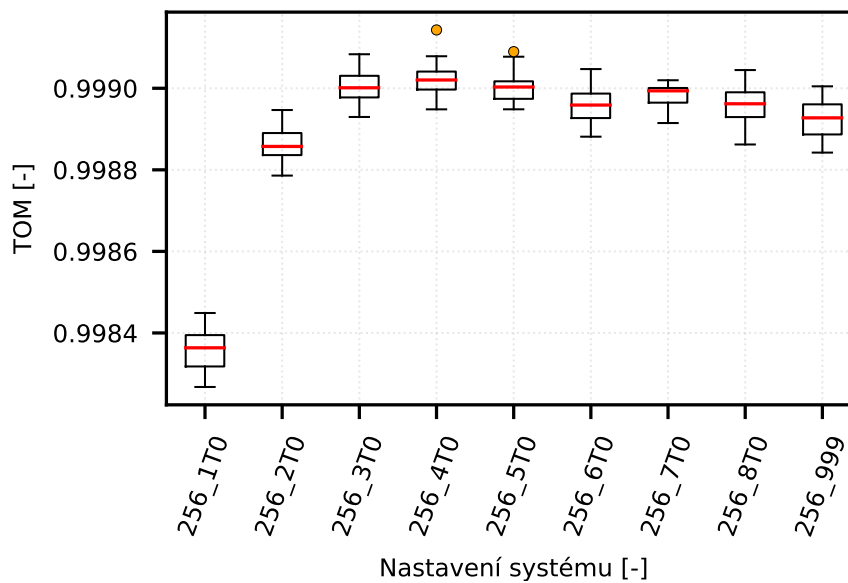
V případě kvantilu 0,99 (Obrázek 5.31) leží optimum na opačné straně grafu v oblasti konfigurace „256\_T999“. V tomto případě odpovídá použití kvantilu 0,99

hranici optimalizace přibližně 40 sekund.



Obr. 5.31: Ukázka optimalizační křivky (kvantil 0,99), CSMA/CA, profil Dual.

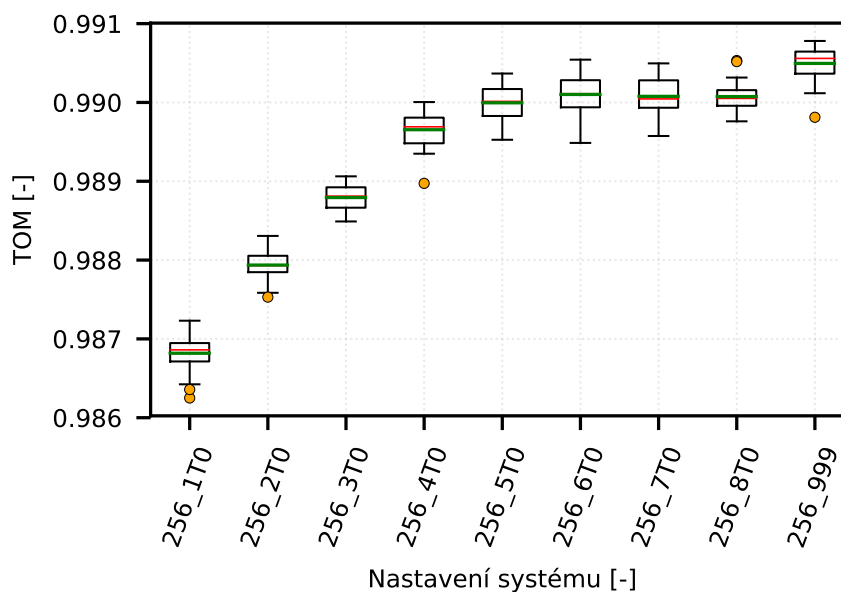
V případě kvantilu 0,999 (Obrázek 5.32) leží optimum ve střední oblasti grafu. V tomto specifickém případě je síť optimalizována spíše na požadavek udržení spojení než specifickou velikost paketové mezery. Hranice optimalizace je nastavena na hodnotu větší než 300 sekund.



Obr. 5.32: Ukázka optimalizační křivky (kvantil 0,999), CSMA/CA, profil Dual.

Jak měření naznačila, tak v řadě případů je nejasné, jak od sebe rozlišit jednotlivé výstupy v rámci představených grafů. Jde především o situace při měřeních na úrovni kvantilů 0,99 a 0,999. Obrázek 5.33 opět zachycuje měření, které je doplněno o zobrazení středních hodnot.





Obr. 5.33: Střední hodnoty pro kvantil 0,99 (označeno zelenou barvou), CSMA/CA, profil Dual.

Tabulka 5.4 ukazuje, že v tomto případě je skutečně nemožné na hladině významnosti 95% rozlišit několik hodnot. Dobrou zprávou nicméně je, že hodnota, která vykazuje nejlepší hodnotu metriky TOM, je jasně odlišitelná, a je proto možné prohlásit dané nastavení za optimální z pohledu optimalizaci na úrovni kvantilu 0,99, což odpovídá přibližně časovému limitu 40,87 s.

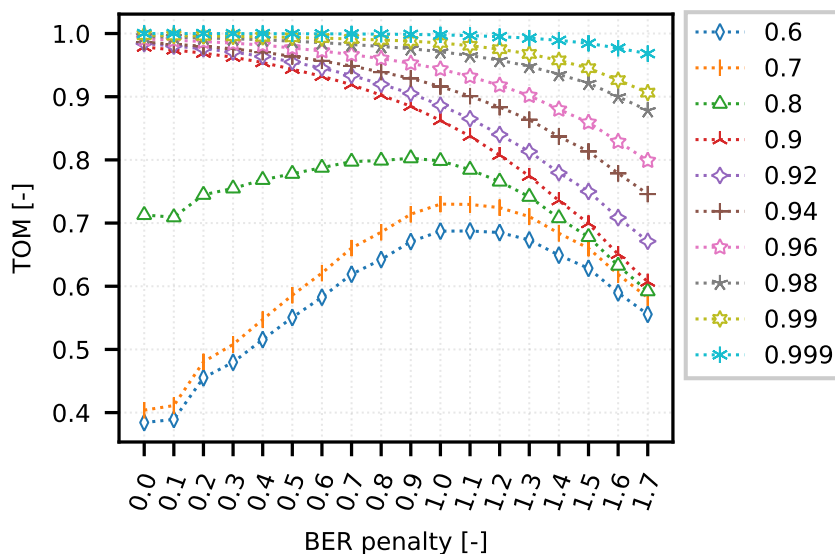
Nastavení	Střední hodnota (TOM)	Interval spolehlivosti	Dochází k překryvu
256_1T0	0,986818	0,000172	NE
256_2T0	0,987937	0,000153	NE
256_3T0	0,988793	0,000122	NE
256_4T0	0,989654	0,000166	NE
256_5T0	0,989996	0,00016	ANO
256_6T0	0,990101	0,000176	ANO
256_7T0	0,990077	0,00018	ANO
256_8T0	0,990074	0,000138	ANO
256_999	0,990495	0,000162	NE

Tab. 5.4: Intervaly spolehlivosti scénáře CSMA/CA pro kvantil 0,99 (40,87 s) a hladině významnosti 95%.

#### 5.4.1.3 Model systému TDMA

V případě použití protokolu na bázi TDMA je situaci značně odlišná. Síťové prostředky jsou přidělovány na základě předpisu plánovače a pravděpodobnost selhání komunikace vlivem vypršení časovačů je minimální. V případě deterministických přístupových protokolů lze předpokládat použití metriky TOM spíše pro optimalizaci spojení takovým způsobem, aby bylo vyhověno přísným požadavkům na zachování kontinuity přenosu. Z provedených měření a analýzy lze nabýt dojmu, že existuje široká škála hodnot pro výběr mezních vzdáleností metriky TOM. Celkový interval, ve kterém leží hodnoty vzdáleností mezi pakety odpovídající zvoleným kvantilům, je ovšem velmi malý a to díky velmi striktnímu přidělování prostředků algoritmem round-robin v rámci testovaného scénáře. Přehled kvantilů a jim odpovídajících hodnot je uveden v tabulce 5.5.

Na obrázku 5.34 je tentokrát zachycena škála průběhů pro kvantily od 0,6 do 0,999. Oproti dříve uvedeným technologiím je rozdíl mezi reálnými hodnotami, které odpovídají kvantilům v rozsahu 0,6 až 0,9, minimální (jak dokladuje tabulka 5.5). To ovšem nemění nic na skutečnosti, že právě v takto úzké oblasti hodnot dochází k radikální změně ve sledovaných parametrech. Ukazuje se, že pro hodnoty nastavení mezní



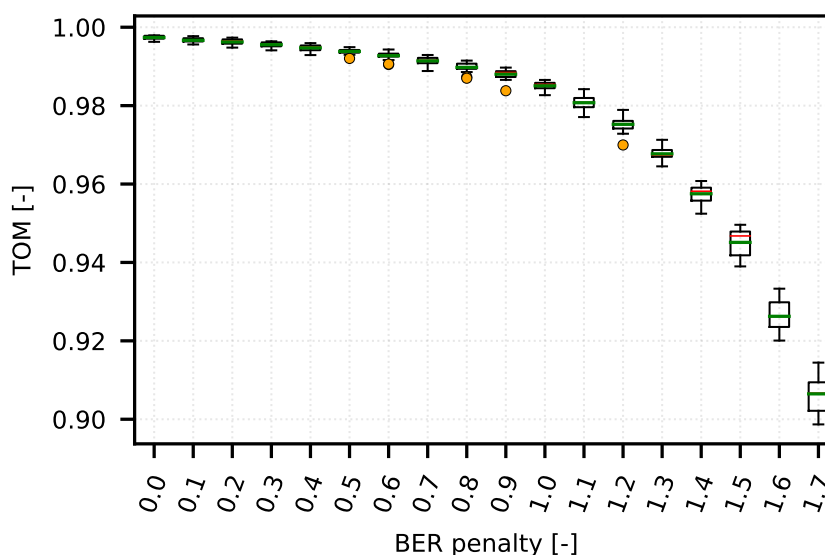
Obr. 5.34: Ukázka optimalizačních křivek (kvantil 0,6 - 0,999), TDMA.

vzdálenosti časových intervalů paketů pro metriku TOM, které odpovídají kvantilu 0,9 a vyšším, má zásadní vliv na zmenšení paketových vzdáleností klesající chybovost v komunikaci. Naopak pro hodnoty, které odpovídají kvantilů nižším než 0,9, se ukazuje, že na zmenšení časových rozdílů paketů, respektive počtu paketů, které přesahují definovanou mezní vzdálenost, má pozitivní vliv určitá zvýšená míra chybovosti. To koresponduje i s výsledky předchozích měření. Na zmíněném obrázku, jde o oblast kolem hodnoty 1,0 (BER penalty), kdy je dosaženo optima.

V rámci ověření rozlišitelnosti jednotlivých hodnot se opět zaměříme na měření odpovídající kvantilu 0,99. Jak je z obrázku 5.35 patrné, tak hodnoty jednotlivých měření leží v intervalech, které jsou zdánlivě dostatečně úzké. Rovněž trend grafu podtrhuje úvahu, že optimum leží v oblasti s nejmenší chybovostí.

