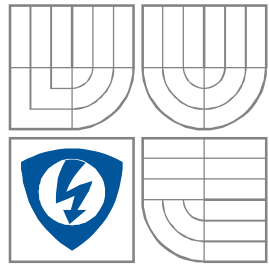


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# OPTIMALIZACE PŘÍSTUPU DO CDMA SÍTÍ

OPTIMIZATION OF ACCESS TO CDMA NETWORKS

DIZERTAČNÍ PRÁCE  
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Ing. PETR KEJÍK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. STANISLAV HANUS, CSc.

## **Abstrakt**

Cílem dizertační práce je optimalizace přístupu do sítí CDMA (Code Division Multiple Access). Práce se konkrétně zabývá algoritmy pro řízení přístupu do sítě pro systém UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). V úvodní části je pozornost zaměřena na popis dosavadního vývoje dané problematiky a následně je provedena analýza řízení přístupu do sítě UMTS. V programu MATLAB byl vytvořen vlastní model systému UMTS, který umožňuje implementovat vybrané algoritmy přístupu do sítě. Pozornost byla zaměřena na algoritmy, které využívají činitel zatížení, fuzzy logiku a genetické algoritmy. Všechny algoritmy byly s pomocí vytvořeného simulačního programu vzájemně porovnány. Cílem práce je vytvořit vhodný simulační program, prozkoumat vlastnosti jednotlivých algoritmů a případně provést jejich optimalizaci.

## **Klíčová slova**

CDMA, UMTS, řízení přístupu, UMTS simulátor, fuzzy logika, činitel zatížení.

## **Abstract**

The aim of this dissertation thesis is an optimization of access to CDMA networks. To be more specific, this thesis deals with an optimization of admission control in UMTS network. The first part of the thesis deals with the present progress of the particular topic. Thereinafter there is an analysis of admission control in UMTS system. An own UMTS simulation program was created in MATLAB. This program enables implementation and simulation of the selected admission control algorithms. The thesis is focused on load factor based, fuzzy logic based and genetic algorithms. The created UMTS simulator was used for the mutual comparison of all algorithms. The aims of this thesis are the suitable UMTS model design, evaluation and possible optimization of selected algorithms.

## **Keywords**

CDMA, UMTS, admission control, UMTS simulator, fuzzy logic, load factor.

## **Bibliografická citace**

KEJÍK, P. *Optimalizace přístupu do CDMA sítí*. Dizertační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 106 stran, 2 přílohy.

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma „Optimalizace přístupu do CDMA sítí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 31. srpna 2010

---

*Petr Kejik*

## Poděkování

Děkuji vedoucímu dizertační práce prof. Ing. Stanislavu Hanusovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé dizertační práce. Poděkování patří také celé mojí rodině za podporu v průběhu mého doktorského studia.

V Brně dne 31. srpna 2010

---

*Petr Kejik*

## Curriculum Vitae

Name: Petr KEJÍK

Born: July 23<sup>rd</sup> 1981 in Brno

Contact: [xkejik00@stud.feec.vutbr.cz](mailto:xkejik00@stud.feec.vutbr.cz)

### Education

2007 – 2010 **Brno University of Technology / Department of Radio Electronics**  
Ph.D. study of Electronics  
State exam passed in June 2009

2005 – 2007 **Brno University of Technology / Department of Radio Electronics**  
Two-year Master's program  
Diploma thesis – Interference cancellation in 2G and 3G systems  
State exam passed in June 2007

### Experience

2008 – 2010 **Brno University of Technology / Department of Radio Electronics**  
technical and office support staff

2006 / 06-08 **Honeywell**  
assembly of products, operating with machines and equipments, repairing  
faulty products, providing basic maintain of machines and equipments

### Languages

English, German

---

# Obsah

<b>1 Úvod.....</b>	<b>3</b>
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	3
1.2 ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU .....	4
1.3 ŘÍZENÍ PŘÍSTUPU DO SÍTĚ .....	6
1.4 METODY PRO ŘÍZENÍ PŘÍSTUPU DO SÍTĚ.....	7
1.4.1 AC využívající počet uživatelů v systému .....	7
1.4.2 AC využívající predikci pohybu uživatelů .....	8
1.4.3 AC využívající úroveň interferencí a uživatelských signálů .....	8
1.4.4 Fuzzy logika .....	8
1.4.5 Genetické algoritmy .....	9
1.5 SIMULACE CDMA SYSTÉMŮ.....	9
1.6 CÍLE DIZERTACE.....	10
1.7 ZÁVĚR .....	11
<b>2 Model systému UMTS .....</b>	<b>12</b>
2.1 VYTVOŘENÝ MODEL SYSTÉMU UMTS .....	12
2.2 POPIS ČINNOSTI MODELU UMTS.....	13
2.3 OVĚŘENÍ KAPACITY SYSTÉMU.....	17
2.4 OVĚŘENÍ ŘÍZENÍ VÝKONU A OŠETŘENÍ INTERFERENCÍ.....	18
2.5 POPIS VYTVOŘENÉHO PROGRAMU .....	19
2.6 ZÁVĚR .....	19
<b>3 Vybrané typy AC algoritmů.....</b>	<b>21</b>
3.1 POUŽITÍ ČINITELE ZATÍŽENÍ (AC-L).....	21
3.2 POUŽITÍ FUZZY LOGIKY .....	21
3.2.1 Fuzzy algoritmus č. 1 (AC-F1).....	21
3.2.2 Fuzzy algoritmus č. 2 (AC-F2).....	24
3.2.3 Fuzzy algoritmus č. 3 (AC-F3).....	25
3.2.4 Fuzzy algoritmus č. 4 (AC-F4).....	25
3.3 POUŽITÍ GENETICKÝCH ALGORITMŮ.....	25
3.3.1 Algoritmus se dvěma optimalizačními funkcemi (AC-G1) .....	26
3.3.2 Algoritmus s jednou optimalizační funkcí (AC-G2) .....	26
3.4 ZÁVĚR .....	26
<b>4 Simulace AC algoritmů .....</b>	<b>28</b>
4.1 SIMULACE FUZZY ALGORITMŮ .....	29
4.1.1 Srovnání algoritmů AC-L a AC-F1 .....	29
4.1.2 Řízení zahlcení sítě.....	30
4.1.3 Srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3 .....	31
4.1.4 Srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F4 .....	47
4.2 SIMULACE GENETICKÝCH ALGORITMŮ .....	49
4.2.1 Srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-G1 a AC-G2 .....	49
4.3 ZÁVĚR .....	52
<b>5 Algoritmy pro řízení přístupu do sítě s predikcí a automatickou regulací .....</b>	<b>54</b>

---

---

5.1	PREDIKCE POHYBU UES .....	54
5.1.1	<i>Fuzzy algoritmus s predikcí č. 1 (AC-FP1)</i> .....	54
5.1.2	<i>Fuzzy algoritmus s predikcí č. 2 (AC-FP2)</i> .....	55
5.1.3	<i>Fuzzy algoritmus s predikcí č. 3 (AC-FP3)</i> .....	55
5.2	PREDIKCE PROVOZU V SÍTI .....	55
5.2.1	<i>Fuzzy algoritmus s predikcí č. 4 (AC-FP4)</i> .....	56
5.2.2	<i>Fuzzy algoritmus s predikcí č. 5 (AC-FP5)</i> .....	56
5.3	FUZZY ALGORITMUS SE DVĚMA TYPY PREDIKCE (AC-FP15) .....	56
5.4	AUTOMATICKÁ REGULACE ALGORITMŮ .....	59
5.4.1	<i>Automatická regulace <math>p_D</math> (AC-<math>X_{R1}</math>)</i> .....	60
5.4.2	<i>Automatická regulace <math>p_B</math> a <math>p_D</math> (AC-<math>X_{R2}</math>)</i> .....	60
5.5	ZÁVĚR .....	61
<b>6</b>	<b>Simulace AC algoritmů s predikcí a automatickou regulací .....</b>	<b>62</b>
6.1	SIMULACE ALGORITMŮ S PREDIKCÍ POHYBU .....	62
6.2	SIMULACE ALGORITMŮ S PREDIKCÍ PROVOZU V SÍTI .....	64
6.3	SROVNÁNÍ VYBRANÝCH ALGORITMŮ .....	66
6.4	SIMULACE ALGORITMŮ S AUTOMATICKOU REGULACÍ .....	71
6.4.1	<i>Automatická regulace <math>p_D</math></i> .....	71
6.4.2	<i>Automatická regulace <math>p_B</math> a <math>p_D</math></i> .....	75
6.5	ZÁVĚR .....	79
<b>7</b>	<b>Závěrečné shrnutí a doporučení .....</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>82</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>84</b>
	<b>Seznam zkratk .....</b>	<b>88</b>
	<b>Seznam symbolů .....</b>	<b>90</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>92</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>96</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>97</b>

---



# 1 Úvod

Dizertační práce se zabývá metodami pro řízení přístupu do CDMA (Code Division Multiple Access) sítí. V práci je vysvětlena problematika řízení přístupu do sítě, je zde uveden stručný přehled používaných algoritmů a dále jsou podrobněji popsány vybrané algoritmy. Vlastnosti jednotlivých algoritmů jsou ověřeny simulacemi, které byly provedeny ve vytvořeném modelu systému UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Tento simulační program umožňuje simulaci několika RRM (Radio Resources Management) algoritmů.

První kapitola obsahuje úvod do dané problematiky, rozebírá aktuální stav a popisuje některé používané metody a algoritmy. Jsou zde také uvedeny důvody pro optimalizaci (a její aktuálnost) těchto algoritmů. Dále jsou zde popsány existující simulační programy pro systémy CDMA a jsou zde definovány cíle dizertační práce.

Druhá kapitola se detailněji zabývá popisem a principem činnosti vytvořeného UMTS simulátoru. V kapitole je popsána činnost vlastního UMTS modelu a také způsob implementace jednotlivých algoritmů, nejen pro řízení přístupu.

Ve třetí kapitole jsou podrobněji popsány vlastní algoritmy pro řízení přístupu. Je zde detailněji popsán a vysvětlen princip jejich činnosti. Je zde uveden algoritmus pracující s použitím činitele zatížení, několik algoritmů využívajících fuzzy logiku a také genetické algoritmy.

Čtvrtá kapitola obsahuje výsledky simulací, které srovnávají a zhodnocují jednotlivé algoritmy, popsané ve třetí kapitole. Kapitola obsahuje velké množství simulací pro nejrůznější nastavení systému a pro různé parametry spojení.

V páté kapitole jsou prezentovány algoritmy, které jsou rozšířením algoritmů z kapitoly 3. Algoritmy jsou doplněny o predikci pohybu UEs (User Equipment), o predikci provozu v síti a také o automatickou regulaci některých parametrů.

Šestá kapitola obsahuje výsledky simulací, které srovnávají a zhodnocují jednotlivé algoritmy, popsané v kapitole 5.

Sedmá kapitola obsahuje závěrečné shrnutí, týkající se převážně provedených simulací a jejich výsledků.

## 1.1 Úvod do problematiky

Přenos informací prostřednictvím bezdrátových komunikačních technologií patří k dynamicky se rozvíjejícím odvětvím. Bezdrátové mobilní systémy nejsou výjimkou. Požadovaný nárůst přenosových rychlostí, kvality služeb QoS (Quality of Service) a kapacity systému z hlediska počtu uživatelů vedly k vývoji moderních mobilních systémů, které používají složitější modulace a přístupové metody než systémy původní.

Systém GSM (Global System for Mobile communications), systém 2. generace (2G), používá jako přístupovou techniku kombinaci FDMA (Frequency Division

Multiple Access) a TDMA (Time Division Multiple Access). U systémů 3. generace (3G), IMT-2000 (International Mobile Telecommunications in the year 2000), se začala používat technika rozprostřeného spektra CDMA. Mezi hlavní výhody takového přenosu patří odolnost proti úzkopásmovému i širokopásmovému rušení. Nové přenosové technologie (systémy 4. generace – 4G) využívají více nosných, např. WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) používá OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), systém LTE (Long Term Evolution) využívá OFDMA v downlinku a SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) v uplinku.

U systémů 2. generace (např. GSM) bylo relativně jednoduché řešit přístup nových uživatelů do sítě, systémy však měly velmi omezené možnosti pro řízení kvality jednotlivých služeb. U systémů třetí generace (a vyšších) je již kvalita služeb zajišťována několika algoritmy a funkcemi. U systémů CDMA komunikují všichni účastníci ve stejném čase ve stejném rádiovém kanále. Kapacita CDMA systémů závisí na velikosti interferencí v systému. Z tohoto důvodu jsou zapotřebí složitější algoritmy pro řízení přístupu uživatelů do sítě než např. u GSM. Tyto algoritmy nejsou standardizovány, jejich konkrétní provedení je ponecháno na provozovateli systémů.

Téma práce je poměrně obecné a obsáhlé. Vlastní práce je zaměřena na optimalizaci řízení přístupu do sítě UMTS. Řízení přístupu rozhoduje o přijetí/odmítnutí nových spojení (a také o ponechání/přerušení stávajících spojení, např. při handoverech, viz kapitola 2.2). Ačkoliv byla první specifikace systému UMTS vydána již v roce 1999 (Release 99), vývoj systému a jeho součástí stále pokračuje. Důvodem je podpora kvality služeb a multimediálních přenosů. Nové technologie (vycházející z WCDMA), např. HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access; 3GPP Release 7), dosahují přenosových rychlostí o velikosti desítek Mbit/s. Mohou tak konkurovat nejmodernějším systémům (např. LTE) a oddalují přechod z CDMA na OFDM systémy. Aktuálnost tématu dokládají také některé nejnovější publikace, které se danou problematikou zabývají, např. [41], [42] nebo [43]. Využití zkoumaných algoritmů není (po případných úpravách) omezeno pouze na systémy CDMA. Lze je použít (např. po nahrazení činitele zatížení, kap. 1.3) také u jiných, moderních systémů, např. u systému LTE nebo WiMAX.

## 1.2 Rozbor současného stavu

U systémů CDMA komunikují všichni účastníci ve stejném čase ve stejném rádiovém kanále. Jednotliví uživatelé jsou rozlišení pomocí skramblovacích a rozprostíracích OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor) kódů. Za předpokladu neomezeného počtu těchto kódů a dostupného vysílacího výkonu na straně UEs (User Equipment) a Node Bs je kapacita systému limitována pouze úrovní interferencí v systému. Proto jsou v CDMA systémech tzv. RRM (Radio Resources Management) funkce. Tyto funkce zajišťují optimální kapacitu a pokrytí sítě, optimální využívání rádiových prostředků a také zajišťují kvalitu jednotlivých spojení. Mezi RRM funkce patří:

- řízení přístupu do sítě, AC (Admission Control) [1], [2], [44]
- řízení handoveru, HC (Handover Control) [3], [4]
- plánování paketového provozu, PS (Packet Scheduling) [5], [6]

- řízení výkonu, PC (Power Control) [2], [7]
- řízení zahlcení sítě, CC (Congestion Control) [2], [8]
- správa OVSF kódů, CM (Code Management) [9], [10], [11]

Funkce **řízení přístupu do sítě** rozhoduje o přijetí nebo odmítnutí nového spojení (případně o nové konfiguraci stávajícího spojení). Rozhodnutí se provádí na základě analýzy stavu v systému (detaily jsou uvedeny v kapitole 1.4). Řízení přístupu se provádí zvlášť pro uplink a zvlášť pro downlink. Spojení může být přijato pouze tehdy, jestliže jej algoritmus povolí v obou směrech přenosu.

Funkce **řízení handoveru** rozhoduje o ponechání nebo přerušení stávajícího spojení v případě handoveru. Funkce také rozhoduje např. o buňce (případně systému – pro handover mezi dvěma různými systémy) do níž se spojení přesune. Příkladem může být oblast buněk, které jsou navíc překryty větší buňkou (umbrella cell). U WCDMA může být navíc UE spojena s několika buňkami zároveň, což sice zlepšuje parametry a kvalitu spojení, ale zároveň komplikuje řízení handoverů.

**Plánování paketového přenosu** (obecně) rozhoduje o parametrech spojení. Pracuje na úrovni rámců. *Plánování paketového přenosu* se týká downlinku. Jedná se o centralizovanou funkci, zodpovědnou za plánování některých spojení na společných kanálech pro downlink. V případě uplinku se PS provádí decentralizovaně. Vrstva MAC (Medium Access Control) v každém UE vykonává tzv. *UE-MAC* algoritmus (funkci), který rozhoduje o okamžité přenosové rychlosti a nastavení spojení.

**Řízení výkonu** optimalizuje (minimalizuje) vysílaný výkon v uplinku (UEs) i downlinku (Node Bs). V systému UMTS se používá řízení výkonu v otevřené a uzavřené smyčce. Řízení výkonu v uzavřené smyčce se dále provádí ve vnější a vnitřní smyčce, detaily lze nalézt např. ve [14].

Funkce **řízení zahlcení sítě** řeší situace při zahlcení sítě. Je to stav, kdy je ohrožena QoS spojení. K zahlcení sítě může dojít např. rychlým přesunem UEs do jednoho místa (oblasti buňky). Zvýší se tím velikost interferencí, což může vést ke zhoršení kvality jednotlivých spojení nebo jejich výpadku. Situaci lze řešit různými způsoby. Lze např. přerušit spojení s nižšími prioritami nebo snížit přenosovou rychlost části spojení.

**Správa OVSF kódů** se týká zejména downlinku. Hlavním úkolem CM je optimální přidělování a následné přerozdělování kódů pro kódování kanálů. Při použití konkrétního OVSF kódu nelze totiž již použít kódy z jeho substromu ([14]). Použití kódu navíc ovlivňuje přenosovou rychlost spojení. Algoritmus musí najít takový set přidělených kódů, aby maximalizoval počet spojení v buňce a zároveň umožnil dosáhnout požadovaných přenosových rychlostí.

Přibližný přehled RRM funkcí z časového hlediska je pro ilustraci uveden v Tab. 1.1. Jednotlivé RRM funkce se navzájem doplňují a spolupracují. Řízení přístupu do sítě může spolupracovat např. s řízením handoverů, se správou ortogonálních kódů a s funkcí řízení výkonu. Nové spojení je sítí přijato jen v případě, že je dostupná kapacita v buňce, je dostupný OVSF kód a dostupný výkon. Přijetí spojení do sítě ovlivní úroveň interferencí, může způsobit změny vysílaných výkonů Node Bs a UEs, může spustit mechanismus pro přerozdělení OVSF kódů apod.

Tab. 1.1 RRM funkce a jejich činnost z časového pohledu pro UMTS, [14]

Typická doba mezi aktivací algoritmů	RRM funkce
1 slot (0,667 ms)	řízení výkonu – vnitřní smyčka
1 rámeček (10 ms)	UE-MAC řízení paketového provozu
desítky až stovky rámečků	řízení přístupu řízení handoverů správa OVSF kódů řízení zahlcení řízení výkonu – vnější smyčka

Ve výše uvedeném seznamu jsou uvedeny odkazy na literaturu, kde lze najít příklady konkrétního provedení algoritmů. Jednotlivé algoritmy a procedury jsou obecně definovány např. v [12], [13] nebo [14]. Jejich konkrétní provedení však není standardizováno a je ponecháno na operátorech systémů. Z tohoto důvodu probíhá poměrně rozsáhlý výzkum a hledání optimálních řešení ve všech oblastech RRM. Další informace a odkazy na literaturu jsou uvedeny v kapitole 1.4, kde je detailněji rozebráno řízení přístupu do sítě.

### 1.3 Řízení přístupu do sítě

Kapacita CDMA systémů závisí na aktuální velikosti interferencí v systému, je tedy proměnná (soft capacity). Další komplikací je skutečnost, že u CDMA systémů jsou definovány různé třídy QoS. Jednotlivá spojení mají různou prioritu a také různé požadavky na přenosovou rychlost. V systému UMTS jsou definovány 4 základní třídy QoS. Jejich přehled je uveden v Tab. 1.2. Detailní informace lze nalézt v [40] nebo 3GPP specifikacích.

Tab. 1.2 Třídy QoS, [40]

Třída QoS	Priorita	Realizace	Příklad	Přenosové rychlosti $R_{bit}$ [kb/s]
conversational	vysoká	přepínání okruhů (Circuit Switching)	hlasová spojení/ videohovor	12,2 / 64
streaming	střední	přepínání okruhů / přepínání paketů (Packet Switching)	webové vysílání	64
interactive	nízká	přepínání paketů	webové aplikace	8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384
background	nejnižší	přepínání paketů	email, sms	8, 16, 32, 64, 128, 144, 256, 384

Signál každého uživatele způsobuje interference, které závisejí nejen na poloze uživatele (velikosti vysílaného výkonu), ale také na třídě služby, kterou používá. Řízení přístupu do sítě (AC) musí být tedy realizováno jinak než např. v systémech s FDMA. Hlavním úkolem řízení přístupu do sítě je udržení interferencí v systému na dostatečně nízké úrovni, aby byla zajištěna QoS všech uživatelů. Algoritmus řízení přístupu musí navíc zajistit minimalizaci pravděpodobnosti odmítnutí nového spojení  $p_B$  (Blocking Probability, (2.13)) a pravděpodobnosti přerušení již existujícího spojení  $p_D$  (Dropping Probability, (2.14)). Tyto dva požadavky jsou ale protichůdné. AC tedy musí najít optimální řešení, kdy budou počty odmítnutých a přerušených spojení (obě

pravděpodobnosti) co možná nejmenší a přijatelné pro uživatele. U CDMA systémů se definuje a používá tzv. činitel zatížení, který udává procentuální zatížení buňky. Činitel zatížení pro uplink  $\eta_{ul}$  je definován, viz [1]:

$$\eta_{ul} = (1 + j_I) \cdot \sum_{i=1}^K \frac{1}{1 + \frac{W}{(E_b/N_0)_i \cdot R_i \cdot v_{f,i}}}, \quad (1.1)$$

kde  $j_I$  je poměr úrovní interferencí mezi okolními a sledovanou buňkou,  $K$  je počet uživatelů v buňce,  $W$  je chipová rychlost (3,84 Mchip/s),  $(E_b/N_0)_i$  je požadovaný poměr energie připadající na jeden bit a spektrální výkonové hustoty šumu,  $R_i$  je požadovaná přenosová rychlost a  $v_{f,i}$  je faktor definující aktivitu  $i$ -tého uživatele.

Pro downlink je činitel zatížení  $\eta_{dl}$  definován, viz [15]:

$$\eta_{dl} = \sum_{i=1}^K \frac{(E_b/N_0)_i \cdot v_{f,i}}{\frac{W}{R_i}} \cdot [(1 - \alpha_i) + j_I], \quad (1.2)$$

kde  $\alpha_i$  je faktor ortogonalita. Ostatní proměnné mají stejný význam jako v (1.1).

## 1.4 Metody pro řízení přístupu do sítě

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1, provedení jednotlivých RRM funkcí není standardizováno a každý operátor může použít různé algoritmy. V literatuře lze najít celou řadu metod na řešení AC v CDMA systémech. Jednotlivé metody a algoritmy se liší přístupem k danému problému, jejich přehled lze nalézt např. v [14]. Rozdělení použitých algoritmů se v různých literaturách liší a jednotlivé přístupy se z velké části prolínají. Níže uvedené rozdělení nelze proto chápat jako jednoznačné a jediné možné. Algoritmy lze rozdělit např. podle kritéria, které používají pro rozhodování. Algoritmy mohou používat:

- počet uživatelů v systému/kapacitu systému (number/capacity based)
- predikci pohybu uživatelů (mobility based)
- úroveň interferencí a uživatelských signálů v systému (interference based):
  - rozhodování podle úrovně interferencí
  - rozhodování podle činitele zatížení
  - rozhodování podle SIR (Signal to Interference Ratio)

Pro řízení přístupu do sítě lze využít také fuzzy logiku a genetické algoritmy, viz kapitola 1.4.4 a 1.4.5. Použití obou metod lze nalézt v nejnovějších publikacích, které se danou problematikou zabývají.

### 1.4.1 AC využívající počet uživatelů v systému

Tato základní metoda vychází z řízení přístupu, které bylo použito v systémech 2G. Příklad lze nalézt např. v [14]. Zde je popsán způsob, kdy rádiové prostředky systému jsou rozděleny na elementární části. Každý uživatel dostane přidělen určitý počet těchto elementárních částí podle bitové rychlosti, kterou požaduje. Metoda však nezahrnuje vliv interferencí a pro systémy CDMA je nevhodná.

### 1.4.2 AC využívající predikci pohybu uživatelů

Existuje mnoho algoritmů, které využívají např. SIR, ale jejich hlavní odlišností je, že se snaží postihnout pohyb uživatelů. Zmínit lze např. [19], kde je buňka rozdělena na prstence a řeší se zde pohyb uživatelů v rámci buňky. Jiný přístup využívá metodu, kdy se pro každého uživatele definuje dynamicky se měnící skupina buněk, do kterých se uživatel s určitou pravděpodobností přesune (tzv. shadow cluster concept). V těchto buňkách se rezervuje určitá kapacita. Tento přístup je využit např. v [20].

### 1.4.3 AC využívající úroveň interferencí a uživatelských signálů

Kapacita CDMA systému závisí na úrovni interferencí v systému. Mnoho algoritmů se proto zaměřuje právě na úroveň interferencí a úroveň užitečných signálů. Navíc existují algoritmy a metody založené na měření dané veličiny (např. interference), na jejím odhadu a kombinované metody, více viz [1] nebo [14]. Základní myšlenka algoritmů je stejná, liší se však použitou veličinou pro rozhodování a přístupem.

- Některé algoritmy využívají pro rozhodování velikost interferencí, případně odhadují nárůst interferencí, (1.4). Tuto hodnotu pak porovnávají se zvoleným prahem. Příklady lze nalézt např. v [21] nebo [22].
- Místo uvažování interferencí je možné použít činitel zatížení (kapitola 1.3). Aktuální hodnota činitele zatížení (případně predikovaná hodnota) je použita v procesu rozhodování. Příklady lze nalézt např. v [21] nebo [23]. Podle [1] lze změnu činitele zatížení pro uplink  $\Delta\eta_{ul}$  odhadnout jako:

$$\Delta\eta_{ul} = \frac{1}{1 + \frac{W}{(E_b / N_0)_i \cdot R_i \cdot v_{f,i}}} \quad (1.3)$$

Z této hodnoty lze, podle [21], odhadnout nárůst interferencí v systému  $\Delta I$ :

$$\Delta I = \frac{I_{total}}{1 - \eta_{ul}} \Delta\eta_{ul}, \quad (1.4)$$

kde  $I_{total}$  je aktuální úroveň interferencí a  $\eta_{ul}$  je aktuální činitel zatížení v dané buňce (před přijetím nového uživatele s  $\Delta\eta_{ul}$ ). Z rovnice (1.4) je patrné, že pokud se činitel zatížení přiblíží hodnotě 1, úroveň interferencí se bude blížit nekonečnu a systém bude zcela zahlcen.

- Pro řízení přístupu do sítě lze využít i SIR (Signal to Interference Ratio), případně  $E_b/N_0$  (Energy per Noise power spectral density). Aktuální dosažená hodnota SIR se porovnává se stanoveným prahem. Algoritmy založené na tomto principu lze nalézt např. v [24].