<b>Kvantil</b>	<b>0,86</b>	<b>0,87</b>	<b>0,88</b>	<b>0,89</b>
Časový rozdíl [s]	8,60	8,60	8,60	8,63
<b>Kvantil</b>	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>	<b>0,92</b>	<b>0,93</b>
Časový rozdíl [s]	8,67	8,87	9,26	9,56
<b>Kvantil</b>	<b>0,94</b>	<b>0,95</b>	<b>0,96</b>	<b>0,97</b>
Časový rozdíl [s]	9,78	9,97	10,19	10,54
<b>Kvantil</b>	<b>0,98</b>	<b>0,99</b>	<b>0,995</b>	<b>0,999</b>
Časový rozdíl [s]	11,01	11,38	11,68	13,19

Tab. 5.5: Přepočítání kvantilů na konkrétní časové rozdíly paketů, TDMA.



Obr. 5.35: Střední hodnoty pro kvantil 0,99 (označeno zelenou barvou), TDMA

Při vyhodnocení středních hodnot v rámci intervalů spolehlivosti, jak ukazuje tabulka 5.6, opět narážíme na problém s překryvem pravděpodobnosti výskytu středních hodnot měření. Nicméně jak vyhodnocení ukazuje, tak k překryvu nedošlo u maximální hodnoty. Díky tomu, je možné opět prohlásit, že na hladině významnosti 95% leží optimum v části grafu s nejmenší chybovostí.

BER penalty	Střední hodnota (TOM)	Interval spolehlivosti	Dochází k překryvu
0,0	0,99738	0,00043	NE
0,1	0,996662	0,00056	ANO
0,2	0,996248	0,000725	ANO
0,3	0,99555	0,000622	NE
0,4	0,994739	0,000767	NE
0,5	0,99383	0,000588	NE
0,6	0,992745	0,000916	NE
0,7	0,991415	0,000882	NE
0,8	0,98976	0,001073	NE
0,9	0,988019	0,001234	NE
1,0	0,985059	0,000946	NE
1,1	0,980746	0,001548	NE
1,2	0,975232	0,001832	NE
1,3	0,967705	0,001623	NE
1,4	0,957514	0,002141	NE
1,5	0,945115	0,003122	NE
1,6	0,926258	0,003654	NE
1,7	0,906476	0,004063	NE

Tab. 5.6: Intervaly spolehlivosti scénáře TDMA pro kvantil 0,99 (11,38 s) a hladině významnosti 95%.

### 5.4.2 Shrnutí dílčích výsledků

Představená měření ukazují chování optimalizačních postupů v základní síti, kde úzké hrdlo tvoří jednoduchá fronta FIFO, dále pak v topologiích bezdrátových úzkopásmových sítí provozovaných na bázi přístupových protokolů CSMA/CA a TDMA. V případě posledních dvou zmiňovaných scénářů navíc použité simulační modely vychází z reálných implementací uvedených komunikačních systémů a aplikací průmyslových sítí.

Během měření se ukázalo, že ve zvolených intervalech chybovostí, které byly použity pro simulaci zhoršujících se nebo naopak zlepšujících se přenosových podmínek, není možno předpokládat přímou úměru mezi nastolenými podmínkami a patřičnou reakcí datového provozu. To bylo pravděpodobně způsobeno řídicími mechanismy v rámci protokolu TCP ale také parametrizací metriky TOM. Použití metriky TOM v tomto případě ukázalo, že u protokolu TCP může nastat situace, kdy se sice v síti zvyšuje chybovost, ale tento jev má paradoxně kladný vliv na zmenšení délky paketových vzdáleností, respektive počtu těch, které přesahují stanovený interval.

Při použití metriky TOM je třeba si uvědomit, že na rozdíl od metrik založených na některém z Fairness Indexů není důležité, jak jsou síťové prostředky rozděleny mezi jednotlivé datové toky, ale zda pakety v rámci datových toků splňují deklarované kritérium ve smyslu nepřekročení mezních vzdáleností.

Rovněž se ukázalo, že správná parametrizace metriky TOM má zásadní význam pro rozsah, ve kterém je možno provádět optimalizační kroky tak, aby byly provedené změny reflektovány změnou výstupů metriky TOM. Dále je třeba správně volit parametry metriky TOM tak, aby optimalizace splnila svůj účel. Jak se v rámci měření ukázalo, i zhoršení parametrů přenosů může mít kladný vliv na zmenšení paketových prodlev.

V rámci vyhodnocení měření se zahrnutými intervaly spolehlivosti se ukázalo, že pokud nedojde k překryvu intervalů spolehlivosti u optimální hodnoty, je možno prohlásit tuto hodnotu za optimální. Rovněž v tomto případě není nutno doplňovat měření o další běhy nebo je prodlužovat tak, aby došlo ke zmenšení intervalů spolehlivosti.

## 5.5 Ověření metriky TOM

Existuje celá řada hledisek, které je třeba vzít v úvahu pro ověření metriky TOM. V následující části práce se zaměřím na ověření funkčnosti metriky TOM.

Samotné ověření je vhodné rozdělit na několik oblastí:

- Základní ověření funkčnosti<sup>9</sup>.
- Porovnání metriky TOM s metrikami na bázi JFI.
- Vyhodnocení a porovnání výpočetní náročnosti.

### 5.5.1 Porovnání metriky TOM s JFI z pohledu výstupů

Při bližším pohledu na výsledky metrik založených na JFI 5.20, 5.22 a metriky TOM 5.21, 5.23, je patrné, že celá řada výsledků vykazuje velmi podobné trendy. To není náhoda. Paketové vzdálenosti, ať už v časové nebo v absolutní rovině do jisté míry zaručují rovnoprávnost v přístupu k síťovým prostředkům. Proto jsem se rozhodl udělat porovnání výsledků naměřených nad datovými profily Dual a ZigZag v rámci scénáře CSMA/CA, aby se ukázalo, do jaké míry a zda vůbec jsou výsledky metrik JFI a TOM na sobě nezávislé<sup>10</sup>.

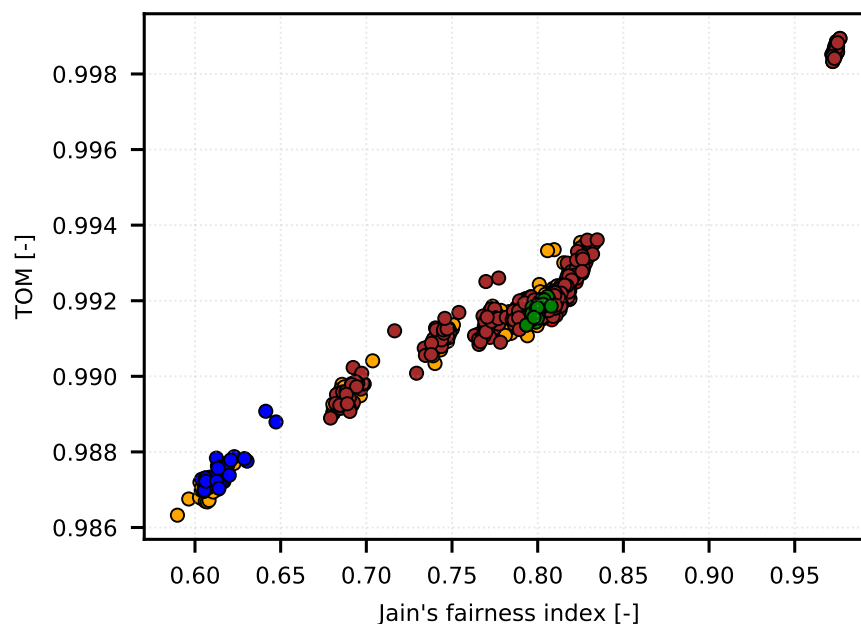
Vzhledem k faktu, že v případě výpočtu korelace dvou datových sad, není výsledek, který je zredukován do formy jednoho čísla příliš vypovídající (pakliže není dosaženo mezních hodnot, které by ukazovaly na jasnou lineární závislost výsledků), rozhodl jsem se provést dodatečně i grafické porovnání na úrovni grafů korelace jednotlivých datových sad.

Obrázek 5.36 názorným způsobem ukazuje vzájemnou korelaci naměřených hodnot pomocí metriky založené na JFI a metriky TOM pro volbu intervalu JFI 300 s a volbu mezních časových rozdílů paketů na úrovni 120 s. V tomto konkrétním případě jde o analýzu datové sady naměřené nad datovým profilem Dual. A podobně obrázek 5.37 ukazuje výsledky analýzy výsledků, které byly naměřeny nad datovým profilem ZigZag.

---

<sup>9</sup>Základní ověření principů a funkčnosti metriky TOM bylo provedeno v části, která se zabývala představením metriky TOM.

<sup>10</sup>Je evidentní, že korelace mezi výsledky do značné míry závisí na volbě optimalizačních kritérií, proto je nutné si uvědomit, že dosažené výsledky reflektují pouze konkrétní sadu měření.



Obr. 5.36: Korelace výstupů metrik JFI (300 s) a TOM (120 s) pro scénář CSMA/CA a profil komunikace Dual.

Tak jak je na obrázku 5.36 patrné, můžeme v tomto případě mluvit o tom, že výsledky získané pomocí metriky založené na JFI a metriky TOM jsou ve značné míře korelované a ukazuje to, že v případě použití profilu Dual by se dalo použití daných metrik zaměnit<sup>11</sup>. Jak bylo ale ukázáno dříve, problematika nastavení mezních vzdáleností metriky TOM je značně komplikovaná, a proto není možné jednoduše dané metriky zaměňovat a to ani v rámci této analýzy. Pokud se zaměříme na konkrétní vypočtenou hodnotu Pearsonovy korelace, pak pro tuto analýzu vychází 0,976 (což je značně blízko mezní hodnotě v intervalu  $\langle -1, 1 \rangle$ , ve kterém leží hodnoty korelace). Takto vysoká hodnota značí velkou pravděpodobnost, že jsou výsledky obou metrik na sobě lineárně závislé.

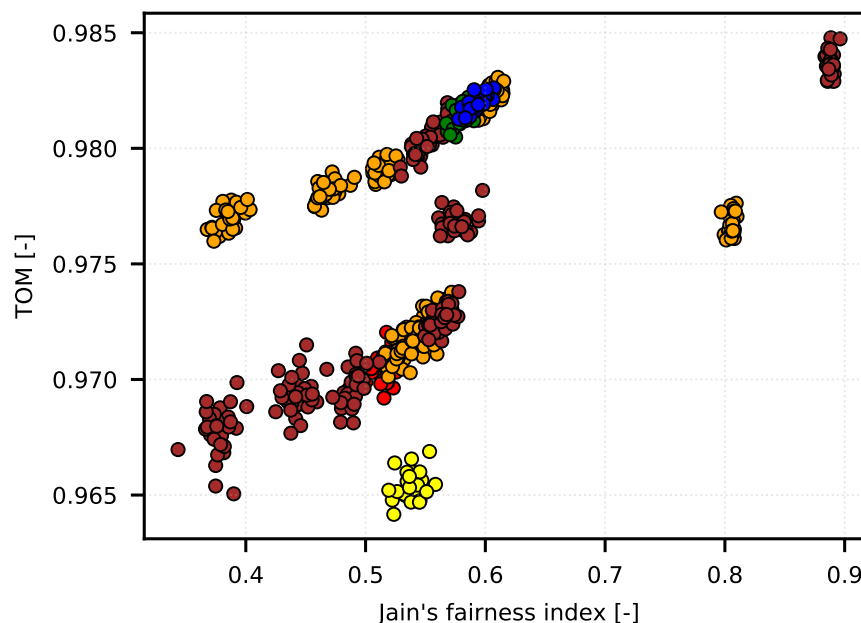
V tomto případě se to dá vysvětlovat mimo jiné tím, že síť díky samoregulačním schopnostem datového profilu nebyla extrémně přetížená a dokázala spravedlivě poskytovat prostředky všem komunikujícím tokům.