### 1.4.4 Fuzzy logika

Počátky fuzzy logiky lze datovat do roku 1965, kdy byly její základy uvedeny v práci profesora Lotfi A. Zadeha. V současné době nachází uplatnění v řadě oblastí, především pro řízení a automatizaci. Její výhodou je implementace „znalostí dané problematiky“ do procesu rozhodování. Podle [17] je fuzzy logika schopna se vypořádat s proměnlivostí provozu v síti, s chybami měření a pohybem uživatelů. V literatuře lze najít řadu AC algoritmů založených právě na fuzzy logice. V [17] lze nalézt příklad

relativně jednoduššího algoritmu. V [27] je příklad poněkud složitějšího algoritmu, který pomocí fuzzy logiky odhaduje několik vstupních proměnných (např. požadavky nového spojení). Tyto proměnné pak zpracovává v dalším kroku opět pomocí fuzzy logiky. V [28] je uveden fuzzy algoritmus využívající např. také PRNN/ERLS (Pipeline Recurrent Neural Network/Extended Recursive Least Squares) predikci interferencí.

### 1.4.5 Genetické algoritmy

Genetické algoritmy (začaly se používat počátkem 60. let) se snaží řešit daný problém pomocí aplikace principů evoluční teorie. Řešený technický problém se převede nejčastěji na řetězec logických 1 a 0 (gen). Pomocí operací jako je mutace, křížení a dědičnost se vygeneruje soubor nových řetězců (genů). Z nich se, pomocí zvoleného kritéria, vybere nejvhodnější řetězec. Řešení AC pomocí genetických algoritmů lze nalézt např. v [29]. V literatuře lze najít řadu podobných algoritmů, z nichž převážná část řeší řízení přístupu mezi několika mobilními systémy. Příkladem může být [30], kde se řeší řízení přístupu mezi systémy 2G, 3G a WLAN (Wireless Local Area Network).

## 1.5 Simulace CDMA systémů

Pro simulaci CDMA systémů byla vyvinuta celá řada simulátorů. Významné nástroje pro simulaci bezdrátových systémů jsou např.:

- *Matlab*. Jedná se o programové prostředí pro numerické výpočty a počítačové simulace. Výhodou programu je velké množství dostupné literatury, propracovaná nápověda programu, jednoduché vytváření a odladování vytvořených skriptů.
- *Simulink*. Jedná se o nadstavbu Matlabu, určenou pro modelování a simulace dynamických systémů. Simulink využívá algoritmy Matlabu a navíc obsahuje množství vytvořených komunikačních bloků. Nevýhodou je složitější hledání a odhalování případných chyb.
- *Network Simulator 2*. Jedná se o statický simulační program pro výzkum sítí. Tento nástroj umožňuje simulace také pro UMTS a pro E-UMTS (Enhanced UMTS), viz [25] nebo [33].
- *OPNET Modeler*. Je součástí softwarového balíku OPNET (Optimum Network Performance). Program obsahuje velké množství knihoven jednotlivých síťových komponent, včetně komponent mobilních systémů. Program obsahuje grafické prostředí a odráží fyzické rozmístění jednotlivých prvků v síti. Chování komponent je definováno pomocí jazyka C/C++ a lze jej případně upravit.
- *NPSW (A Matlab Implementation of a Static Radio Network Planning Tool for WCDMA)*. Jedná se o komplexní statický simulátor WCDMA, vytvořený v Matlabu, [39]. Simulátor umožňuje nastavení mnoha parametrů (např. pro Node B umožňuje nastavit výšku antény, její typ, elevaci, apod.), počítá a zobrazuje řadu údajů (ztráty šířením, servisní Node B, úroveň interferencí, apod.).

Pro simulaci mobilních systémů bylo vyvinuto také několik jednodušších simulačních programů. Zmínit lze např. dynamický simulátor CDMA, uvedený v [26]. Článek srovnává statické a dynamické simulace CDMA systémů. V [2] je publikován

vytvořený statický simulátor UMTS (simulace probíhá po určitých větších časových úsecích). Výsledky simulací jsou porovnány s výsledky, které byly získány pomocí dynamického simulátoru. Závěrem práce je, že statické simulační programy jsou schopné poskytovat výsledky, srovnatelné s výsledky dynamických simulátorů.

Problémem výše uvedených simulačních programů je jejich nedostupnost a navíc skutečnost, že celá řada simulačních programů je zaměřena převážně na simulaci fyzické vrstvy (např. Matlab, NPSW). Dizertační práce se však zabývá simulacemi a algoritmy pracujícími na vrstvách vyšších. Z těchto důvodů byl vytvořen (i za cenu částečného zjednodušení) vlastní simulační program, který je stručně popsán v kapitole 2. Simulátor byl vytvořen v programu MATLAB.

## 1.6 Cíle dizertace

Práce je zaměřena na optimalizaci přístupu do systémů CDMA. Kapacita těchto systémů je proměnná (závisí na interferencích v buňkách systému), proto je zde potřeba použít speciální metody a algoritmy pro řízení přístupu. Protože konkrétní provedení algoritmů není standardizováno, probíhá stále hledání optimálního řešení. Zadání práce je poměrně obsáhlé, pozornost bude věnována pouze systému UMTS.

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.5, simulační programy pro UMTS (konkrétně pro simulaci RRM) nejsou příliš dostupné. Jedním z podstatných cílů dizertační práce je proto vytvoření komplexního modelu sítě UMTS, který bude umožňovat generování různých druhů provozu (různé typy služeb) a implementování vybraných algoritmů pro řízení přístupu do sítě. Jádro vytvořeného programu (buňková struktura, pohyb UEs, generování spojení, ...) bude také možné případně využít pro vytvoření simulačních programů pro systémy vyšších generací a také pro jiné celulární systémy.

V kapitole 1.4 je uveden souhrn používaných algoritmů. V práci bude pozornost zaměřena na použití fuzzy logiky a genetických algoritmů, na které se zaměřují i nejnovější publikace a práce ve světě.

Po zhodnocení výkonnosti a výpočetní náročnosti bude vybraný algoritmus rozšířen např. o predikci pohybu a uvažování provozu v okolních buňkách. Navržený algoritmus bude doplněn o regulační smyčku pro automatické nastavování parametrů algoritmu (např. rozhodovacích prahů).

Cíle dizertační práce lze shrnout do několika následujících stručných bodů:

- Vytvoření komplexního modelu sítě UMTS, který bude umožňovat simulaci jednotlivých algoritmů pro řízení přístupu do sítě. Výhodou vytvořeného modelu sítě bude možnost jeho případného rozšíření (např. o simulaci fyzické vrstvy). Vytvořený model (jeho dílčí části: buňková struktura, pohyb UEs, generování spojení, ...) bude také možné využít pro simulaci systémů vyšších generací a také pro jiné celulární systémy.
- Ověření vlastností vybraných algoritmů. Pozornost bude zaměřena na použití fuzzy logiky a také na genetické algoritmy.
- Optimalizace vybraného fuzzy algoritmu.

Jedním z hlavních přínosů této dizertační práce bude vytvoření modelu UMTS systému pro simulaci RRM algoritmů pro buňkové systémy. Podobný model není



jednoduše dostupný (viz kapitola 1.5). Dalším přínosem dizertační práce bude srovnání několika algoritmů pro řízení přístupu a optimalizace vybraného algoritmu.

## 1.7 Závěr

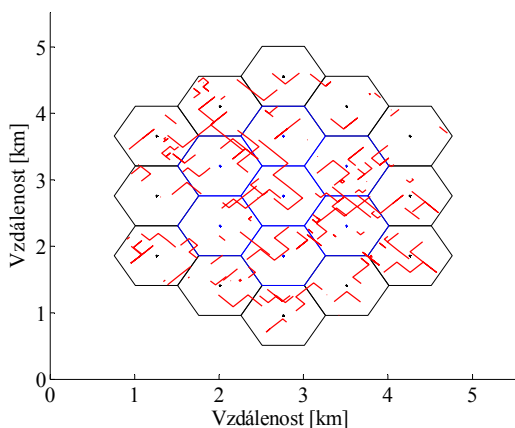
V této kapitole byly popsány základy RRM funkcí a blíže bylo rozebráno řízení přístupu do sítě. U řízení přístupu do sítě byly rozebrány základní vlastnosti a také základní principy činnosti algoritmů. V kapitole byly také uvedeny důvody pro optimalizaci (a její aktuálnost) těchto algoritmů. V závěru kapitoly byly vymezeny cíle dizertační práce.

## 2 Model systému UMTS

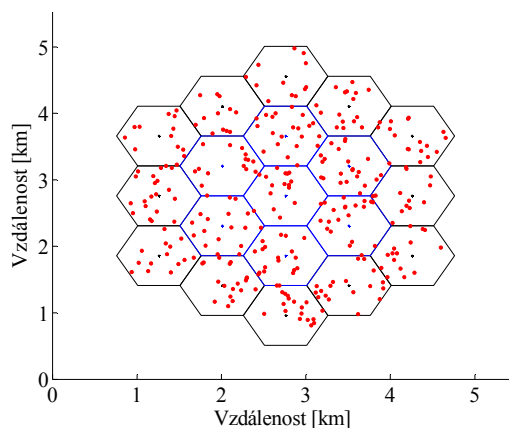
Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.5, existuje několik simulačních programů pro systémy CDMA. Programy však nejsou dostupné finančně, fyzicky nebo nemají potřebné vlastnosti. Z tohoto důvodu byl vytvořen vlastní simulační program, umožňující simulaci řízení přístupu u systému UMTS. V této kapitole je proveden rozbor vytvořeného modelu a popsán princip jeho činnosti.

### 2.1 Vytvořený model systému UMTS

V rámci řešení dizertační práce byl v programu MATLAB vytvořen model sítě UMTS, umožňující implementovat, simulovat a zkoumat vybrané algoritmy pro řízení přístupu do sítě. Na Obr. 2.1 je znázorněn vytvořený model, který se sestává z 19 hexagonálních buněk. Průměr každé buňky je 1 km. Uprostřed každé buňky je Node B se všesměrovou anténou. Sedm buněk v centrální oblasti (ohrazeny modrou čarou) je použito pro zkoumání vlastností simulovaných algoritmů. Ostatních 12 buněk (tzv. 1<sup>st</sup> tier – ohrazeny černou čarou) slouží pro vytvoření okrajových podmínek v síti. Na Obr. 2.1 jsou také znázorněny trajektorie pohybu (červeně) několika uživatelů. Pro zhodnocení AC algoritmů se uvažují pouze ti uživatelé, kteří se nacházejí v centrálních 7 buňkách. Uživatelé, kteří opustili centrální oblast, se do zhodnocení AC algoritmů neuvažují (jejich poloha a ostatní parametry jsou však stále aktualizovány a je na ně také aplikována i AC). Na Obr. 2.2 je znázorněno rozložení UEs v systému. Rozložení odpovídá stavu po 30 minutách simulace a pro 660 příchozích spojení za hodinu (2.1).



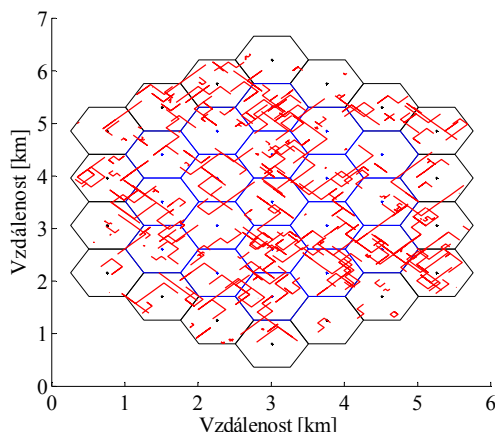
**Obr. 2.1** Model systému se znázorněnými trajektoriemi pohybu několika uživatelů



**Obr. 2.2** Rozložení UEs v systému

Model sítě lze rozšířit na 37 buněk, Obr. 2.3. V tomto případě je 19 buněk v centrální oblasti sítě použito pro zkoumání vlastností RRM algoritmů. Ostatních 18 buněk (tzv. 2<sup>nd</sup> tier – ohrazeny černou čarou) slouží pro vytvoření okrajových

podmínek v síti. V níže uvedených simulacích byl použit model s 19 buňkami (simulace jsou rychlejší).



**Obr. 2.3** Model systému se znázorněnými trajektoriemi pohybu několika uživatelů – 37 buněk

Na Obr. 2.4 je blokově znázorněn simulační program. V první fázi jsou nastaveny parametry simulace, např. délka simulace  $T_{sim}$ , délka iterací (délka simulačního kroku)  $T_{iter}$ , maximální rychlost pohybu uživatelů  $SP_{max}$  a některé další. Dále je pomocí Poissonova procesu vygenerován počet příchozích uživatelů pro každou iteraci (s definovanou intenzitou příchozích spojení). V simulačním programu jsou rozlišeny dva typy (třídy) spojení: hlasová ( $v_f = 0,5$ ) a datová ( $v_f = 1$ ). Bitové rychlosti  $R$  a  $E_b/N_o$  (kapitola 1.3) jsou (pro zjednodušení) totožné pro oba typy spojení (Tab. 2.1) a pro oba směry přenosu (uplink i downlink). Při vlastní simulaci jsou generovány (a následně aktualizovány) parametry pro každého uživatele. V každém kroku je zavolán příslušný AC algoritmus, který rozhodne o přijetí či odmítnutí nového spojení a (řízení handoverů) o zachování nebo přerušování již akceptovaných spojení. Podle [16] jsou dopočítány výkony všech Node Bs a UEs a dále úrovně interferencí v místech příjmu. V programu je také implementováno jednoduché řízení zahlcení sítě, viz [51]. Po skončení simulace jsou získané údaje statisticky zpracovány a jsou posouzeny jednotlivé algoritmy.

## 2.2 Popis činnosti modelu UMTS

Na Obr. 2.4 je blokově znázorněn simulační program. V této kapitole bude podrobněji vysvětlena činnost jednotlivých bloků.

### Nastavení parametrů simulace, Generování nových spojení

V programu lze zvolit délku simulace  $T_{sim}$ , délku jedné iterace (dílčí simulace)  $T_{iter}$  (v simulacích jsou převážně použity hodnoty  $T_{sim} = 60$  minut a  $T_{iter} = 200$  ms) a také intenzitu příchozích spojení  $I_{AS}$ , definovanou jako:

$$I_{AS} = \text{počet příchozích spojení v jedné buňce} / \text{čas.} \quad (2.1)$$

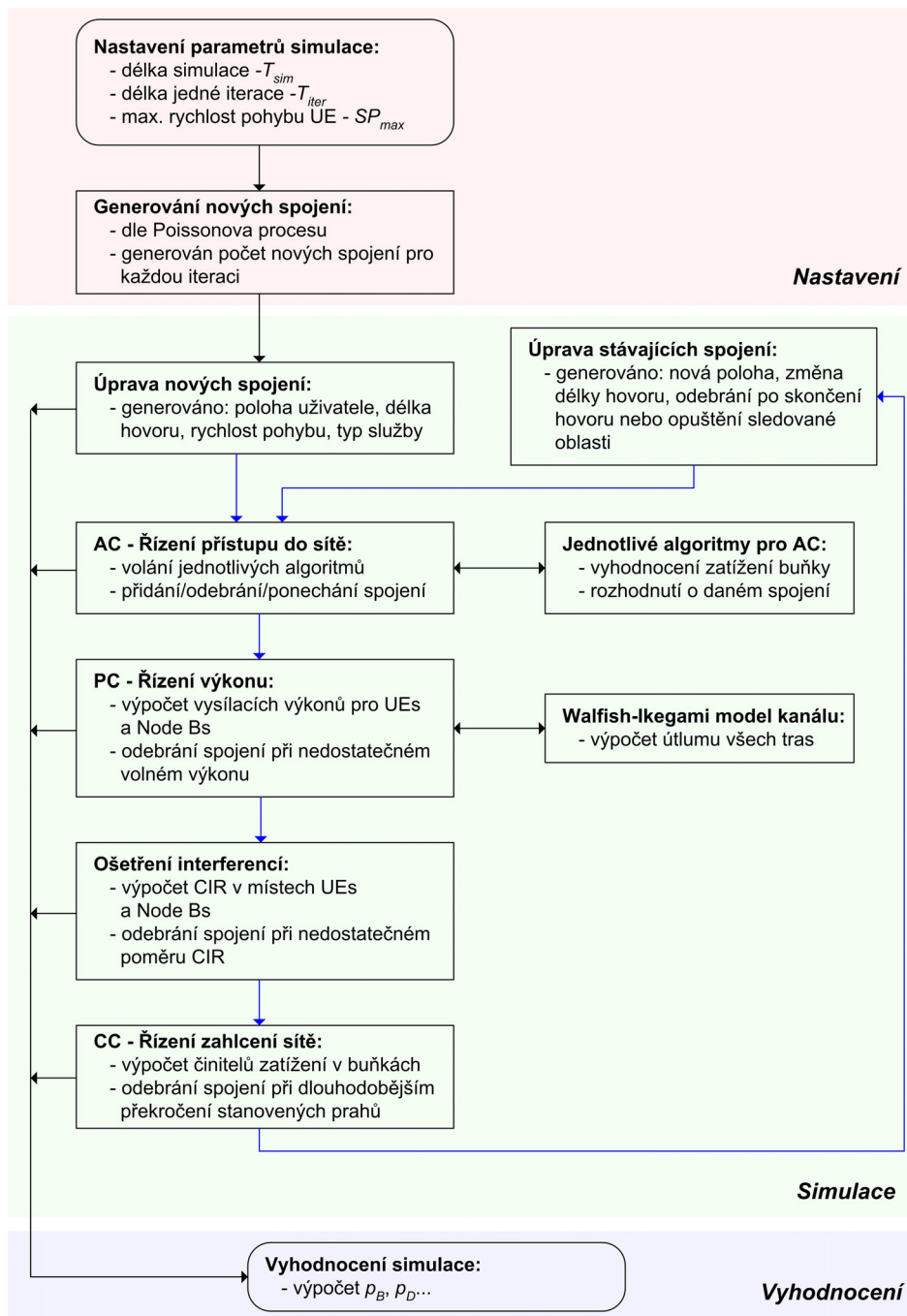
Doba mezi příchody spojení a počet jednotlivých příchozích spojení jsou generovány pomocí Poissonova procesu, viz [2].

## Úprava nových spojení

Pro každé nové spojení (UE) je náhodně generována poloha v systému, rychlost pohybu UE ve stanoveném rozmezí (0–50 km/h), náhodně je generován typ spojení (hlasové/datové s  $v_f = 0.5$  /  $v_f = 1$ ) a jeho délka v rozmezí 60–180 sekund.

## Úprava stávajících spojení

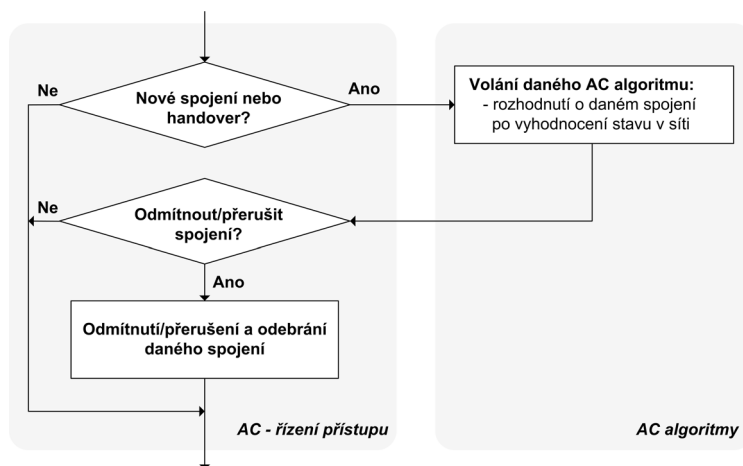
U stávajících spojení je postupně upravována jejich poloha v systému a doba hovoru. Při každé iteraci se pro každé spojení kontroluje, zda nebyla překročena doba hovoru a zda UE neopustil sledovanou oblast (19 nebo 37 buněk). Pokud ano, je spojení ze systému odebráno.



Obr. 2.4 Blokové schéma vytvořeného modelu

### Řízení přístupu do sítě, Jednotlivé algoritmy pro AC

Funkce jednotlivých RRM algoritmů nelze zcela oddělit. Řízení přístupu nelze efektivně simulovat bez uvažování řízení handoverů. Z tohoto důvodu budou níže uvedené AC algoritmy částečně rozhodovat také o handoverech (dále v textu jsou však označeny pouze jako AC algoritmy). Princip činnosti mechanismu pro řízení přístupu je znázorněn na Obr. 2.5. Pro každou iteraci je pro každé nové spojení a při každém handoveru (pro všechna spojení v případě genetických algoritmů) volán daný algoritmus pro řízení přístupu. Algoritmus rozhodne o přijetí/odmítnutí nebo o setrvání/přerušení spojení a mechanismus řízení přístupu dané spojení přidá/odmítne nebo ponechá/přeruší.



Obr. 2.5 Blokové schéma mechanismu pro řízení přístupu

### Řízení výkonu

Pro každou iteraci jsou spočítány vzdálenosti mezi všemi Node Bs a všemi UEs. Vypočítané vzdálenosti jsou použity ve Walfish-Ikegamiho modelu kanálu pro výpočet útlumů všech možných přenosových cest, viz [32]:

$$L[\text{dB}] = 42,6 + 26 \cdot \log_{10} d[\text{km}] + 20 \cdot \log_{10} f[\text{MHz}], \quad (2.2)$$

kde  $L$  je útlum přenosové cesty v dB,  $d$  je vzdálenost v km a  $f$  je kmitočet v MHz (2170 MHz pro downlink a 1980 MHz pro uplink). Vzorec platí pro případ LOS (Line Of Sight). Tento typ přenosového kanálu je použit např. také v [33]. Uvedený vzorec platí (dle [32]) až pro vzdálenosti  $d > 20$  m. Pro kratší vzdálenosti je v programu použit vzorec pro výpočet ztrát šířením:

$$L = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot d} \right)^2, \quad (2.3)$$

kde  $c$  je rychlost světla. Podle [16] jsou (s použitím vazebních matic) vypočítány vysílací výkony všech Node Bs a UEs. Předpokládá se, že každý UE komunikuje s nejbližším Node B. Pro uplink je postup následující, viz [16]. Pro každý  $m$ -tý UE se vypočítá zatížení pro uplink (definované v [16])  $\eta_{m-u}$  (index  $-u$  označuje směr uplink):

$$\eta_{m-u} = \frac{v_{f,m-u} \cdot CIR_{m-u}}{1 + v_{f,m-u} \cdot CIR_{m-u}}, \quad (2.4)$$

kde  $CIR_{m-u}$  je požadovaný poměr mezi výkonovou úrovní nosné a úrovní interferencí,  $v_{f,m-u}$  je faktor aktivity  $m$ -tého UE. Dále se vypočítají jednotlivé členy vazebních matic (čtvercové matice o rozměrech počet buněk  $\times$  počet buněk):

$$M_{ii-u} = \sum_{m \in SM_i} \eta_{m-u} \quad \text{a} \quad M_{ij-u} = \sum_{m \in SM_i} \frac{L_{mi-u}}{L_{mj-u}} \eta_{m-u}, \quad (2.5)$$

kde  $M_{ii-u}$  je prvek vazební matice na pozici  $i$ ,  $i$  (diagonále),  $M_{ij-u}$  je prvek vazební matice na pozici  $i, j$  pro  $i \neq j$  (mimo diagonálu),  $SM_i$  je soubor UEs (mobilních stanic) které patří do  $i$ -té buňky a  $L_{mi-u}$  je útlum trasy mezi  $m$ -tým UE a  $i$ -tým Node B. Dále se vypočítá vektor přijímaných výkonů v buňkách  $\mathbf{C}_{-u}$ :

$$\mathbf{C}_{-u} = (\mathbf{I} - \mathbf{M}_{-u})^{-1} \mathbf{N}_{noise-u}, \quad (2.6)$$

kde  $\mathbf{I}$  je jednotková matice,  $\mathbf{M}_{-u}$  je vazební matice pro uplink a  $\mathbf{N}_{noise-u}$  je matice šumových úrovní na přijímací straně. Vysílaný výkon  $P_{m-u}$   $m$ -tého UE lze vypočítat:

$$P_{m-u} = \frac{\eta_{m-u}}{v_{f,m-u} \cdot L_{mi-u}} C_{i-u}. \quad (2.7)$$

Pro downlink je postup podobný, viz [16], je zde však několik rozdílů. Pro každý  $m$ -tý UE se spočítá zatížení pro downlink  $\eta_{m-d}$ :

$$\eta_{m-d} = \frac{v_{f,m-d} \cdot CIR_{m-d}}{1 + \alpha_m \cdot v_{f,m-d} \cdot CIR_{m-d}}. \quad (2.8)$$

Prvky vazební matice pro downlink lze vypočítat pomocí vztahů:

$$M_{ii-d} = \sum_{m \in SM_i} \alpha_m \cdot \eta_{m-d} \quad \text{a} \quad M_{ij-d} = \sum_{m \in SM_i} \frac{L_{jm-d}}{L_{im-d}} \eta_{m-d}. \quad (2.9)$$

Dále se vypočítají prvky šumové matice  $\mathbf{P}^{(n)}$  a vysílané výkony  $\mathbf{P}_{-d}$  pro downlink pro všechny Node Bs.

$$P_i^{(n)} = \sum_{m \in SM_i} \frac{N_{noise-d}}{L_{im-d}} \eta_{m-d}, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{P}_{-d} = (\mathbf{I} - \mathbf{M}_{-d})^{-1} \cdot (\mathbf{P}^{(n)} + \mathbf{P}^{CCH}), \quad (2.11)$$

kde  $\mathbf{P}^{CCH}$  je výkon vysílaný na společných fyzických kanálech CCH (Common Channels), zvoleno  $P_i^{CCH} = 30$  dBm. Posledním výpočtem je stanovení výkonu  $P_{im-d}$ , kterým  $i$ -tý Node B vysílá k  $m$ -tému UE.

$$P_{im-d} = \frac{\eta_{m-d}}{v_{f,m-d}} \cdot \left( \alpha_m \cdot P_{i-d} + \sum_{j \neq i} \frac{L_{jm-d}}{L_{im-d}} P_{j-d} + \frac{N_{noise-d}}{L_{im-d}} \right). \quad (2.12)$$

Při nedostatečném maximálním vysílacím výkonu Node B jsou některá spojení odebrána ze systému.

### Ošetření interferencí

Pro všechny UEs a Node Bs jsou, z předchozí části programu, vypočítány vysílací výkony a útlumy všech přenosových tras. Blok ošetření interferencí počítá poměr CIR

(Carrier to Interference Ratio) v místech příjmu a porovnává tuto hodnotu s předem zvoleným prahem. Při nedostatečné hodnotě CIR jsou některá spojení odebrána (přerušena) ze systému.

### Řízení zahlcení sítě

Pro každou iteraci počítá CC aktuální hodnoty zvolené veličiny (např. hodnoty činitele zatížení pro uplink a downlink). V případě dlouhodobějšího (použije se průměrná hodnota, získaná s využitím průměrovacího okna o délce jednotek sekund) překročení stanovených prahů jsou některá spojení ze systémů odebrána. Mechanismus pro řízení zahlcení se snaží odebírat poslední přijatá spojení (minimalizovat  $p_D$ ).

### Vyhodnocení simulace

Hodnoty získané z provedených simulací jsou statisticky zpracovány. Jsou vyhodnoceny a vypočítány např. počty úspěšně dokončených spojení, pravděpodobnosti (označení „pravděpodobnost“ nelze chápat exaktně matematicky) přerušení  $p_D$  (Dropping Probability) a odmítnutí  $p_B$  spojení (Blocking Probability):

$$p_B = \text{počet odmítnutých spojení} / \text{počet žádostí o nová spojení}, \quad (2.13)$$

$$p_D = \text{počet přerušovaných spojení} / \text{počet žádostí o nová spojení}. \quad (2.14)$$

V Tab. 2.1 je seznam některých parametrů, které jsou použity v simulačním programu pro všechny (pro převážnou část) simulace, viz [16], [1] a [2].