Rovněž je nutné vzít v potaz volbu konkrétních mezních vzdáleností, které byly použity pro parametrizaci metriky TOM a rovněž jistou roli hraje i volba délky intervalu

<sup>11</sup>V případě specifického nastavení sítě a metriky TOM a JFI.



výpočtu metriky založené na JFI indexu. Proto není možné výsledky zobecnit a dá se předpokládat, že korelace jednotlivých měření bude značně odlišná v případě větší změny parametrů jednotlivých metrik.



Obr. 5.37: Korelace výstupů metrik JFI (300 s) a TOM (120 s) pro scénář CSMA/CA a profil komunikace ZigZag.

Pokud se zaměříme na vzájemnou korelaci výsledků, které byly získány nad datovým profilem ZigZag, pak zjistíme, že hodnota Paersonovy korelace je v tomto případě 0,492. Z takovéto hodnoty se dá jen špatně usuzovat, zda jsou skutečně výsledky na sobě závislé, případně do jaké míry. A právě pro tento případ je vhodné využít grafickou reprezentaci výsledků, aby bylo mnohem lépe vidět jak jsou jednotlivé výsledky distribuovány v rámci celkové analýzy. Toto je ukázáno na obrázku 5.37. V případě této analýzy je parné, že výsledky nejsou zarovnány v oblasti klesající nebo rostoucí přímky, nýbrž jsou rozprostřeny nad několika oblastmi grafu.

Protože výsledky byly získány v rámci opakovaných simulací nad širokou škálou měření, byly podrobeny analýze vzájemné závislosti rovněž odděleně v rámci jednotlivých měření nad stejnou konfigurací. Měření se lišila pouze ve výchozím nastavení generátoru náhodných čísel.

Jak se ukázalo, tak výsledná grafická reprezentace ve formě grafů kopíruje rozložení,

kteřé je patrné u představených grafů s celkovým vyhodnocením vzájemné korelace. Výsledky ve formě grafů jsou uvedeny v příloze A.

### 5.5.2 Vyhodnocení náročnosti výpočtu metriky TOM

Metrika TOM byla vyvinuta mimo jiné za účelem vyhodnocování velkého množství paralelních simulací. To s sebou nese velké nároky na výpočetní výkon, a proto považují za velmi důležité se zabývat nejen vlastní funkčností dané metriky, ale rovněž provést zhodnocení její výpočetní náročnosti, a to především ve vztahu k již existujícím metrikám. Stejně tak jako v předchozích případech bude porovnání provedeno vůči metrice založené na JFI.

Díky tomu, že v rámci těchto metrik je třeba zpracovat každý paket, a to jak u metrik založených na JFI, tak i u metriky TOM v rámci IPGA analýzy, je výpočetní náročnost značná. Je zjevné, že náročnost výpočtu, respektive čas potřebný pro výpočet, roste s tím, jak roste velikost zpracovávaných dat. To znamená, že přímo závisí na délce záchyty dat, počtu datových toků a množství přenesených dat.

I přesto, že jsou dnes k dispozici i více-jádrové procesory, čas potřebný pro zpracování výstupů simulací je značný i v případě kratších běhů simulací<sup>12</sup>. Analýza takto rozsáhlých dat ve smyslu vyhodnocení metrik na bázi JFI může zabrat až několik dní na běžně dostupném současném počítači (a to daná data byla získána při simulacích úzkopásmových sítí s relativně malou propustností). Za těchto předpokladů je nutné dbát zvýšené opatrnosti při sestavování nové metriky s ohledem na její výpočetní složitost. Je proto rozumné požadovat, aby výpočetní náročnost byla v nejhorším případě podobná jako v případě výpočetní náročnosti metrik založených na JFI.

V následujícím textu je ukázán jeden z možných přístupů k vyhodnocení výpočetní náročnosti metriky TOM. Srovnání je zaměřeno na porovnání s metrikou, která je založena na výpočtu JFI. Pro tento typ srovnání se velmi hodí asymptotické porovnání výpočetní náročnosti, především z toho důvodu, že vzhledem k podobnému charakteru a zpracování každého jednoho paketu, lze předpokládat, že výpočetní náročnost se nebude zásadně lišit. V případě nově představované metriky TOM se můžeme spokojit s konstatováním, že výpočet nebude trvat řádově déle než v případě výpočtu metriky, která je založena na indexu JFI. Za dobrý výsledek se dá považovat, pokud se podaří

---

<sup>12</sup>Typicky analyzovaný datový soubor v kontextu simulací technologie CSMA čítal přibližně 200 až 300 tisíc paketů v každém běhu a datová sada obsahovala typicky 600 běhů ve 20-ti skupinách.

dokázat, že nová metrika TOM nejenom, že spadá do stejné skupiny jako metrika založená na JFI, ale má v nejhroším případě stejnou asymptotickou složitost.

V následujícím textu je detailně rozebrán algoritmus výpočtu metriky TOM a JFI a bude provedeno jejich vzájemné porovnání na úrovni asymptotické složitosti.

Na prvním místě bude popsán základní algoritmus výpočtu metriky založené na indexu JFI. Stejně tak jsou uvedeny související rovnice výpočtu indexu, které je možné ve specifickém případě, kdy požadujeme absolutní rovnost přidělení prostředků, zjednodušit. Postup zjednodušení výpočtu je nastíněn rovnicemi 5.6, 5.7 a 5.8.

Základní výpočet indexu JFI:

$$Fairness\ index = \frac{\left(\frac{T_1}{O_1} + \dots + \frac{T_{NF}}{O_{NF}}\right)^2}{n \cdot \left(\frac{T_1^2}{O_1^2} + \dots + \frac{T_{NF}^2}{O_{NF}^2}\right)} \quad (5.6)$$

V případě, že požadujeme, aby byly zdroje alokovány férově (stejnou vahou) mezi jednotlivé datové toky, pak můžeme daný výpočet zjednodušit použitím substitucí  $O_i$  a  $X_i$  následovně:

$$\frac{(X_1 + \dots + X_{NF})^2}{NF \cdot (X_1^2 + \dots + X_{NF}^2)} \quad \left| \quad O_i = \frac{1}{NF}; \quad X_i = \frac{T_i}{O_i} \quad (5.7)$$

Po provedení substitucí je možné výpočet zjednodušit na následující tvar (kde  $I$  značí počet intervalů přes, které je JFI index počítán):

$$JFI_{mean} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{(\sum_{i=1}^{NF} X_{ij})^2}{NF \sum_{i=1}^{NF} X_{ij}^2} \quad (5.8)$$

Algoritmus (Alg. 1) výpočtu metriky založené na JFI pak vypadá následovně:

---

**Alg. 1** Základní algoritmus výpočtu metriky založené na JFI za předpokladů požadavku rovnoměrné alokace síťových prostředků.

---

```

1: function GETMEANJFI(DATA)
2:   define int array TP[ $MAX_{stream\_id}$ ];
3:   time_limit = Interval;
4:   set all values in TP array to zero;
5:   cnt = 0;
6:   for all packets in DATA do
7:     id = getStreamId(paket);
8:     if  $pkt_{time} \leq time\_limit$  then
9:        $TP[id] = TP[id] + Pkt_{size}$ ;
10:    else
11:       $JFI_{cnt} = computeJFI(TP)$ ;
12:       $JFI_{sum} = JFI_{sum} + JFI_{cnt}$ ;
13:      set all values in TP array to zero;
14:      time_limit = time_limit + Interval;
15:       $TP[id] = TP[id] + Pkt_{size}$ ;
16:      cnt = cnt + 1;
17:    end if
18:  end for
19:   $JFI_{mean} = JFI_{sum} / cnt$ ;
20:  return  $JFI_{mean}$ ;
21: end function

```

---

V rámci porovnání asymptotické složitosti algoritmů byla sestavena rovnice 5.9, která reflektuje popsany algoritmus.

$$T(NF, M) = W + (W \cdot M) + (W \cdot (1 + NF) \cdot J) = \mathcal{O}(M + J) \quad (5.9)$$

Kde  $W$  je malá konstanta (v tomto případě uvažujeme  $W < 10$ ) nahrazující jednoduché příkazy a kontrolní struktury pro větvení a opakování částí kódu. U těchto struktur předpokládáme, že asymptotická náročnost výpočtu leží v množině  $\mathcal{O}(1)$ ;  $M$  je rovno

počtu zpracovávaných paketů. V tomto případě předpokládáme, že tak jak roste  $M$ , tak současně s tím se navyšuje čas potřebný pro výpočet;  $J$  zde reprezentuje počet intervalů, do kterých byl výpočet JFI rozdělen; O  $J$  se dá říci, že v případě, že roste délka zpracovávaných dat v čase, tak roste i počet intervalů, které je nutné zpracovávat a to za předpokladu neměnné délky tohoto intervalu. Rovněž se dá předpokládat, že zkrácením intervalů výpočtů indexu JFI dojde k nárůstu hodnoty  $J$ ;  $NF$  zastupuje počet analyzovaných datových toků v rámci zpracovávané komunikace. Proto můžeme v kontextu analýzy specifického datového souboru považovat  $NF$  rovněž za konstantu z pohledu asymptotické složitosti. Čas výpočtu proto závisí rovněž na hodnotách konstant  $J$  a  $NF$ .

Pro výpočet asymptotické složitosti algoritmu počítáme s tím, že násobek hodnot  $J$  a  $NF$  je vždy výrazně menší než hodnota  $M$ . V případech, kdy byl v rámci této práce počítán index JFI vycházela hodnota proměnné  $J$  přibližně na hodnotu 350 u analýzy datových souborů profilů Dual a ZigZag, které byly prováděné na intervalech délky 300 s, Počet analyzovaných datových toků  $NF$  byl roven počtu 32. Počet analyzovaných paketů se v těchto případech pohyboval od  $100 \cdot 10^3$  do  $250 \cdot 10^3$  paketů.

V notaci *big – O* pak můžeme zanedbat vliv těchto proměnných vzhledem k jejich minoritnímu významu a vlivu na celkovou délku výpočtu v případě asymptotického porovnání algoritmů. Hlavní důraz je kladen právě na počet zpracovávaných paketů  $M$ . Navíc i pokud by hodnota součinu  $J$  a  $NF$  byla blízká či dokonce o něco větší než  $M$ , pak by se dala asymptotická složitost v kontextu představeného algoritmu vyjádřit jako  $2M$ . To se ovšem v kontextu výpočtu asymptotické složitosti opět redukuje na asymptotickou složitost v množině  $\mathcal{O}(M)$ . Vzhledem ke všem zmíněným faktům a předpokladům je následně možné zařadit tento algoritmus výpočtu do množiny  $\mathcal{O}(M)$ , jak ukazuje rovnice 5.10.

$$T(NF, M) = \mathcal{O}(M) \quad | \quad NF \ll M; \quad (5.10)$$

Dále se blíže podíváme na algoritmus výpočtu metriky TOM založené na zpracování dat z analýzy IPGA. Algoritmus výpočtu je ve zjednodušené formě představen ve výpisu 2 a jeho normalizovaná forma je popsána rovnicí 5.11.

$$TOM_{norm} = 1 - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^{NF} \sum_{m=1}^{M_i} f(m) \quad (5.11)$$

Algoritmus (Alg. 2) výpočtu TOM pak vypadá následovně:

---

**Alg. 2** Základní algoritmus výpočtu metriky TOM, která se opírá o data analýzy IPGA.

---

```

1: function GETTOM(DATA)
2:   define int array MG[ $MAX_{stream\_id}$ ];
3:   define int array LAST[ $MAX_{stream\_id}$ ];
4:   set all values in MG array to zero;
5:   set all values in LAST array to zero;
6:    $cnt = 1$ ;
7:   for all packets in DATA do
8:      $id = getStreamId(packet)$ ;
9:      $gap = cnt - (LAST[id] + 1)$ ;
10:     $LAST[id] = cnt$ ;
11:    if  $gap > LIM$  then
12:       $MG[id] = MG[id] + 1$ ;
13:    end if
14:  end for
15:   $TTOM = computeTTOM(MG)$ ;
16:  return  $TTOM$ ;
17: end function

```

---

Základní popis algoritmu je možné provést na asymptotické úrovni tak, jak je naznačeno rovnicí 5.12.

$$T(M) = W + (W \cdot M) + (W \cdot NF) = \mathcal{O}(M) \quad (5.12)$$

V tomto případě je možné aplikovat podobná pravidla jako v případě vyjádření složitosti algoritmu u metriky založená na indexu JFI. Zásadní rozdíl, který je na první pohled v algoritmu patrný, je ten, že TOM metrika je počítána pouze jednou na konci celého algoritmu. Asymptotická složitost výpočtu vlastní metriky TOM v tomto specifickém případě závisí především na počtu analyzovaných toků  $NF$ . Všechny ostatní dílčí výpočty jsou prováděny během zpracování informací o jednotlivých paketech. Jejich počet je opět vyjádřen proměnnou  $M$ . Vzhledem k faktu, že náročnost konečného

výpočtu metriky z před počítaných dat je možné zanedbat. Proto výsledná asymptotická složitost algoritmu také leží v množině  $\mathcal{O}(M)$ .

Na teoretické úrovni můžeme vyvodit, že algoritmy mají stejnou asymptotickou složitost nebo také, že algoritmus pro výpočet metriky TOM, který se opírá o informace z analýzy IPGA, je asymptoticky stejně výpočetně náročný jako algoritmus pro výpočet metriky založené na počítání indexu JFI a to za předpokladu, že  $NF \ll M$  v případě metriky založené na indexu JFI.

V reálné implementaci algoritmů mohou rozdíly, které jsou zanedbatelné na úrovni asymptotického porovnání, hrát významnou roli ve vztahu k délce výpočtu. V rámci ověřování funkčnosti metriky TOM a jejím porovnání s metrikou založenou na výpočtu indexu JFI, se ukázalo, že metrika TOM dosahuje značné úspory času<sup>13</sup>. Kromě volby výpočetního prostředí, můžeme tento fakt přisoudit implementaci vlastního algoritmu, kdy v případě metriky TOM dochází k hlavní výpočtu pouze jednou, kdežto u metriky založené na indexu JFI je metrika počítána pro každý jednotlivý interval.

### 5.5.3 Shrnutí dílčích výsledků

Tato část se věnovala porovnání představované metriky TOM s metrikou založenou na indexu JFI. V rámci měření se ukázalo, že při specifické volbě parametrů metriky TOM, je tato metrika v některých případech značně korelovaná s metrikou založenou na JFI. Nicméně vzhledem k faktu, že toto nastává pravděpodobně jen v úzkém spektru parametrů metriky TOM, není možné další zobecnění. Faktem ovšem zůstává, že metrika TOM při správném nastavení, stejně jako metriky založené na JFI indexu, dobře reflektuje podmínky pro přenos datových toků.

V rámci porovnání metriky TOM a metriky založené na indexu JFI byla vyhodnocena i jejich výpočetní náročnost z pohledu zpracování výsledků měření v prostředí jazyka Python. Analýza ukázala, že nově představené metrika by neměla být výpočetně náročnější než metrika založená na JFI z pohledu asymptotické složitosti. Reálné zkušenosti ukazují, že metrika TOM se počítá rychleji. To může být ovšem do jisté míry způsobeno konkrétní implementací.

---

<sup>13</sup>Oba algoritmy byly implementovány v jazyce Python a využívaly rozšíření Pandas pro manipulaci s daty a získávání statistických informací. V tomto případě nemůžeme předpokládat nejlepší možné využití výpočetních prostředků, a proto se uvedené informace vztahují jen k této konkrétní implementaci.

# Kapitola 6

## Shrnutí poznatků a závěry

Tato závěrečná část práce je věnována shrnutí dosažených výsledků a jejich přínosů pro praxi. Rovněž jsou zde formulovány některé závěry a doporučení pro další rozvoj popisované problematiky optimalizačních přístupů, a to především v oblasti úzkopásmových sítí.

Disertační práce byla zaměřena na hledání nového způsobu vyhodnocování síťového provozu, aby bylo dosaženo nižší pravděpodobnosti selhání spojení. Hlavní motivace pramení z problematiky optimalizace datových přenosů v úzkopásmových sítích. Běžně užívané postupy nedovolují jednoduchým způsobem vyhodnocovat vliv nastavení síťových parametrů (včetně nastavení přenosových protokolů) na kontinuitu a celkovou udržitelnost aktivního spojení. Nově představená metrika TOM, která je založena na sledování paketových vzdáleností a časových odstupů paketů, tuto problematiku úspěšně řeší.

### 6.1 Vyhodnocení vlivu charakteru provozu

V rámci simulací bylo prokázáno, že význam charakteru provozu není zanedbatelný, a to jak v rovině vlivu na mix datového provozu v síti, tak i na schopnosti jednotlivých optimalizačních metrik tento provoz vyhodnocovat. Právě pomocí různých profilů datového provozu, včetně aplikačního provázání jednotlivých datových zpráv, je možné simulovat nejen běžný provoz v síti, ale i vliv aplikačního řízení (tak, jak probíhá například na úrovni řídicích systémů SCADA) na probíhající komunikaci.



V rámci provedených experimentů, kdy byl zkoumán datový provoz z pohledu férovosti přidělovaných prostředků a z pohledu převážně časových odstupů paketů, se podařilo prokázat, že metriky založené na JFI indexu i nově představená metrika TOM dokáží poskytnout zpětnou vazbu, která reflektuje právě použité optimalizační kritérium, a to napříč měřicími scénáři, které pokrývají základní spektrum přístupových metod. Rovněž se podařilo poukázat na typ datového provozu IEC 60870-5-104, který je striktně řízen na aplikační vrstvě, kde je v případě obou metrik problematické nalezení vhodného nastavení a jeho následné vyhodnocení.

## 6.2 Vyhodnocení přínosu a použitelnosti TOM

V rámci disertační práce se podařilo sestavit novou metriku TOM pro vyhodnocování datového provozu za účelem optimalizace datových přenosů v úzkopásmových sítích. Základem nového přístupu k vyhodnocování datových přenosů nejsou běžně užívané výkonnostní parametry datových přenosů dle doporučení ITU-T a IETF, ani není založen na žádném indexu férovosti typu JFI. Metrika TOM přináší nový pohled na vyhodnocování provozu, a to čistě na bázi analýzy paketových vzdáleností a časových odstupů paketů, která byla představena pod zkratkou IPGA. Díky tomu je možno optimalizovat datové přenosy čistě z pohledu lepší kontinuity datových toků a udržitelnosti jednotlivých spojení. To v konečném důsledku může znamenat i celkově lepší propustnost sítě za situace, kdy jednotlivá spojení sice přenáší data menší rychlostí, ale spolehlivěji, a proto není třeba zbytečně opakovat celé přenosy.

Představenou metriku a algoritmus jejího výpočtu je možno hodnotit z několika různých úhlů pohledu, jak bylo ukázáno v kapitole 5.

Z provedených analýz vyplývá přínos metodiky založené na IPGA a metrice TOM pro zlepšení vlastností optimalizovaných datových toků úzkopásmových komunikačních sítí. Analýzy rovněž ukázaly jednu z velkých nevýhod uvedených optimalizačních postupů, což je relativně složitá parametrizace, která zatím není plně automatizovatelná. Tímto směrem se bude nyní ubírat další výzkum a vývoj. V konečné fázi by bylo přínosné vytvořit analyzační systém založený na metodice IPGA-TOM, jehož parametrizace i činnost budou plně automatické. To by otevřelo nové možnosti nasazení v podobě analýzy v reálném čase prováděné přímo v komunikačních zařízeních.

### 6.3 Splnění vytyčených cílů disertace

- **Analyzovat charakter úzkopásmových sítí z pohledu jejich přenosových vlastností, typického využití a specifických problémů, které jsou spojeny s omezeným přenosovým pásmem.**

Cíl jsem splnil prostudováním obecné problematiky analýzy sítí v uvedených oblastech. Jediným problémem se zdá být neexistující dokumentace, která by přesně vymezovala oblast úzkopásmových sítí. Daný problém a stejně tak i další podstatné poznatky jsou shrnuty v kapitole 2 v části 2.1.

- **Analyzovat problematiku testování sítí s ohledem na úzkopásmové sítě a spojově orientované protokoly.**

Daná problematika je popsána v kapitole 2 v částech 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.2 a 2.6. Jak se ukázalo, nejsou k dispozici specifická doporučení IETF, případně ITU-T pro testování úzkopásmových sítí. Lze vycházet jen z obecných doporučení. Další možností je použití indexů se zaměřením na férovost přidělování prostředků či metrik CER/TER, které byly speciálně pro analýzu provozu vyvinuty v rámci naší pracovní skupiny na katedře telekomunikační techniky.

- **Navrhnout novou optimalizační metriku se zaměřením na zlepšení udržitelnosti spojově orientovaných přenosů v úzkopásmových sítích.**

V rámci disertační práce se podařilo sestavit metriku TOM, která umožňuje na základě vyhodnocení absolutních paketových vzdáleností či časových rozdílů paketů optimalizovat přenosové parametry konkrétních řešení za účelem zlepšení udržitelnosti přenosu či minimalizace paketových vzdáleností, případně časových rozdílů paketů v rámci jednotlivých datových toků.

- **Navrhnout topologii sítě a vybrat vhodné prostředí pro ověření návrhu nové metriky.** - Návrh síťových topologií byl podmíněn jednak předvídatelností chování simulačního prostředí, jednak reálným nasazením úzkopásmových tech-

nologií, a to především se zaměřením na oblast energetiky. Zvolené topologie jsou vyobrazeny v kapitole 4 na obrázcích 4.1, 4.2 a 4.3. Jako simulační prostředí byl vybrán Omnet++. Důvody pro výběr tohoto specifického prostředí jsou popsány v kapitole 4.

- **Vytvořit vhodné modely pro ověření funkce navržené metriky.**

V rámci této práce se podařilo vytvořit jednoduchý model DumbBell využívající omezeného sdíleného kanálu s jedinou frontou typu FIFO pro základní otestování funkčnosti metriky TOM. Pro náročnější testování byl díky spolupráci s firmou Racom s.r.o. převzat její model modemu RipEX-300, který v základní verzi pracuje na úrovni přístupového protokolu CSMA/CA. Pro testování chování metriky v případě použití deterministických metod přístupu k médiu byl použit nově vyvíjený model modemu, na jehož vývoji jsem se z velké části podílel, pracující na bázi přístupové metody TDMA a v základním nastavení řízený striktní implementací algoritmu round-robin.