**Tab. 2.1** Význam a používané hodnoty některých proměnných

Proměnná	Hodnota	Odkaz	Poznámka
$W$	3,84 Mchip/s	(1.1)	chipová rychlost
$E_b/N_0$	7,5 dB	(1.1)	kapitola 1.3
$R$	12,2 kbit/s	(1.1)	bitová rychlost
$\alpha$	0,673	(1.2)	faktor ortogonality
$v_f$	0,5 / 1	(1.1)	faktor aktivity spojení
$j_I$	0,55	(1.1)	kapitola 1.3
$f_{ul}$	1980 MHz	(2.2)	kmitočet pro uplink
$f_{dl}$	2170 MHz	(2.2)	kmitočet pro downlink
$N_{noise}$	-102 dBm	(2.6), (2.10)	úroveň šumu
$CIR_u$	-17,5 dB	(2.4)	kapitola 2.2
$CIR_d$	-17,5 dB	(2.8)	kapitola 2.2
$P^{CCH}$	30 dBm	(2.11)	kapitola 2.2

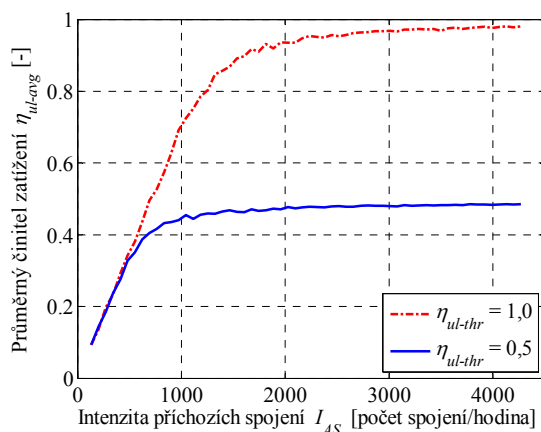
## 2.3 Ověření kapacity systému

V literatuře [31], na kterou se odkazuje mnoho publikací, zabývající se AC v CDMA systémech, lze nalézt vztah pro maximální kapacitu buňky:

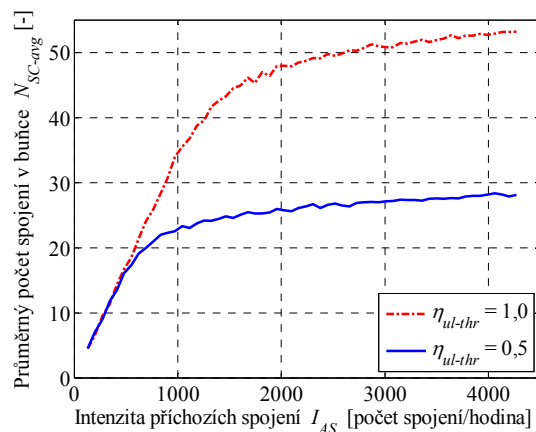
$$N = 1 + \frac{W/R}{E_b/N_0} - \frac{P_n}{P_s}, \quad (2.15)$$

kde  $N$  je maximální počet spojení v buňce,  $P_n$  je výkon signálu šumu a  $P_s$  je přijímaný výkon užitečného signálu. Po zanedbání šumu a dosazení:

$$N \cong 1 + \frac{3,84 \cdot 10^6 / 12,2 \cdot 10^3}{10^{7,5/10}} \cong 57. \quad (2.16)$$



Obr. 2.6 Průměrný činitel zatížení  $\eta_{ul-avg}$  v buňce



Obr. 2.7 Průměrný počet spojení v buňce

Maximální teoretický počet spojení v buňce je tedy 57. Tato hodnota koresponduje s výsledky simulace na Obr. 2.6 a Obr. 2.7. Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms a  $N_{sim} = 20$  (počet opakování simulace pro průměrování hodnot). Jsou zde zobrazeny hodnoty průměrného činitele zatížení pro uplink  $\eta_{ul-avg}$  a průměrného počtu spojení v buňce  $N_{SC-avg}$  pro dvě prahové hodnoty (1 a 0,5) činitele zatížení  $\eta_{ul-thr}$  (viz algoritmus popsany v kapitole 1.3 a 3.1). Skutečný činitel zatížení se v systému postupně přibližuje prahové hodnotě. Počet spojení v buňce se také přibližuje hodnotě, stanovené dle (2.16). Tímto způsobem byly zjednodušeně ověřeny alespoň základní vlastnosti modelu UMTS z hlediska AC.

## 2.4 Ověření řízení výkonu a ošetření interferencí

V Tab. 2.2 jsou pro ilustraci uvedeny hodnoty simulovaných vysílaných výkonů UEs a Node Bs. Parametry simulace jsou stejné jako v kapitole 4.1.3, simulován byl jen algoritmus AC-L, viz kapitola 3.1. Hodnota  $P_{m-u}$  udává výkon signálu, kterým vysílá  $m$ -tý UE, (2.7).  $P_{im-d}$  je výkon signálu, který vysílá  $i$ -tý Node B k  $m$ -tému UE, (2.12).

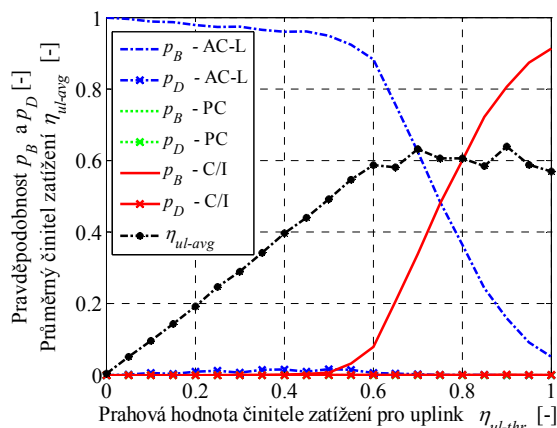
Tab. 2.2 Velikost vysílaných výkonů a C/I v systému

Vysílaný výkon a C/I	$P_{m-u}$ [dBm]	$P_{im-d}$ [dBm]	$C/I_{dl}$ [dB]	$C/I_{ul}$ [dB]
minimální	-64,83	11,87	-17,10	-16,17
střední	-24,19	15,53	-15,50	-15,34
maximální	-19,62	19,83	-14,28	-14,00
celkový $P_d$ [dBm]	-	29,63	-	-
poznámka	výkon UE	výkon Node B	v místech UEs	v místech Node Bs

V tabulce jsou uvedeny maximální, minimální a střední hodnoty. Celkový výkon  $P_d$  je střední hodnota z celkových výkonů signálů, kterými vysílají Node Bs (celkový vysílaný výkon pro všechny UEs v buňce), (2.11). V tabulce jsou také uvedeny hodnoty C/I v místech UEs (pro downlink) a v místech Node Bs (pro uplink). Minimální



požadovaná hodnota  $C/I$  (nastaveno v simulaci pro oba směry přenosu) byla zvolena  $-17,5$  dB.



**Obr. 2.8** Ověření řízení přístupu a ošetření interferencí

Na Obr. 2.8 jsou zobrazeny hodnoty  $p_B$  a  $p_D$  při použití řízení přístupu do sítě (algoritmus AC-L, kapitola 3.1), při použití řízení výkonu PC a při použití ošetření interferencí (kapitola 2.2). Dále je zde zobrazen průměrný činitel zatížení  $\eta_{ul-avg}$  v buňce. Na ose  $x$  jsou různé prahové hodnoty činitele zatížení  $\eta_{ul-thr}$ , které jsou použity algoritmem AC-L. Ze simulace je patrné, že se zvyšujícím se  $\eta_{ul-thr}$ , klesá  $p_B$  pro AC-L (sít' umožňuje přijmout více spojení) a zároveň narůstá  $\eta_{ul-avg}$ . Pro  $\eta_{ul-avg}$  kolem hodnoty asi 0,5 začínají být spojení odmítána mechanismem pro ošetření interferencí v síti, který  $\eta_{ul-avg}$  udržuje na hodnotě asi 0,6. Ze simulace je také patrné, že mechanismus pro řízení výkonu (PC) nepřerušil, ani neodmítnul žádné spojení. Jeho případnou úlohu přebíral mechanismus pro ošetření interferencí. Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 2$  s,  $N_{sim} = 1$ ,  $I_{AS} = 4270$  spojení/hodinu. Minimální požadovaná hodnota  $C/I = -17,5$  dB.

## 2.5 Popis vytvořeného programu

Vytvořený model UMTS systému je obsažen na přiloženém CD. Popis jednotlivých souborů je v příloze 2. Před spuštěním programu je v souboru `cdma_sys_param.m` potřeba definovat (zkontrolovat) parametry vlastní simulace a také parametry spojení (UEs). Vlastní simulace se spouští pomocí souboru `cdma_main.m`. V programu je implementována většina AC algoritmů. Zbytek ostatních (níže prezentovaných) algoritmů je možné nalézt v přiložených simulacích (rovněž na CD). Tyto algoritmy nejsou do modelu zahrnuty z několika důvodů. Některé algoritmy vyžadují upravení modelu do takové podoby, která není přijatelná pro ostatní algoritmy. Vytvořený model by se implementací všech níže uvedených algoritmů stal značně nepřehledným. Z těchto důvodů neobsahuje přiložený model všechny AC algoritmy. Ostatní lze případně dohledat na CD v přiložených simulacích a jejich výsledcích.

## 2.6 Závěr

V této kapitole byl představen vytvořený model pro simulaci řízení přístupu v systému UMTS (ale i jiných RRM funkcí). Podrobně zde byla popsána struktura

vytvořeného modelu sítě, blokové schéma modelu a také jeho dílčích částí. Byly podrobněji popsány jednotlivé části programu, např. generování nových spojení, řízení výkonu UEs a Node Bs, řízení zahlcení sítě a další. V kapitole jsou také uvedeny výsledky několika základních simulací. Vytvořený model systému UMTS byl prezentován např. v [44], [50] a [57].

## 3 Vybrané typy AC algoritmů

U počátečních prací na dizertaci byla pozornost zaměřena na simulace dílčích jednoduchých RRM algoritmů. V publikacích [45], [48] a [49] jsou výsledky simulací algoritmů pro plánování paketového provozu (PS), vycházející z [2]. V publikacích [45], [46] a [47] jsou výsledky simulací algoritmu pro řízení přístupu do sítě (AC), vycházející z [21]. Kapitola 3 je zaměřena na komplexnější simulace, výsledky výše uvedených dílčích jednoduchých simulací zde nejsou prezentovány. Pomocí vytvořeného modelu systému (kapitola 2) byly simulovány vlastnosti několika složitějších AC algoritmů, které jsou podrobněji popsány v této kapitole. Řízení přístupu do sítě rozhoduje o přijetí nových spojení (případně o změně parametrů stávajících spojení). Funkce jednotlivých RRM algoritmů nelze zcela oddělit. Řízení přístupu nelze efektivně simulovat bez uvažování řízení handoverů. Z tohoto důvodu budou níže uvedené AC algoritmy rozhodovat také o handoverech.

### 3.1 Použití činitele zatížení (AC-L)

Nejjednodušší simulovaný algoritmus je založený na výpočtu činitele zatížení, ([1], [44]). Tento algoritmus je dále v textu označován zkratkou **AC-L**. Pro každou buňku se podle (1.1) vypočítá činitel zatížení pro uplink,  $\eta_{ul}$ , a podle (1.2) se vypočítá činitel zatížení pro downlink,  $\eta_{dl}$ . Vypočítané hodnoty se porovnávají s rozhodovacími prahy  $F_{thr}$ , které jsou odlišné pro nová/stávající a hlasová/datová spojení. Pokud je vypočítaná (aktuální) hodnota  $\eta_{ul,dl} >$  než příslušný práh  $F_{thr}$ , spojení je odmítnuto/přerušeno. Použití mírně rozdílných prahů umožňuje přiřadit každému typu spojení jinou prioritu. Pro uplink a downlink jsou použité rozhodovací prahy stejné. Velmi podobný přístup je použit např. v [42].

### 3.2 Použití fuzzy logiky

V dizertační práci je simulováno několik verzí algoritmů, které jsou založené na fuzzy logice ([44], [17], [18]). Blokové schéma použitého pětivrstvého algoritmu je na Obr. 3.1. Tato struktura je použita u všech níže uvedených algoritmů. U algoritmů se 4 vstupními proměnnými je počet prvků v jednotlivých vrstvách, kromě vrstev 1 a 5, dvojnásobný.

#### 3.2.1 Fuzzy algoritmus č. 1 (AC-F1)

První verze AC, využívající fuzzy logiku, je dále v textu označována zkratkou **AC-F1**. Algoritmus používá tři vstupní proměnné: faktor definující aktivitu uživatele  $v_f$ , mobilitu uživatele (rychlost pohybu)  $SP$  a činitel zatížení pro uplink v dané buňce  $\eta_{ul}$ .

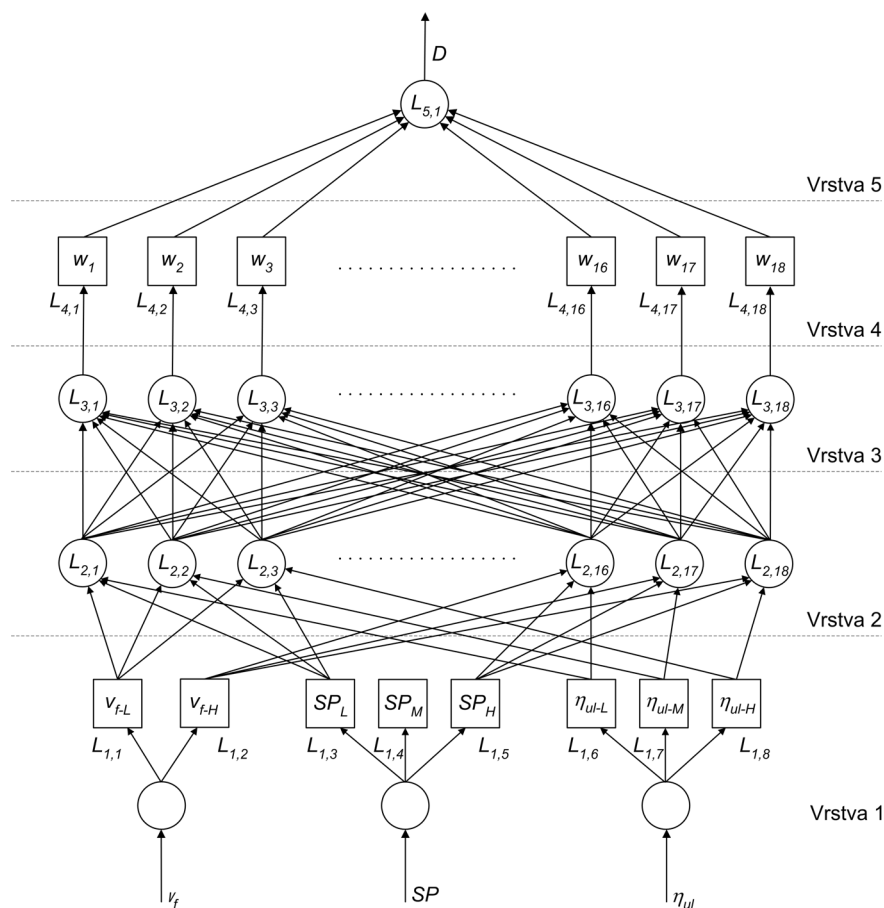
Struktura algoritmu přímo odpovídá Obr. 3.1. Ve *vrstvě 1* je pro všechny vstupní proměnné vyjádřena míra jejich příslušnosti  $\mu$ , ve zvolených skupinách. Např. činitel

zatížení může být *nizký*, *střední* a *vysoký*, může ale patřit i do dvou skupin zároveň. Pro zpracování vstupních proměnných jsou použity převážně trojúhelníkové funkce, viz Obr. 3.2 a Obr. 3.3. Pro  $v_f$  (faktor aktivity spojení) byla použita jednoduchá funkce (obdélníková) s jednoznačným přiřazením proměnné. *Vrstva 2* postihuje všechny možné kombinace vstupních proměnných (vytváří se součiny všech kombinací pro vstupní proměnné, respektive pro jejich  $\mu$ ):

$$\begin{aligned} L_{2,1} &= \mu_{v_f-L}(v_f) \cdot \mu_{SP_L}(SP) \cdot \mu_{\eta_{ul-L}}(\eta_{ul}) \\ L_{2,2} &= \mu_{v_f-L}(v_f) \cdot \mu_{SP_L}(SP) \cdot \mu_{\eta_{ul-M}}(\eta_{ul}) \\ &\vdots \\ L_{2,18} &= \mu_{v_f-H}(v_f) \cdot \mu_{SP_H}(SP) \cdot \mu_{\eta_{ul-H}}(\eta_{ul}). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Ve *vrstvě 3* dochází k normování:

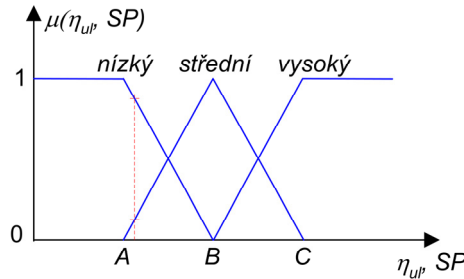
$$L_{3,i} = \frac{L_{2,i}}{\sum_{i=1}^{18} L_{2,i}}. \quad (3.2)$$



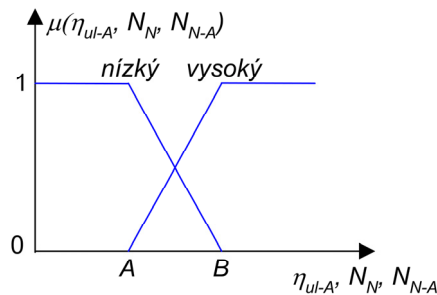
Obr. 3.1 Blokové schéma fuzzy AC

Ve *vrstvě 4* je pro zjednodušení použito jednoduché váhování. Násobení váhovacími koeficienty  $w_i$  odpovídá aplikaci fuzzy pravidel. Tato pravidla jsou založená na „znalosti dané problematiky“ (vyjadřují „logická řešení“ daných stavů). Jednotlivá navržená pravidla jsou definována v Tab. 3.1. Ve *vrstvě 5* dochází

k prostému součtu. Výsledný signál  $D$  je porovnán s rozhodovacími prahy  $F_{thr}$  (označení je stejné jako pro AC-L, kde je však  $F_{thr}$  prahová hodnota činitele zatížení). U fuzzy algoritmů jsou spojení odmítnuta/přerušena pro  $D < F_{thr}$ . Pro nová/stávající a hlasová/datová spojení se používají ([27], [28]) různé tabulky s odlišnými pravidly. V následujících simulacích je použita jedna tabulka pro všechna spojení, odlišení jednotlivých typů spojení je provedeno pomocí různých rozhodovacích prahů.



Obr. 3.2 Funkce pro zpracování vstupních proměnných  $\eta_{ul}$  a  $SP$



Obr. 3.3 Funkce pro zpracování vstupních proměnných  $\eta_{ul-A}$ ,  $N_{Np}$  a  $N_{N-A}$ .

Tab. 3.1 Fuzzy pravidla pro AC-F1

Pravidlo č.	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
1	nízký	nízký	nízký	určitě přijmout
2	nízký	nízký	střední	přijmout
3	nízký	nízký	vysoký	asi přijmout
4	nízký	střední	nízký	určitě přijmout
5	nízký	střední	střední	asi přijmout
6	nízký	střední	vysoký	asi přijmout
7	nízký	vysoký	nízký	přijmout
8	nízký	vysoký	střední	asi přijmout
9	nízký	vysoký	vysoký	asi odmítnout
10	vysoký	nízký	nízký	asi přijmout
11	vysoký	nízký	střední	přijmout
12	vysoký	nízký	vysoký	asi odmítnout
13	vysoký	střední	nízký	přijmout
14	vysoký	střední	střední	asi přijmout
15	vysoký	střední	vysoký	asi odmítnout
16	vysoký	vysoký	nízký	asi přijmout
17	vysoký	vysoký	střední	asi přijmout
18	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

### 3.2.2 Fuzzy algoritmus č. 2 (AC-F2)

Jedná se o modifikaci AC-F1, u které je doplněna detekce uživatelů v blízkém okolí aktuální buňky (4 vstupní proměnné), [50]. Čtvrtou vstupní proměnnou je počet uživatelů v blízkém okolí buňky,  $N_N$  (pro vzdálenosti menší než 50 m od okraje buňky). Algoritmus používá pravidla, definovaná v Tab. 3.2 a Tab. 3.3. Algoritmus je dále označován zkratkou **AC-F2**.

**Tab. 3.2** Fuzzy pravidla pro AC-F2 až AC-F4, první část

Pravidlo č.	$N_N$	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
1	nízký	nízký	nízký	nízký	určitě přijmout
2	nízký	nízký	nízký	střední	přijmout
3	nízký	nízký	nízký	vysoký	asi přijmout
4	nízký	nízký	střední	nízký	určitě přijmout
5	nízký	nízký	střední	střední	asi přijmout
6	nízký	nízký	střední	vysoký	asi přijmout
7	nízký	nízký	vysoký	nízký	přijmout
8	nízký	nízký	vysoký	střední	asi přijmout
9	nízký	nízký	vysoký	vysoký	asi odmítnout
10	nízký	vysoký	nízký	nízký	určitě přijmout
11	nízký	vysoký	nízký	střední	přijmout
12	nízký	vysoký	nízký	vysoký	asi odmítnout
13	nízký	vysoký	střední	nízký	přijmout
14	nízký	vysoký	střední	střední	asi přijmout
15	nízký	vysoký	střední	vysoký	asi odmítnout
16	nízký	vysoký	vysoký	nízký	asi přijmout
17	nízký	vysoký	vysoký	střední	asi přijmout
18	nízký	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

**Tab. 3.3** Fuzzy pravidla pro AC-F2 až AC-F4, druhá část

Pravidlo č.	$N_N$	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
19	vysoký	nízký	nízký	nízký	přijmout
20	vysoký	nízký	nízký	střední	asi přijmout
21	vysoký	nízký	nízký	vysoký	asi odmítnout
22	vysoký	nízký	střední	nízký	přijmout
23	vysoký	nízký	střední	střední	asi odmítnout
24	vysoký	nízký	střední	vysoký	asi odmítnout
25	vysoký	nízký	vysoký	nízký	asi přijmout
26	vysoký	nízký	vysoký	střední	asi odmítnout
27	vysoký	nízký	vysoký	vysoký	odmítnout
28	vysoký	vysoký	nízký	nízký	přijmout
29	vysoký	vysoký	nízký	střední	asi přijmout
30	vysoký	vysoký	nízký	vysoký	odmítnout
31	vysoký	vysoký	střední	nízký	asi přijmout
32	vysoký	vysoký	střední	střední	asi odmítnout
33	vysoký	vysoký	střední	vysoký	odmítnout
34	vysoký	vysoký	vysoký	nízký	asi odmítnout
35	vysoký	vysoký	vysoký	střední	asi odmítnout
36	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

### 3.2.3 Fuzzy algoritmus č. 3 (AC-F3)

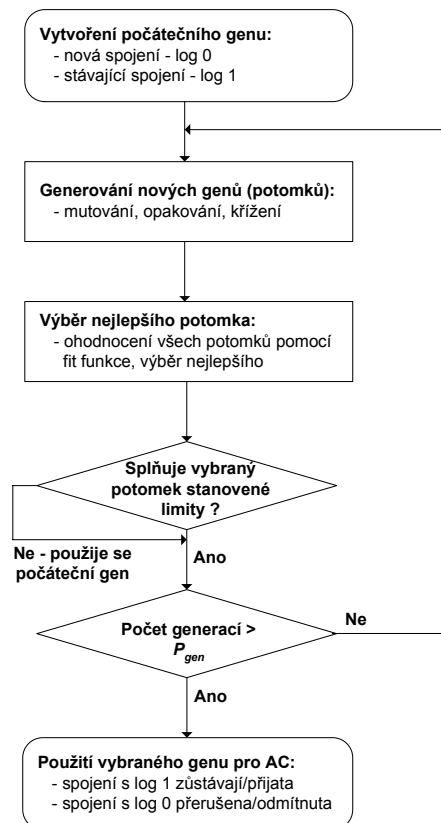
Jedná se o modifikaci AC-F1, u které je doplněna detekce uživatelů v blízkém okolí aktuální buňky, ale také je rozlišen i směr jejich pohybu (4 vstupní proměnné). Čtvrtou vstupní proměnnou je počet uživatelů v blízkém okolí buňky (do 50 m od okraje buňky)  $N_{N-A}$ , kteří se k dané buňce přibližují. Algoritmus používá pravidla, definovaná v Tab. 3.2 a Tab. 3.3 (pro AC-F3 pro  $N_{N-A}$  platí sloupec  $N_N$ ) Algoritmus je dále označován zkratkou AC-F3.

### 3.2.4 Fuzzy algoritmus č. 4 (AC-F4)

Jedná se o modifikaci AC-F1, u které je doplněn výpočet průměrného činitele zatížení  $\eta_{ul-A}$  v okolních šesti buňkách. Pro servisní buňky 1–7 je vypočítán průměrný činitel zatížení  $\eta_{ul-A}$  v okolních 6 buňkách. Pro buňky 8–19 (na okraji systému) je vypočítán činitel zatížení  $\eta_{ul-A}$  v okolních 3 až 4 buňkách (Obr. 2.1) a  $\eta_{ul-A}$  je dále násoben konstantou 1,75 (jako kompenzace chybějících okolních buněk). Algoritmus používá pravidla, definovaná v Tab. 3.2 a Tab. 3.3 (význam sloupce  $N_N$  platí pro  $\eta_{ul-A}$ ). Algoritmus je dále označován zkratkou AC-F4.

## 3.3 Použití genetických algoritmů

Pro AC lze využít také genetické algoritmy. V práci je simulováno několik verzí algoritmů, které jsou založené na genetických algoritmech [29] a [30]. Blokové schéma navržených algoritmů je na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Blokové schéma genetických AC algoritmů

Tato struktura (Obr. 3.4) je použita u všech níže uvedených algoritmů. Dle aktuální situace v buňce je vytvořena struktura počátečního genu. Nová spojení jsou reprezentována log 0 (spojení zatím nejsou přijata), stávající spojení jsou reprezentována log 1 (spojení jsou již v buňce přijata). Z počátečního genu se následně vygeneruje (pomocí mutace, křížení částí genu) sada nových genů (potomstvo). Z těchto nových genů se pomocí optimalizační funkce vyhledá nejvhodnější gen. Při simulacích bylo zjištěno, že je optimální podrobit tento gen ještě další kontrole. Pokud kontrolou neprojde, je nahrazen počátečním genem. Po vygenerování několika generací je zvolen nejvýhodnější gen (pomocí optimalizační funkce) a jeho struktura je použita při procesu AC. Spojení, kterým v genu odpovídá log 1, jsou v systému ponechána (přijata), ostatní jsou přerušena (odmítnuta).

### 3.3.1 Algoritmus se dvěma optimalizačními funkcemi (AC-G1)

První simulovaný algoritmus (dále označovaný jako **AC-G1**) používá fit funkci, která se skládá ze dvou částí. Pro všechny potomky spočítá algoritmus hodnoty obou fit funkcí  $F_{F1,i}$  a  $F_{F2,i}$ :

$$F_{F1,i} = \eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i} \quad (3.3)$$

$$F_{F2,i} = a_1 \cdot \sum_{j=1}^{N_{new,i}} 1 + 1/v_{f,j} + a_2 \cdot \sum_{j=1}^{N_{old,i}} 1 + 1/v_{f,j} \quad (3.4)$$

kde  $\eta_{ul-thr}$  je prahová hodnota činitele zatížení,  $F_{F1,i}$  a  $F_{F2,i}$  jsou hodnoty použitých fit funkcí,  $N_{new,i}$  je počet nových přijatých spojení,  $N_{old,i}$  je počet stávajících ponechaných spojení a  $\eta_{ul,i}$  je hodnota činitele zatížení v uplinku pro  $i$ -tý gen (potomka),  $a_1$  a  $a_2$  jsou vhodně zvolené konstanty. Jako optimální potomek je vybrán ten gen, pro nějž je  $F_{F1,i}$  minimální a zároveň  $F_{F2,i}$  je maximální.