- **Ověřit vlastnosti nové metriky na vhodném modelu.**

Měření ukázala, že metrika má požadované chování. To znamená, že je schopna reflektovat změny v nastavení sítě. Chování metriky bylo ověřeno v rámci rozsáhlého testování. Testování metriky TOM je zachyceno v rámci částí 5.3.5 a 5.5 v kapitole 5. V rámci testování se rovněž prokázala stabilita a funkčnost simulovaných modelů.

- **Porovnat novou metriku s aktuálně dostupnými metrikami.**

Porovnání bylo prováděno hlavně vůči metrice založené na indexu JFI, a to vzhledem k faktu, že jde o hojně využívaný přístup pro základní ověřování funkčnosti spojově orientovaných protokolů všude tam, kde je očekáván souběh více spojení. Porovnání bylo provedeno z různých úhlů pohledu. Metrika byla porovnávána co do její funkčnosti a průběhu hodnot, které reflektují změny v přenosovém řetězci. Na základě velké podobnosti výsledků ve specifických případech byla dále metrika posuzována z pohledu korelace mezi metrikou založenou na JFI a metrikou TOM pro vybraná měření. Vzhledem k předpokládanému rozsahu analyzovaných dat, byla metrika rovněž podrobena zkoumání z pohledu výkonnosti zpracování dat a výsledky byly porovnány s metrikou založenou na indexu JFI.

- **Na základě výsledků simulací formulovat konkrétní závěry o vhodnosti a způsobu použití nové metriky pro optimalizaci spojově orientovaných protokolů za účelem zlepšení jejich udržitelnosti.**

Dílní výsledky jsou shrnuty v příslušných částech kapitoly 5. Celkovému shrnutí přínosu této práce spolu s formulováním obecných závěrů a závěrů pro využití

v praxi je věnována kapitola 6.

## 6.4 Závěry pro praxi

V rámci disertační práce byly použity modely, které vycházejí jednak z konkrétního reálného modemu RipEX-300 firmy Racom s.r.o. (model použitý v rámci scénáře CSMA/CA), jednak z nově vyvíjeného modelu modemu, v rámci projektu č. TA04011571, který by jej měl v řadě oblastí nahrazovat (model použitý v rámci scénáře TDMA). Rovněž použité topologie byly odvozeny od topologií používaných v reálném nasazení. V rámci provedených měření se prezentované postupy ukázaly jako přínosné a dané simulační modely mohou být v kombinaci s metodikou založenou na analýze paketů IPGA a optimalizační metrice TOM využity pro optimalizaci reálných implementací uvedených komunikačních systémů a aplikací v průmyslových sítích.

Rovněž se podařilo ukázat, že výpočetní náročnost představené analýzy IPGA v kombinaci s metrikou TOM není větší než u metrik, které jsou založeny na analýze indexu JFI.

## 6.5 Možnosti dalšího rozvoje problematiky

Vzhledem k tomu, že v rámci disertační práce nebylo detailněji prozkoumáno, jaký vliv na dosažené optimalizační výsledky má umístění sondy pro záchyt dat, bylo by vhodné doplnit ověření funkčnosti metriky TOM o další měření. Ta by se měla zaměřit právě na zkoumání tohoto vlivu. V případě, že by byl tento vliv na výsledky metriky TOM prokázán, měla by být upravena optimalizační metodika o postup výběru správného umístění sondy pro záchyt dat.

Další specifickou oblastí je vlastní parametrizace metriky TOM a to jak v oblasti absolutních paketových vzdáleností, tak i v rovině časových rozdílů mezi pakety. Jak bylo v kapitole 5 ukázáno, jedná se o zásadní problém, který má přímý dopad na použitelnost metriky TOM v reálné praxi.

Jako použitelné se jeví postupy, které umožňují alespoň základní parametrizaci metriky TOM. Nejpřirozenější je časová oblast. V časové oblasti analýzy paketů je možné se opřít o údaje, které jsou dostupné na úrovni jednotlivých protokolů napříč vrstvami referenčního modelu ISO/OSI. Zde se opíráme především o speci-

fikace různých časovačů, jejichž vypršení by mělo za následek buď opakování části přenosu, nebo dokonce jeho celkové selhání. To je vhodné především v situacích, kdy je přenosový řetězec optimalizován za účelem lepší udržitelnosti spojení z dlouhodobé perspektivy. Za předpokladu, že je třeba optimalizovat přenosový řetězec na konkrétní časová omezení, je možné přímo využít těchto požadavků jako mezní vzdálenosti pro nastavení metriky TOM.

Pokud se zaměříme na oblast absolutních paketových vzdáleností, pak narážíme na problém, že nemáme k dispozici vodička, jak danou metriku vhodně parametrizovat. Jediný požadavek, ze kterého by se dalo částečně vycházet, je požadavek na částečné férové přidělování prostředků, kdy jednou za  $n$  paketů z ostatních toků by mělo dojít k přidělení kapacity přenosového pásma sledovanému toku.

Ukazuje se tedy, že v oblasti nasazení optimalizační metriky TOM je třeba dále pracovat na postupech, které by umožnily její snadné nastavení, a to i v situacích, kdy nejsou pevně dána omezení pro časování paketů v rámci jednotlivých datových toků. Typickým případem je situace, kdy chceme jednoduše minimalizovat paketové vzdálenosti. To s sebou nese problém vhodného nastavení optimalizačních kritérií ve formě zvolené mezní vzdálenosti pro metriku TOM. Pokud dojde ke zvolení optimalizačního kritéria příliš volně, hrozí riziko, že v celé škále hodnot metriky TOM nebude možné jednoduše rozlišit přínos jednotlivých optimalizačních kroků. Rovněž je třeba respektovat rozložení paketových vzdáleností a od jisté meze, která ovšem závisí na specifickém nastavení komunikace, nemusí být příliš striktní nastavení kritéria také vhodné.

Právě v oblasti nalezení vhodného úvodního nastavení je třeba ještě pokračovat ve výzkumu. Velkým úspěchem by bylo nalezení postupů, které by na základě měření nad výchozím stavem komunikačního řetězce umožnily stanovit vhodné parametry pro metriku TOM. Nejlépe ve formě horní a dolní meze, čímž by se vymezilo ideální pracovní pásmo metriky TOM pro konkrétní měření.

V rámci dalšího zkoumání se jeví jako zajímavé téma prověření, do jaké míry ovlivní volba typu analýzy (absolutní vzdálenosti paketů vs. časové rozdíly paketů) výsledky metriky TOM v návaznosti na jednotlivé typy prezentovaných testovacích scénářů.

# Literatura

- [L1] O. Vondrouš, “Adaptivní řízení QoS pro internetovou telefonii,” *Access server*, vol. 10, pp. 1–6, 5 2012.
- [L2] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “FlowPing - The New Tool for Throughput and Stress Testing,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, pp. 516–521, prosinec 2015.
- [L3] O. Vondrouš, P. Macejko, T. Hégr, and Z. Kocur, “Testing Methodology for Performance Evaluation of Communication Systems for Smart Grid,” in *The Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, (Praha, CZ), pp. 12–17, 2016.
- [L4] R. T. B. Ma, V. Misra, and D. Rubenstein, “An analysis of generalized slotted-aloha protocols,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, pp. 936–949, June 2009.
- [L5] A. C. V. Gummalla and J. O. Limb, “Wireless medium access control protocols,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 3, pp. 2–15, Second 2000.
- [L6] R. Fantacci, S. Nannicini, and T. Pecorella, “Performance evaluation of polling protocols for data transmission on wireless communication networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 21, pp. 9–33, Sep 2002.
- [L7] O. Vondrouš, Z. Kocur, T. Hégr, and O. Slavíček, “Performance Evaluation of IoT Mesh Networking Technology in ISM Frequency Band,” in *Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME) 2016*, (Prague, CZ), pp. 488–495, 2016.

- [L8] C. Meinel and H. Sack, *The Foundation of the Internet: TCP/IP Reference Model*, pp. 29–61. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [L9] W. Shang, Y. Yu, R. Droms, and L. Zhang, “Challenges in iot networking via tcp/ip architecture,” *Access*, 2016.
- [L10] “Tcp over constrained-node networks.” (<https://tools.ietf.org/html/draft-gomez-lwig-tcp-constrained-node-networks-03>).
- [L11] M. Welzl, *Network Congestion Control: Managing Internet Traffic*. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, Wiley, 2005.
- [L12] M. Welzl, *Scalable Performance Signalling and Congestion Avoidance*. Springer US, 2012.
- [L13] D.-M. Chiu and R. Jain, “Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks,” *Computer Networks*, vol. 17, pp. 1–14, 1989.
- [L14] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “Multipath TCP in LTE Networks,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, pp. 294–300, 12 2014.
- [L15] S. Ma, J. Jiang, W. Wang, and B. Li, “Towards RTT fairness of congestion-based congestion control,” *CoRR*, vol. abs/1706.09115, 2017.
- [L16] M. Hock, R. Bless, and M. Zitterbart, “Experimental evaluation of bbr congestion control,” in *2017 IEEE 25th International Conference on Network Protocols (ICNP)*, pp. 1–10, Oct 2017.
- [L17] WonderNetwork, “Global ping statistics,” 2018. (<https://wondernetwork.com/pings>).
- [L18] P. Yang, W. Luo, L. Xu, J. Deogun, and Y. Lu, “Tcp congestion avoidance algorithm identification,” in *Distributed Computing Systems (ICDCS), 2011 31st International Conference on*, pp. 310–321, June 2011.
- [L19] D.-M. Chiu and R. Jain, “Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks,” *Computer Networks and {ISDN} Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 1 – 14, 1989.

- [L20] S. Ha, I. Rhee, and L. Xu, “Cubic: A new tcp-friendly high-speed tcp variant,” *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 42, pp. 64–74, July 2008.
- [L21] K. Tan, J. Song, Q. Zhang, and M. Sridharan, “A compound tcp approach for high-speed and long distance networks,” in *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pp. 1–12, April 2006.
- [L22] R. Jain, D. M. Chiu, and H. WR, “A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems,” vol. cs.NI/9809099, 01 1998.
- [L23] J. Chen, L. Subramanian, J. Iyengar, and B. Ford, “Taq: Enhancing fairness and performance predictability in small packet regimes,” in *Proceedings of the Ninth European Conference on Computer Systems, EuroSys '14*, (New York, NY, USA), pp. 7:1–7:14, ACM, 2014.
- [L24] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “Simulation of the Application Layer in NarrowBand Networks with Conditional Data Injection XML Scheme Based on Universal Data Generator,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 639–647, 2017.
- [L25] Y. Zhang, S.-R. Kang, and D. Loguinov, “Delayed stability and performance of distributed congestion control,” in *Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, SIGCOMM '04*, (New York, NY, USA), pp. 307–318, ACM, 2004.
- [L26] F. Kelly, *Mathematical Modelling of the Internet*, pp. 685–702. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [L27] D. Bertsekas and R. Gallager, *Data Networks*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [L28] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “CER/TER - The New Metric for TCP Connection Robustness Evaluation and Comparison,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, pp. 529–535, prosinec 2015.
- [L29] “Tcptrace - tcp/ip analysis tool.” (<http://www.tcptrace.org>).



- [L30] Z. Molnár, *Pokročilé metody vědecké práce*. Věda pro praxi, Profess Consulting, 2012.
- [L31] A. Varga, “The omnet++ discrete event simulation system,” in *In ESM’01*, 2001.
- [L32] “Inet framework.” (<https://inet.omnetpp.org>).
- [L33] “Česká národní gridová infrastruktura.” (<https://www.metacentrum.cz/cs/>).
- [L34] M. Guizani, A. Rayes, B. Khan, and A. Al-Fuqaha, *Network Modeling and Simulation: A Practical Perspective*. Wiley, 2010.
- [L35] J. Banks, *Discrete-event System Simulation*. Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [L36] T. Hégr and L. Boháč, “Synthesizing tcp data traffic from industrial networks for simulations,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, pp. 536–544, December 2015.
- [L37] R. Dowling, P. J. Holland, and P. A. Huang, “California department of transportation guidelines for applying traffic microsimulation modeling software,” *way*, vol. 3, pp. 3–2, 2002.
- [L38] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “On Limits of Embedded Systems in Network Packet Processing,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, pp. 405–412, 10 2016.
- [L39] O. Vondrouš, Z. Kocur, and J. Hrad, “New Methodology for Inter-Packet Gaps Analysis in a TCP Flow,” *International Journal of Communication Systems*, 2018. [V recenzním řízení, 60% podíl autora na článku].
- [L40] O. Vondrouš, Z. Kocur, and J. Hrad, “Transmission Optimization Metrics Setup Issues in the Field of Time Constrained Communications,” *Sensors*, 2018. [V recenzním řízení, 60% podíl autora na článku].

# Standardy

- [S1] J. Postel, “Assigned numbers.” RFC 739 (Historic), Nov. 1977. Obsoleted by RFC 750.
- [S2] S. Bradner and J. McQuaid, “Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices.” RFC 2544 (Informational), Mar. 1999. Updated by RFCs 6201, 6815.
- [S3] ITU-T, “Ethernet service activation test methodology.” Y-1564 (In force), Feb. 2016.
- [S4] B. Constantine, G. Forget, R. Geib, and R. Schrage, “Framework for TCP Throughput Testing.” RFC 6349 (Informational), Aug. 2011.
- [S5] ITU-T, “Ethernet frame transfer and availability performance.” Y-1563 (In force), Jan. 2009.
- [S6] J. Postel, “Transmission Control Protocol.” RFC 793 (INTERNET STANDARD), Sept. 1981. Updated by RFCs 1122, 3168, 6093, 6528.
- [S7] P. Matoušek, “Description and analysis of iec 104 protocol,” tech. rep., 2017.
- [S8] R. Braden, “Requirements for Internet Hosts - Communication Layers.” RFC 1122 (INTERNET STANDARD), Oct. 1989. Updated by RFCs 1349, 4379, 5884, 6093, 6298, 6633, 6864.
- [S9] K. Ramakrishnan, S. Floyd, and D. Black, “The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP.” RFC 3168 (Proposed Standard), Sept. 2001. Updated by RFCs 4301, 6040.

- [S10] F. Gont and A. Yourtchenko, “On the Implementation of the TCP Urgent Mechanism.” RFC 6093 (Proposed Standard), Jan. 2011.
- [S11] F. Gont and S. Bellovin, “Defending against Sequence Number Attacks.” RFC 6528 (Proposed Standard), Feb. 2012.
- [S12] J. Nagle, “Congestion Control in IP/TCP Internetworks.” RFC 896, Jan. 1984.
- [S13] E. Kohler, M. Handley, and S. Floyd, “Datagram Congestion Control Protocol (DCCP).” RFC 4340 (Proposed Standard), Mar. 2006. Updated by RFCs 5595, 5596, 6335, 6773.
- [S14] R. Stewart, “Stream Control Transmission Protocol.” RFC 4960 (Proposed Standard), Sept. 2007. Updated by RFCs 6096, 6335, 7053.
- [S15] V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi, and M. Mathis, “Framework for IP Performance Metrics.” RFC 2330 (Informational), May 1998. Updated by RFC 7312.
- [S16] J. Fabini and A. Morton, “Advanced Stream and Sampling Framework for IP Performance Metrics (IPPM).” RFC 7312 (Informational), Aug. 2014.
- [S17] A. Morton, “IMIX Genome: Specification of Variable Packet Sizes for Additional Testing.” RFC 6985 (Informational), July 2013.
- [S18] G. Almes, S. Kalidindi, and M. Zekauskas, “A One-way Delay Metric for IPPM.” RFC 2679 (Proposed Standard), Sept. 1999.
- [S19] S. Bradner, “Benchmarking Terminology for Network Interconnection Devices.” RFC 1242 (Informational), July 1991. Updated by RFC 6201.
- [S20] S. Bradner, K. Dubray, J. McQuaid, and A. Morton, “Applicability Statement for RFC 2544: Use on Production Networks Considered Harmful.” RFC 6815 (Informational), Nov. 2012.
- [S21] A. Morton, “Active and Passive Metrics and Methods (with Hybrid Types In-Between).” RFC 7799 (Informational), 2016.
- [S22] ITU-T, “Internet protocol data communication service – IP packet transfer and availability performance parameters.” Y-1540 (In force), July 2016.

- [S23] ITU-T, “Framework for monitoring the quality of service of IP network services.” Y-1545.1 (In force), Mar. 2017.
- [S24] ITU-T, “Parameters for TCP connection performance in the presence of middle-boxes.” Y-1560 (In force), Sept. 2003.
- [S25] ITU-T, “Framework for higher-layer protocol performance parameters and their measurement.” Y-1562 (In force), Mar. 2007.
- [S26] ITU-T, “General aspects of quality of service and network performance in digital networks, including ISDNs.” Y-350 (In force), Mar. 1993.

# Vybrané publikace autora vztahující se k disertaci

## Publikace v impaktovaných časopisech

- [A1] O. Vondrouš, Z. Kocur, and J. Hrad, “Transmission Optimization Metrics Setup Issues in the Field of Time Constrained Communications,” *Sensors*, 2018. [V recenzním řízení, 60% podíl autora na článku].
- [A2] O. Vondrouš, Z. Kocur, and J. Hrad, “New Methodology for Inter-Packet Gaps Analysis in a TCP Flow,” *International Journal of Communication Systems*, 2018. [V recenzním řízení, 60% podíl autora na článku].

## Publikace v recenzovaných časopisech

- [B1] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “Simulation of the Application Layer in NarrowBand Networks with Conditional Data Injection XML Scheme Based on Universal Data Generator,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 639–647, 2017.
- [B2] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “On Limits of Embedded Systems in Network Packet Processing,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, pp. 405–412, 10 2016.
- [B3] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “CER/TER - The New Metric for TCP Connection Robustness Evaluation and Comparison,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, pp. 529–535, prosinec 2015.

- [B4] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “Multipath TCP in LTE Networks,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, pp. 294–300, 12 2014.

## Další publikace excerptované WoS

- [C1] O. Vondrouš, Z. Kocur, T. Hégr, and O. Slavíček, “Performance Evaluation of IoT Mesh Networking Technology in ISM Frequency Band,” in *Proceedings of the 2016 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME) 2016*, (Prague, CZ), pp. 488–495, 2016.
- [C2] O. Vondrouš, P. Macejko, T. Hégr, and Z. Kocur, “Testing Methodology for Performance Evaluation of Communication Systems for Smart Grid,” in *The Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, (Praha, CZ), pp. 12–17, 2016.

# Další publikace autora

## Publikace v recenzovaných časopisech

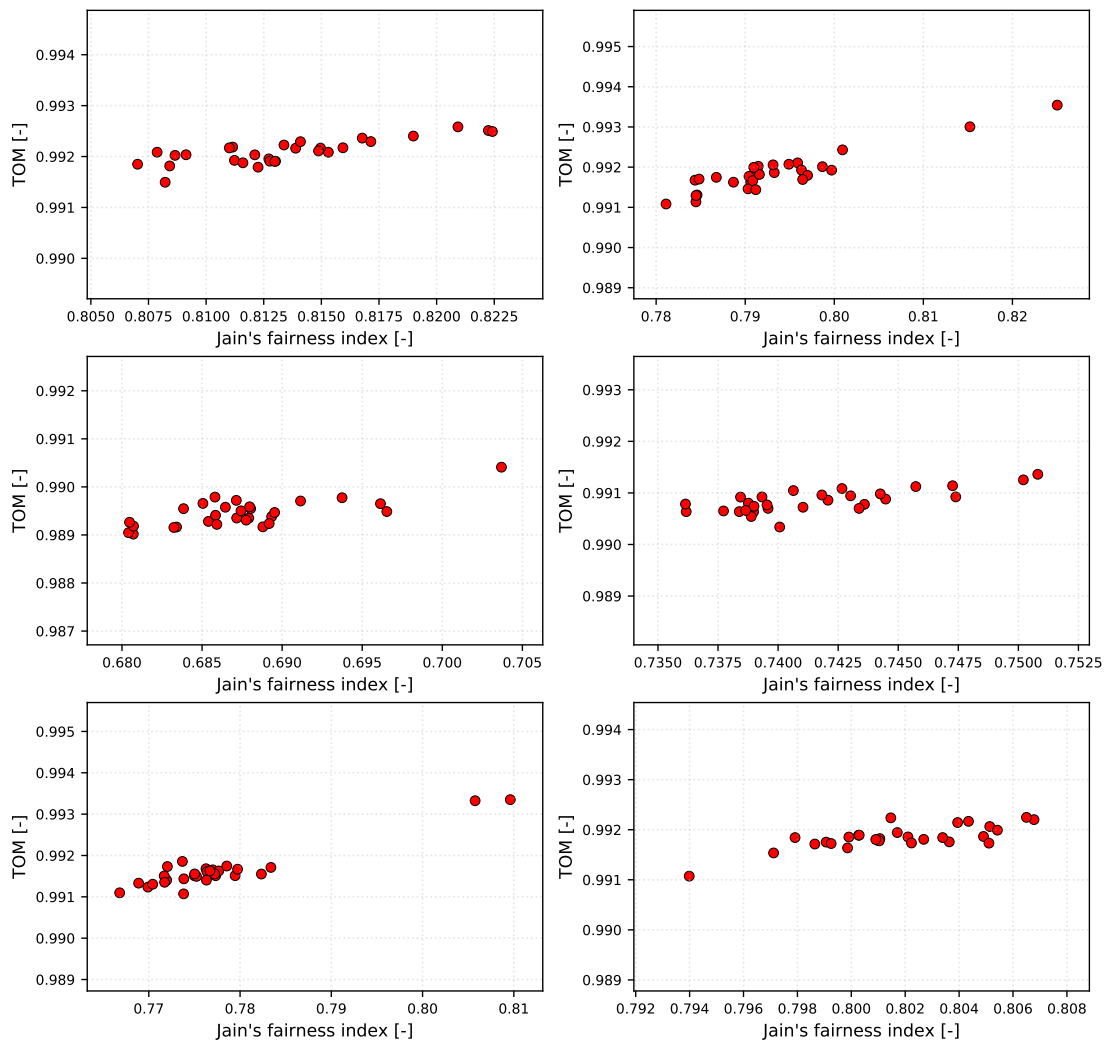
- [D1] O. Vondrouš, P. Macejko, and Z. Kocur, “FlowPing - The New Tool for Throughput and Stress Testing,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 13, pp. 516–521, prosinec 2015.
- [D2] Z. Kocur, P. Macejko, P. Chlumský, J. Vodrážka, and O. Vondrouš, “Adaptable System Increasing the Transmission Speed and Reliability in Packet Network by Optimizing Delay,” *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, pp. 13–19, March 2014.
- [D3] O. Vondrouš, “Adaptivní řízení QoS pro internetovou telefonii,” *Access server*, vol. 10, pp. 1–6, 5 2012.