### 3.3.2 Algoritmus s jednou optimalizační funkcí (AC-G2)

Druhý simulovaný algoritmus (dále označovaný jako **AC-G2**) používá pouze jednu fit funkci. Pro všechny potomky spočítá algoritmus hodnoty fit funkce  $F_{c,i}$ :

$$F_{c,i} = (a_1 \cdot N_{n_v,i} + a_2 \cdot N_{o_v,i} + a_3 \cdot N_{n_d,i} + a_4 \cdot N_{o_d,i}) \cdot f(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) \quad (3.5)$$

kde  $F_{c,i}$  je hodnota použité fit funkce (hledá se maximum),  $N_{n_v,i}$  je počet nových přijatých hlasových spojení,  $N_{o_v,i}$  je počet stávajících ponechaných hlasových spojení,  $N_{n_d,i}$  je počet nových přijatých datových spojení,  $N_{o_d,i}$  je počet stávajících ponechaných datových spojení pro  $i$ -tý gen (potomka),  $a_1$  až  $a_4$  jsou vhodně zvolené konstanty. Funkce  $f(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) = 1$  pro  $(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) > -0,1$  a  $f(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) = 0$  pro  $(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) \leq -0,1$ . Význam ostatních proměnných je stejný jako u (3.3) a (3.4).

## 3.4 Závěr

V této kapitole byl popsán algoritmus založený na výpočtu činitele zatížení, několik algoritmů využívajících fuzzy logiku a několik genetických algoritmů. Podrobnější informace o jednotlivých algoritmech nejsou v publikacích (ze kterých algoritmy vycházejí), uvedených v kapitole 3, prezentovány. Např. v [17] a [18],



na kterých je založena kapitola 3.2, nejsou definovány prahové hodnoty funkcí pro zpracování vstupních proměnných, není zde uvedena délka spojení apod. Algoritmy uvedené v této práci jsou tedy do jisté míry originální. Algoritmy byly prezentovány např. v [44], [50], [52], [53] a [55].

## 4 Simulace AC algoritmů

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací a vzájemné srovnání algoritmů pro řízení přístupu, které byly podrobněji popsány v kapitole 3. Jednotlivé algoritmy vycházejí z příslušných referencí, uvedených v kapitole 3. Podrobnější informace o jednotlivých algoritmech (např. údaje o použitých rozhodovacích prazích nebo o konkrétním principu činnosti) však v publikacích uvedeny nejsou. V [17] a [18], na kterých je založena kapitola 3.2, nejsou např. definovány prahové hodnoty funkcí pro zpracování vstupních proměnných, není uvedena délka spojení apod. Publikace [32] (genetické algoritmy) řeší AC v rámci několika mobilních systémů. Algoritmy uvedené v této práci jsou tedy do jisté míry originální. Není také bohužel možné provést srovnání publikovaných a navržených algoritmů.

V kapitole 3.2.1 je popis činnosti fuzzy logiky. Vrstva 1 využívá trojúhelníkové funkce pro zpracování vstupních proměnných, viz Obr. 3.2 a Obr. 3.3. Meze těchto funkcí pro jednotlivé vstupní proměnné jsou definovány v Tab. 4.1. V některých následujících simulacích se hodnoty mírně liší a jsou uvedeny v příslušné podkapitole. Prahy byly nastavovány tak, aby průběh  $\eta_{ul}$  byl pro všechny algoritmy přibližně stejný a bylo možné algoritmy vzájemně porovnat (při podobném zatížení sítě). Jednotlivé parametry simulací (i v kapitole 6) byly nastavovány empiricky, případně byly také optimalizovány. Pro  $v_f$  (faktor aktivity spojení) byla použita jednoduchá funkce (obdélníková) s jednoznačným přiřazením proměnné ( $\mu(v_f)$ ) nabývá pouze hodnot 0 a 1).

**Tab. 4.1** Hraniční body funkcí pro zpracování vstupních proměnných

Vstupní proměnná	A	B	C
$v_f$ – faktor aktivity spojení [-]	0,75	-	-
$SP$ – rychlost UE [km/h]	15	35	50
$\eta_{ul}$ – činitel zatížení [-]	0,3	0,4	0,5
$N_N$ a $N_{N-A}$ – počet UEs v okolí buňky [-]	2	20	-
$\eta_{ul-A}$ – průměrný činitel zatížení [-]	0,42	0,46	-

Ve vrstvě 4 dochází k násobení váhovacími koeficienty, které korespondují s fuzzy pravidly. Váhovací koeficienty pro všechny níže uvedené simulace jsou definovány v Tab. 4.2.

**Tab. 4.2** Váhovací koeficienty pro 4. vrstvu

Fuzzy rozhodnutí	Váhovací koeficient $w_i$
určitě přijmout	1,0
přijmout	0,8
asi přijmout	0,6
asi odmítnout	0,2
odmítnout	0,0

V simulacích jsou náhodně (dle Poissonova procesu) generována spojení, jejich typ a délka. Náhodně jsou také generovány počáteční polohy a následný pohyb

(rychlost a směr) UEs. Tyto náhodné stavy v systému se částečně promítají do výsledků jednotlivých simulací, které vykazují jisté kolísání sledovaných veličin. Níže uvedené výsledky jsou proto průměrné hodnoty z několika stejných simulací. Na ose  $x$  jsou různé hodnoty intenzity příchozích spojení  $I_{AS}$  (simulace probíhaly pro  $I_{AS} = 132, 202, 272, 342, 412, 482, 553, 623, 693, 763, 833, 904, 974, 1044$  a  $1114$  spojení/hodina). Pro každou hodnotu intenzity příchozích spojení byla provedena simulace s délkou trvání  $T_{sim}$  (60 minut). V níže uvedených grafech jsou znázorněny (postupně) výsledky těchto dílčích simulací, příklad je uveden v kapitole 4.1.3. Níže zobrazené průběhy činitelů zatížení jsou pro uplink. Podle Obr. 2.8 má funkce řízení výkonu a ošetření interferencí vliv pouze v případech většího zatížení buňky (přibližně pro  $\eta_{ul} > 0,55$ ). V níže uvedených simulacích nebyly funkce řízení výkonu ani ošetření CIR uvažovány.

## 4.1 Simulace fuzzy algoritmů

### 4.1.1 Srovnání algoritmů AC-L a AC-F1

Na Obr. 4.1 až Obr. 4.6 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L a AC-F1. U simulace na Obr. 4.1 byly pro AC-F1 použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,4$ ,  $F_{thr-DN} = 0,6$ ,  $F_{thr-VO} = 0,1$ ,  $F_{thr-DO} = 0,3$  pro AC-F1, kde  $F_{thr-VN}$  je práh pro nová hlasová spojení,  $F_{thr-DN}$  je práh pro nová datová spojení,  $F_{thr-VO}$  je práh pro stávající hlasová spojení a  $F_{thr-DO}$  je práh pro stávající datová spojení.

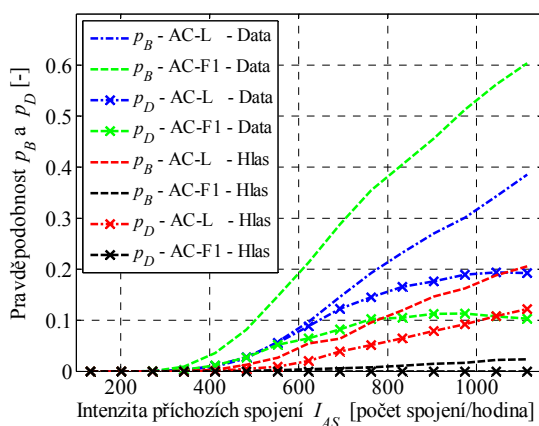
Pro simulaci na Obr. 4.2 až Obr. 4.6 byly použity prahové hodnoty:

- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1.

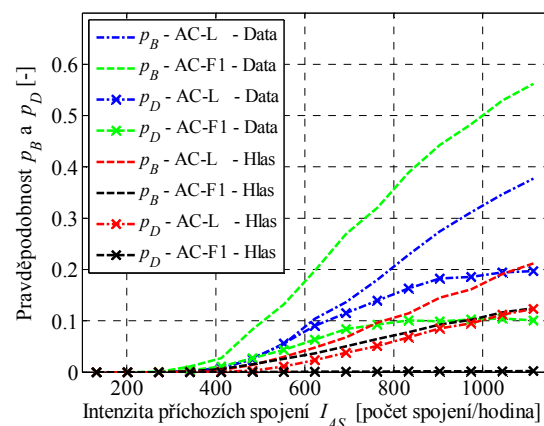
Pro obě simulace (na Obr. 4.1 až Obr. 4.6) byly pro algoritmus AC-L použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,500$ ,  $F_{thr-DN} = 0,499$ ,  $F_{thr-VO} = 0,505$ ,  $F_{thr-DO} = 0,504$  pro AC-L.

Parametry simulací:  $T_{sim} = 30$  min,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ .

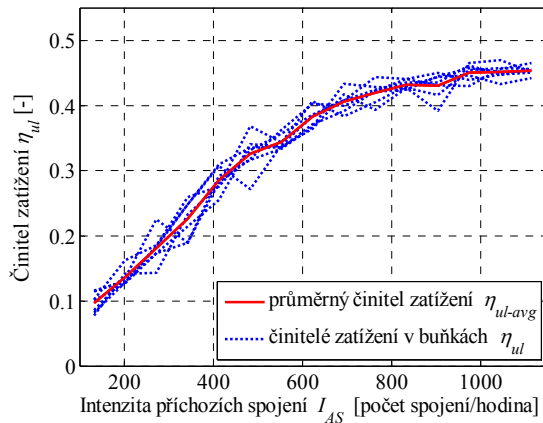


**Obr. 4.1** Srovnání algoritmů AC-L a AC-F1, 1. set rozhodovacích prahů

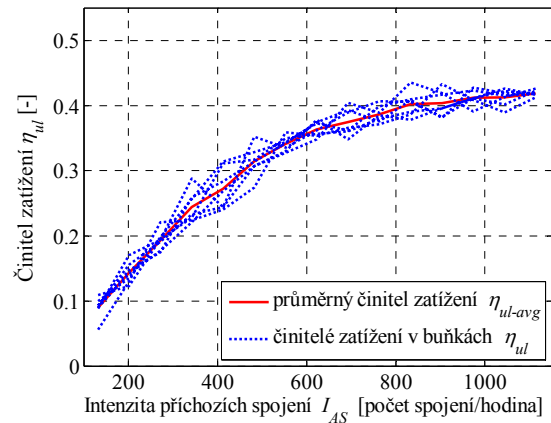


**Obr. 4.2** Srovnání algoritmů AC-L a AC-F1, 2. set rozhodovacích prahů

Ze simulací na Obr. 4.1 a Obr. 4.2 je patrné, že AC-F1 umožní snížit pravděpodobnost přerušení spojení  $p_D$  a pro hlasové uživatele umožní snížit také pravděpodobnost odmítnutí spojení  $p_B$ .



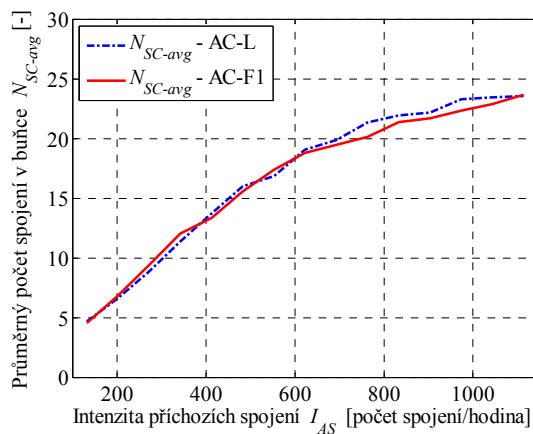
**Obr. 4.3** Velikost činitelů zatížení  $\eta_{ul}$  v 7 centrálních buňkách pro AC-L



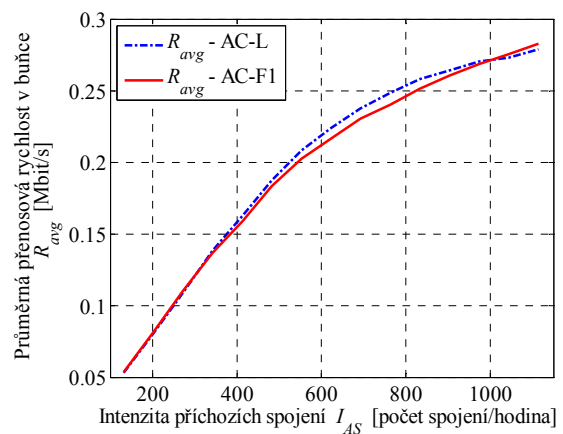
**Obr. 4.4** Velikost činitelů zatížení  $\eta_{ul}$  v 7 centrálních buňkách pro AC-F1

Na Obr. 4.3 a Obr. 4.4 jsou (tečkovanou modrou čarou) znázorněny průběhy činitelů zatížení ( $\eta_{ul}$ ) v 7 centrálních buňkách (jednotlivé buňky zde nejsou rozlišeny). Červené křivky v obou obrázcích zobrazují hodnotu průměrného činitele zatížení v centrální oblasti sítě. U obou algoritmů má nárůst  $\eta_{ul}$  obdobný charakter. Vlivem nepatrně rozdílného nastavení obou algoritmů, dosahuje AC-F1 nižší limitní hodnoty činitele zatížení v buňce.

Na Obr. 4.5 jsou znázorněny průměrné počty spojení v buňce pro oba algoritmy. Na Obr. 4.6 jsou znázorněny průměrné přenosové rychlosti v buňce pro oba algoritmy. Přestože algoritmus AC-F1 dosahuje mírně nižší hodnoty činitele zatížení, viz Obr. 4.3 a Obr. 4.4, jsou průměrné počty uživatelů v buňce a průměrné přenosové rychlosti pro oba algoritmy srovnatelné.