# Příloha A

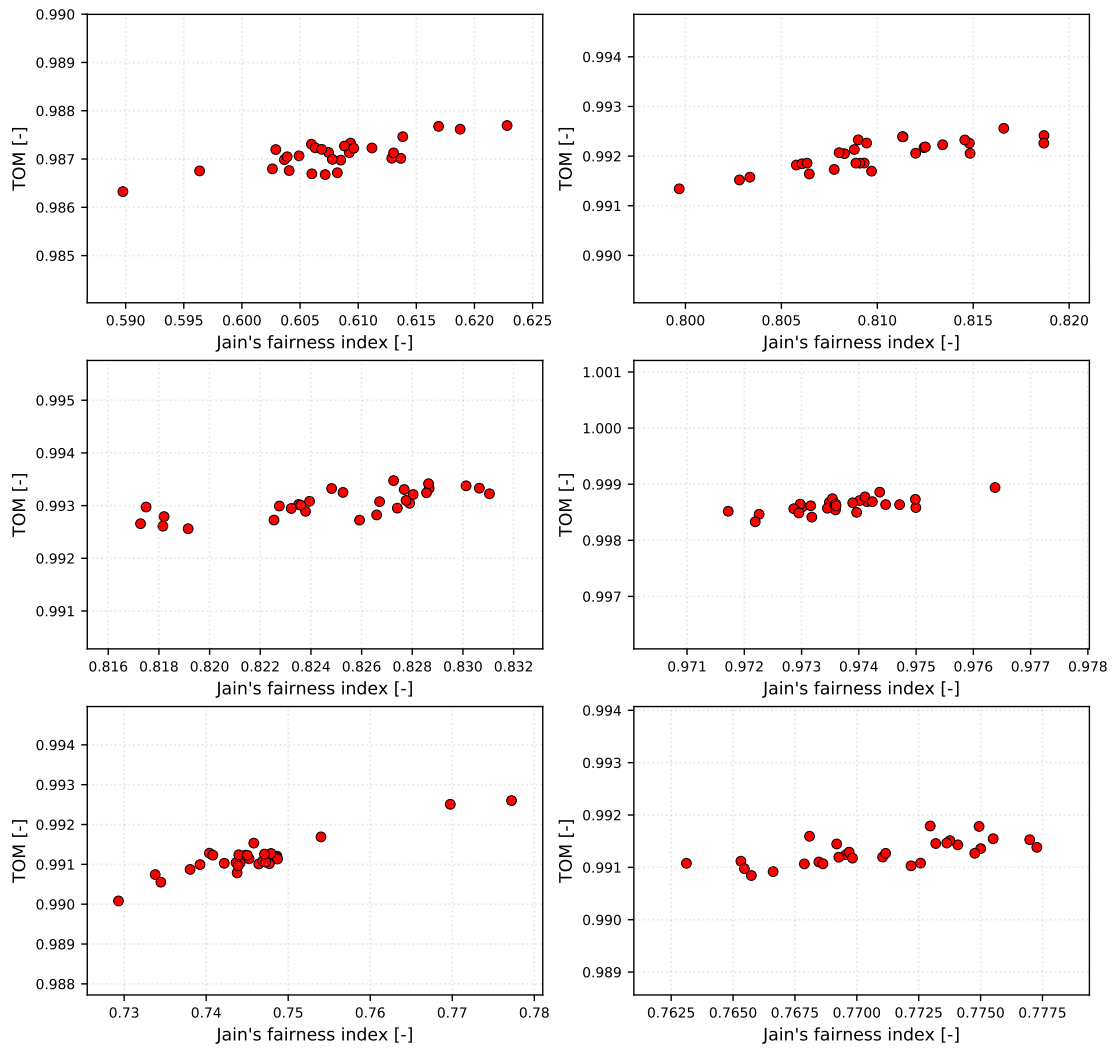
## Korelace TOM a JFI

Následuje ukázka detailu grafického vyhodnocení korelace metriky založené na JFI a metriky TOM pro vybraná měření scénáře CSMA/CA (datové profily Dual a ZigZag). Použitý interval vyhodnocení JFI byl roven 300 sekundám a metrika TOM byla nastavená na mezní odstup paketů 120 sekund. Následující grafy zachycují korelaci metrik pro jednotlivé sady měření.

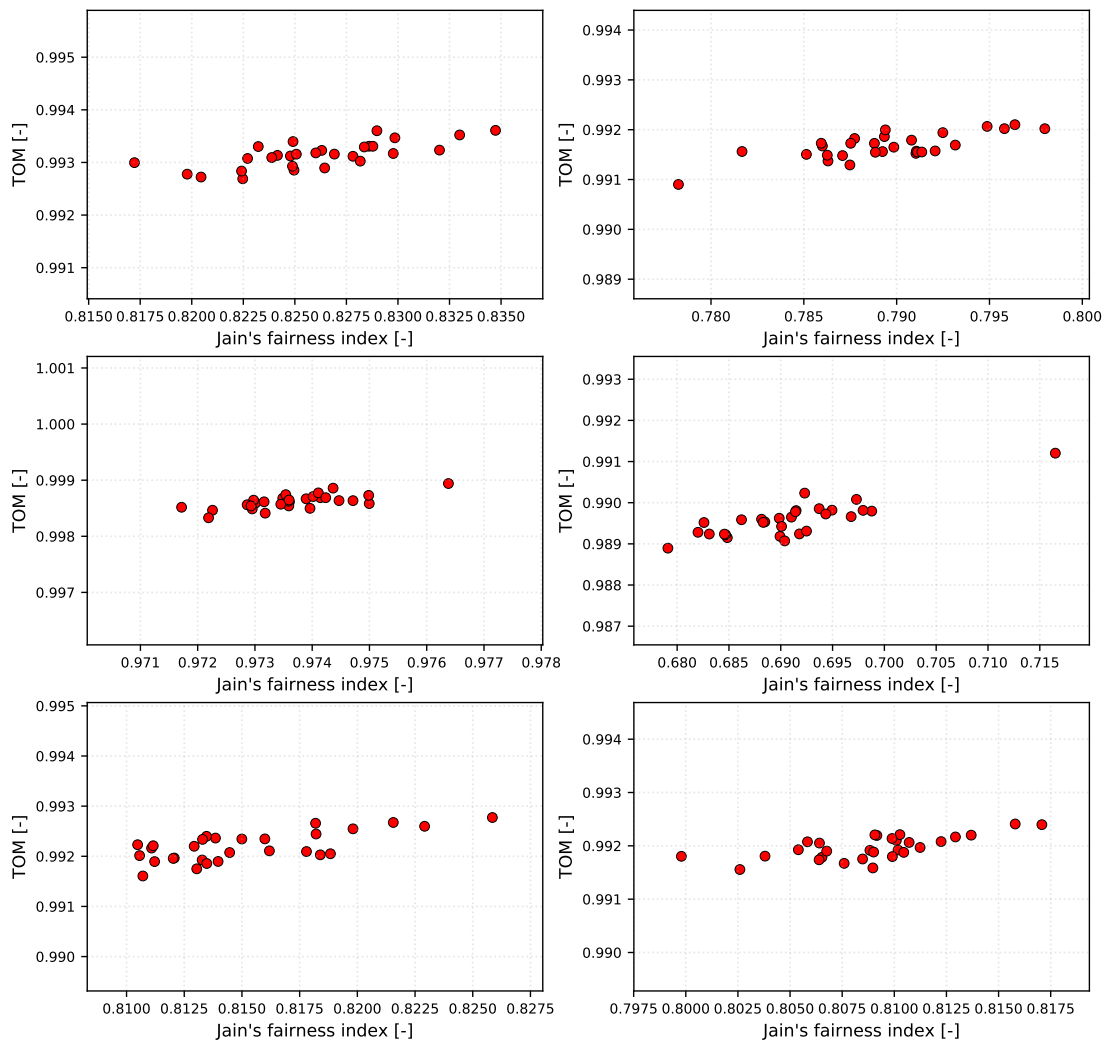




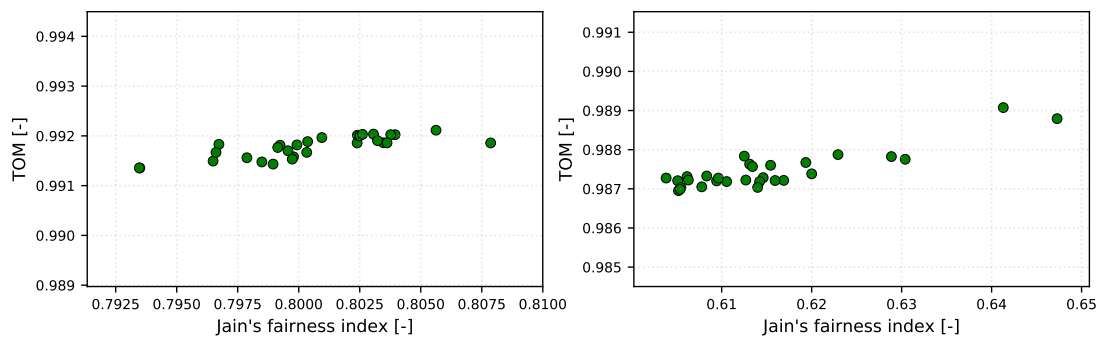
Obr. A.1: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 1/4).



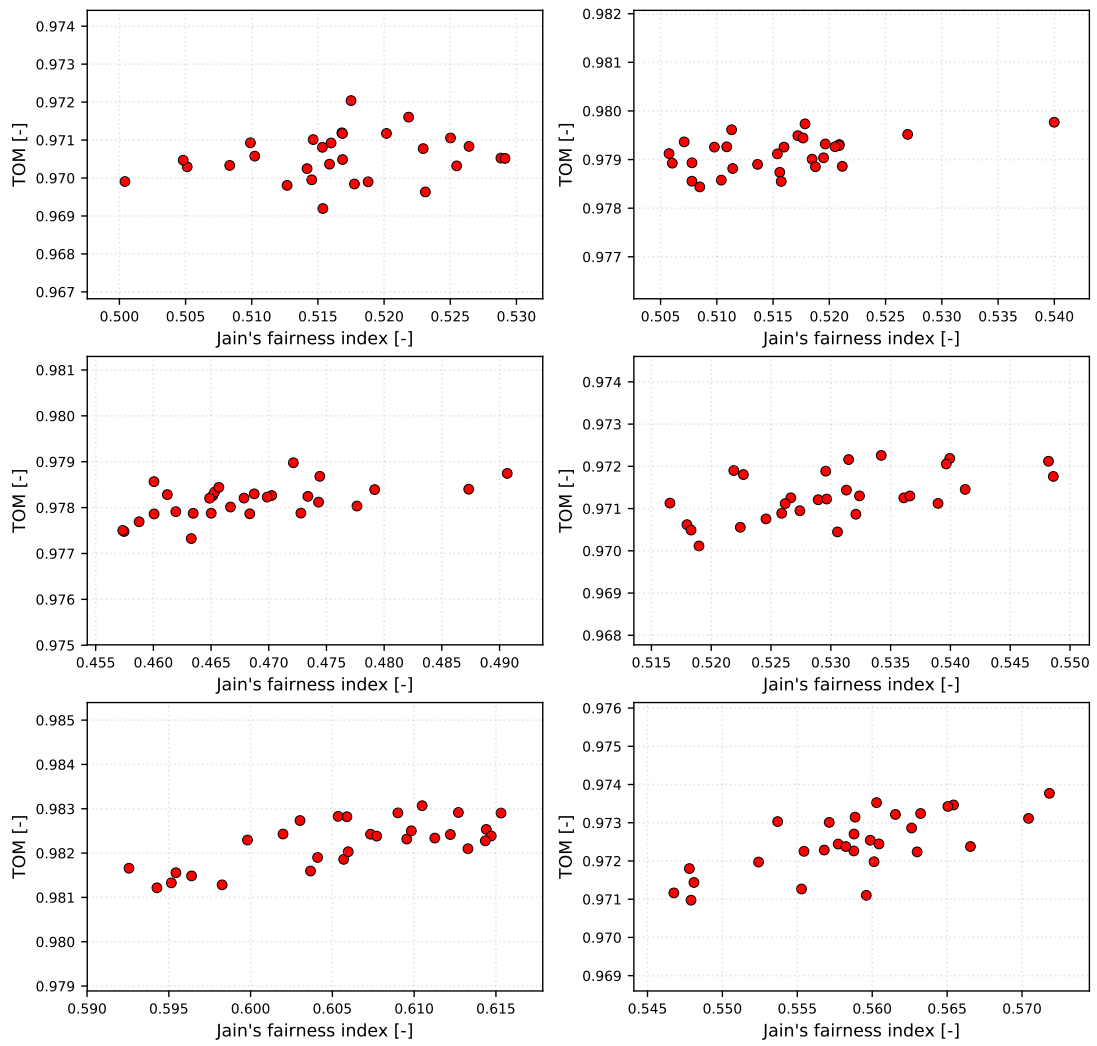
Obr. A.2: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 2/4).



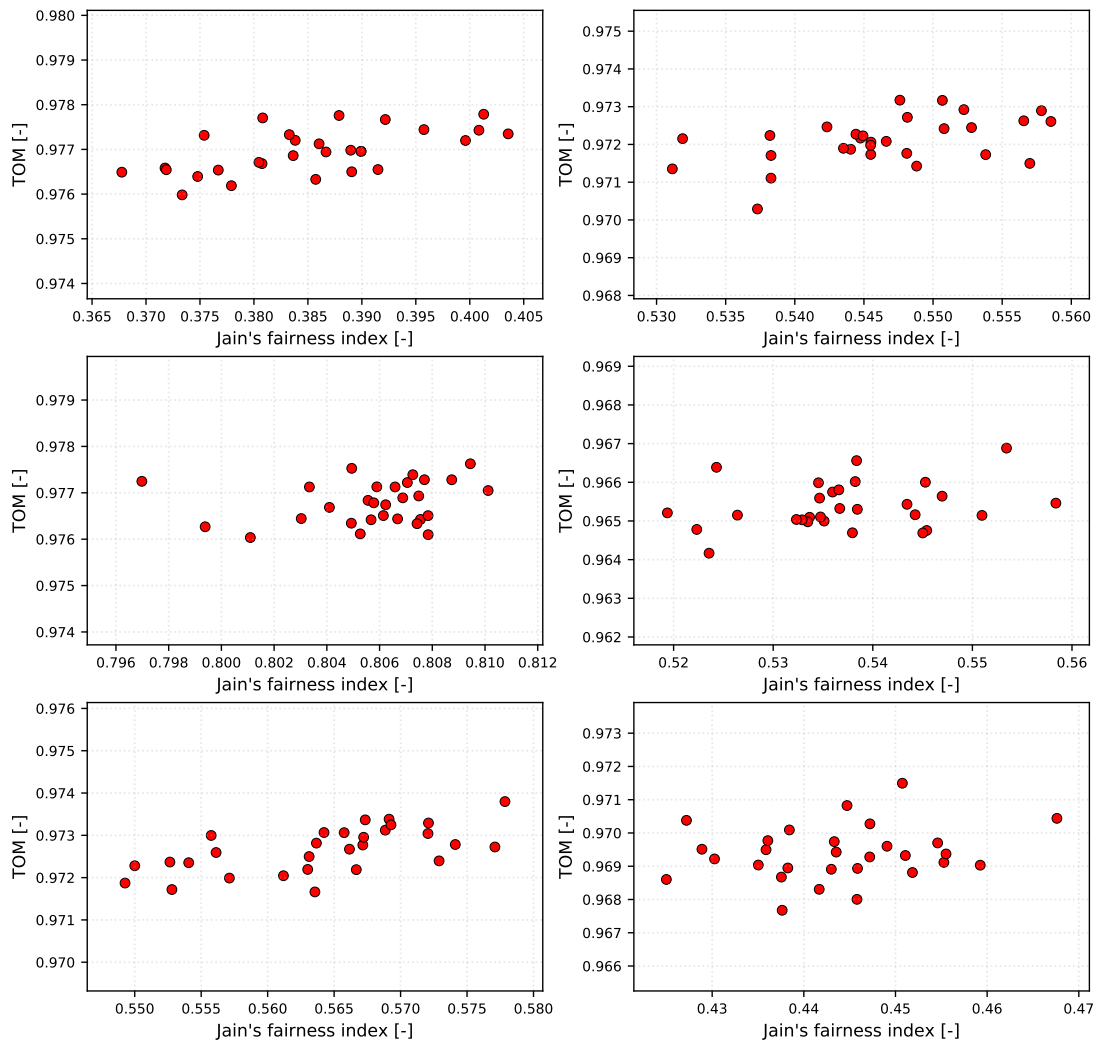
Obr. A.3: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 3/4).



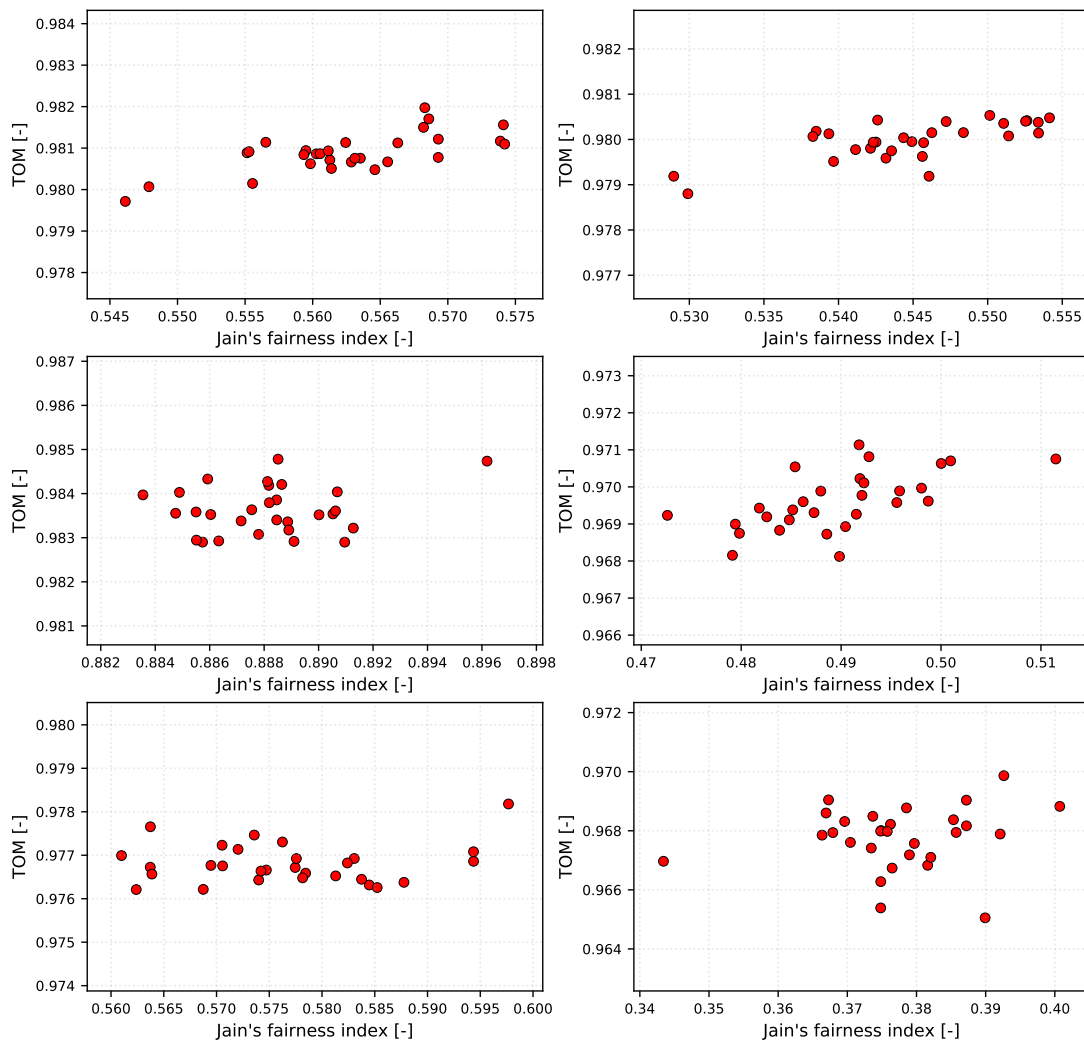
Obr. A.4: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil Dual, část 4/4).



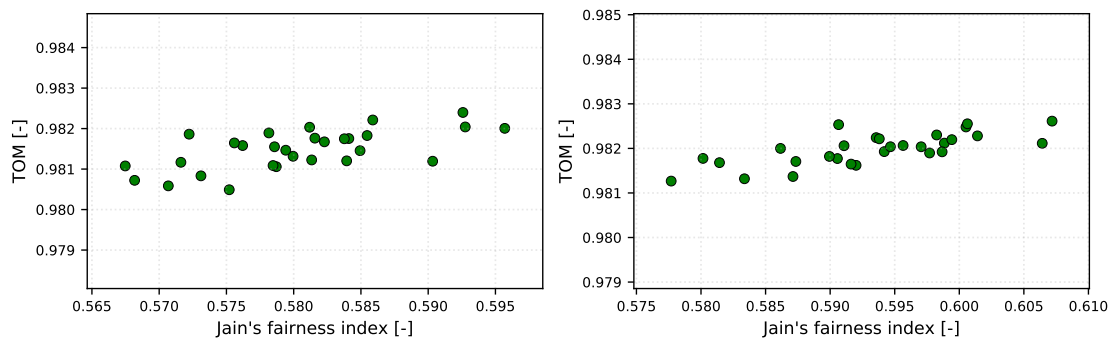
Obr. A.5: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 1/4).



Obr. A.6: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 2/4).



Obr. A.7: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 3/4).



Obr. A.8: Korelace TOM a JFI, CSMA/CA, profil ZigZag, část 4/4).