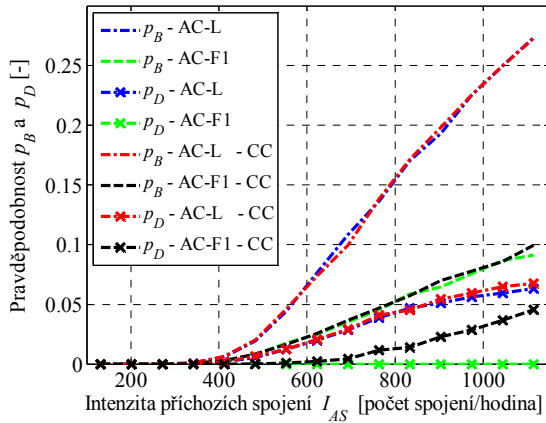
**Obr. 4.5** Srovnání průměrného počtu spojení v buňce



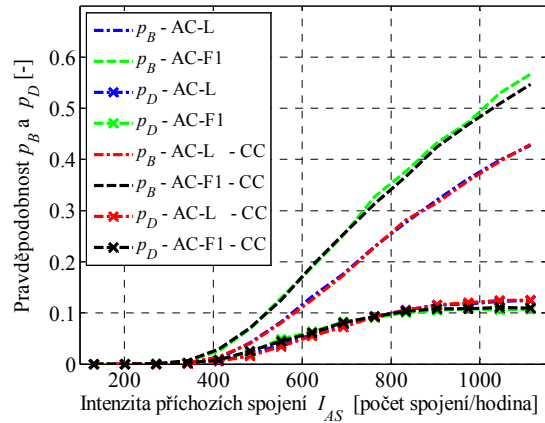
**Obr. 4.6** Srovnání průměrné přenosové rychlosti v buňce

### 4.1.2 Řízení zahlcení sítě

Na Obr. 4.7 až Obr. 4.10 jsou zobrazeny simulace, které demonstrují vliv použití řízení zahlcení sítě CC (kapitola 2.2). Použitý algoritmus je relativně jednoduchý. Algoritmus CC počítá průměrnou hodnotu  $\eta_{ul}$  a  $\eta_{dl}$  s použitím průměrovacího okna. Při dlouhodobějším překročení hodnoty  $\eta_{ul} = \eta_{dl} = 0,5$ , dojde k přerušení posledního přijatého spojení. Na Obr. 4.7 a Obr. 4.8 bylo použito průměrovací okno o velikosti 30 sekund. Na Obr. 4.9 a Obr. 4.10 bylo použito průměrovací okno o délce 20 sekund.



Obr. 4.7 Vliv řízení zahlčení sítě na hlasová spojení, průměrovací okno s délkou 30 sekund

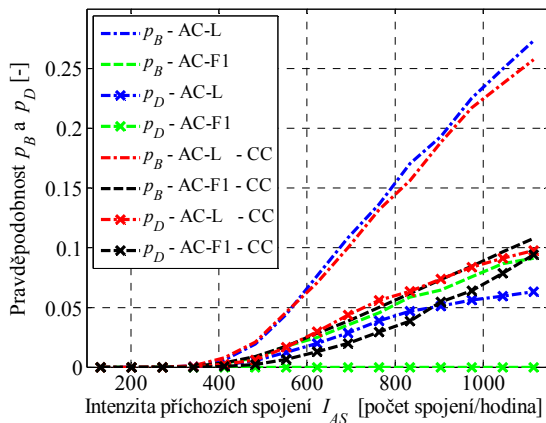


Obr. 4.8 Vliv řízení zahlčení sítě na datová spojení, průměrovací okno s délkou 30 sekund

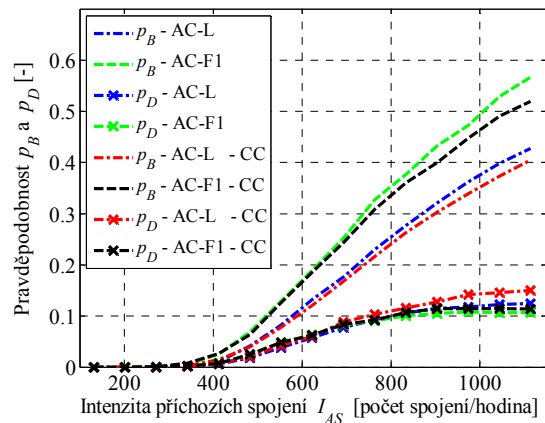
Pro obě simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,490$ ,  $F_{thr-DN} = 0,489$ ,  $F_{thr-VO} = 0,495$ ,  $F_{thr-DO} = 0,494$  pro AC-L.

Parametry simulací:  $T_{sim} = 60$  min,  $T_{iter} = 1$  s,  $N_{sim} = 10$ .



Obr. 4.9 Vliv řízení zahlčení sítě na hlasová spojení, průměrovací okno s délkou 20 sekund



Obr. 4.10 Vliv řízení zahlčení sítě na datová spojení, průměrovací okno s délkou 20 sekund

Z provedených simulací je patrné, že použité řízení zahlčení sítě CC zvyšuje  $p_D$ . Algoritmus sice odebírá naposledy přijatá spojení, ale ta už mohou v síti nějakou (i třeba minimální) dobu existovat. Algoritmus CC nerozlišuje mezi hlasovými a datovými spojeními. Vzhledem k jejich různým prioritám a různým hodnotám  $p_D$  a  $p_B$  (Obr. 4.7 a Obr. 4.8) má CC významnější vliv na  $p_D$  hlasových spojení. Na Obr. 4.9 a Obr. 4.10 bylo použito kratší průměrovací okno (s délkou 20 sekund). Vliv CC na obě pravděpodobnosti je podle očekávání větší (více se projeví vliv krátkodobějšího překročení prahové hodnoty  $\eta_{ul}$  a  $\eta_{dl}$ ), než pro simulace na Obr. 4.7 a Obr. 4.8.

#### 4.1.3 Srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3

Obsahem této kapitoly je srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. U těchto algoritmů bylo provedeno několik simulací pro různá specifická nastavení sítě i samotných algoritmů.

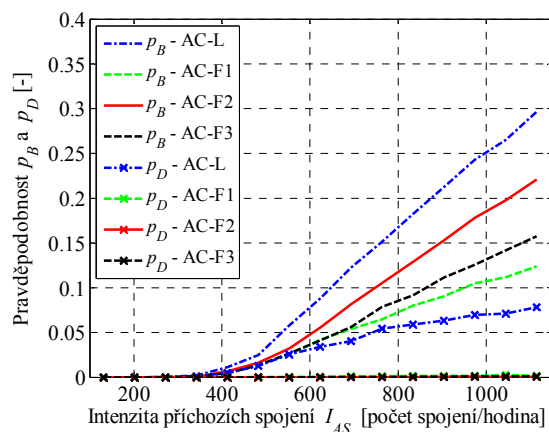
### Základní srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3

Na Obr. 4.11 až Obr. 4.18 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

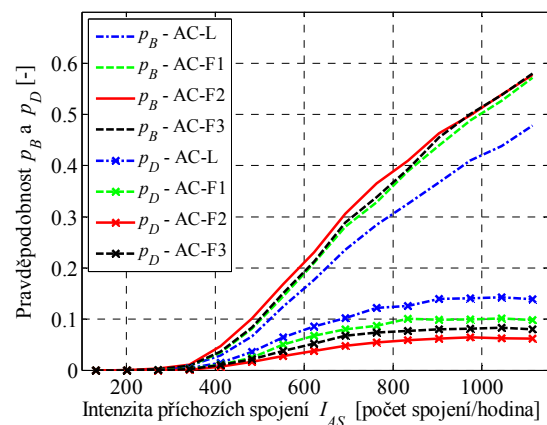
- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F2,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-F3.

Parametry simulací:  $T_{sim} = 60$  min,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ .

Ze simulací na Obr. 4.11 až Obr. 4.15 je patrné, že nejnvýhodnějších vlastností (nízká hodnota  $p_D$ , velký počet uživatelů v systému a velká přenosová rychlost) dosahuje algoritmus AC-F3. Algoritmus AC-F1 dosahuje také dobrých výsledků. Algoritmus AC-F2 dosahuje nejnižší hodnoty  $p_D$  (Obr. 4.12), nicméně počet uživatelů v systému a dosažená přenosová rychlost je menší, než u ostatních fuzzy algoritmů.



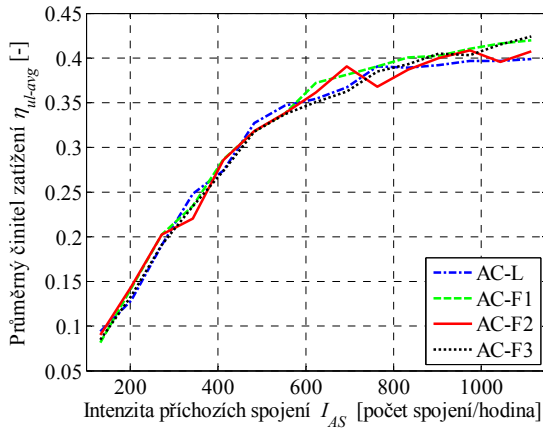
**Obr. 4.11** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení



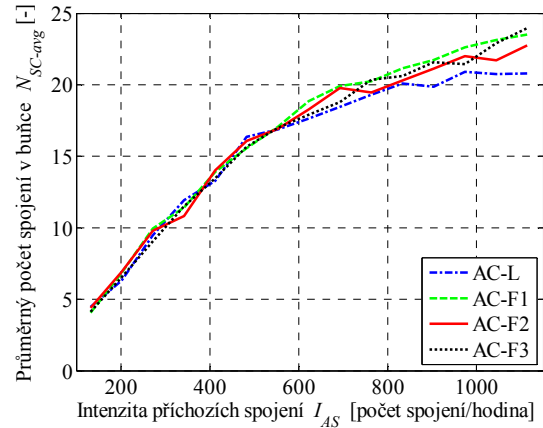
**Obr. 4.12** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení

Na Obr. 4.13 je srovnání průměrných činitelů zatížení pro jednotlivé algoritmy. Dosažené hodnoty  $\eta_{ul-avg}$  jsou pro všechny algoritmy srovnatelné. Srovnání průměrného počtu spojení a průměrné přenosové rychlosti v buňce je znázorněno na Obr. 4.14 a Obr. 4.15. Pro vyšší intenzitu příchozích spojení dosahuje AC-L nejmenší přenosové rychlosti a nejmenšího počtu spojení v buňce.

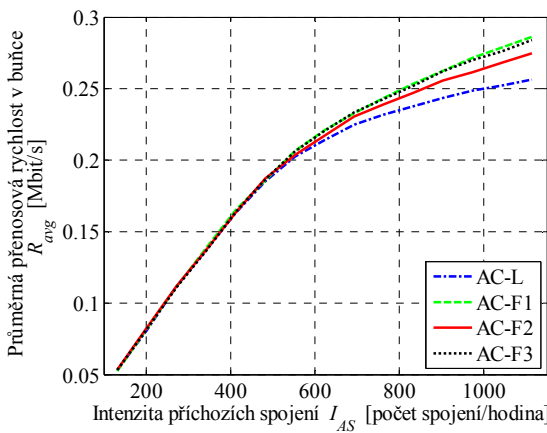
Na Obr. 4.16 až Obr. 4.18 jsou zobrazeny průměrné počty úspěšně dokončených spojení v buňce pro jednotlivé algoritmy. Ze simulací je patrné, že při použití fuzzy algoritmů je tento počet vyšší. Zároveň lze ze simulací pozorovat vliv různých priorit hlasových a datových spojení. Pro vyšší intenzitu příchozích spojení jsou (u všech použitých algoritmů) datová spojení omezována na úkor hlasových spojení (Obr. 4.17 a Obr. 4.18). U algoritmu AC-L lze pozorovat velký počet dokončených datových spojení a nižší počet dokončených hlasových spojení. Při srovnání s AC-F2 jsou počty dokončených datových spojení podobné, AC-F2 však dosahuje vyššího počtu úspěšně dokončených hlasových spojení.



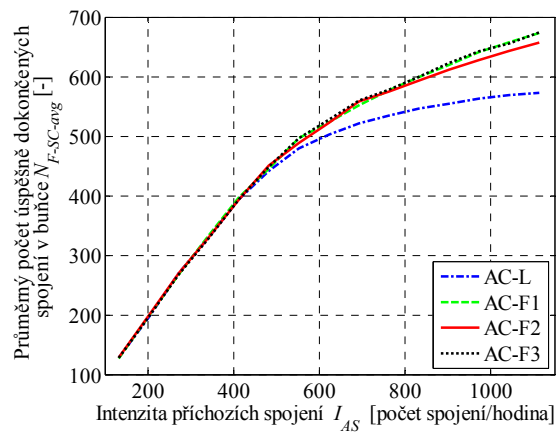
Obr. 4.13 Srovnání průměrných činitelů zatížení



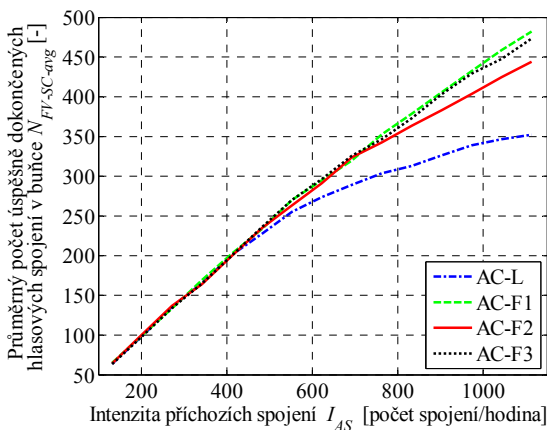
Obr. 4.14 Srovnání průměrného počtu spojení



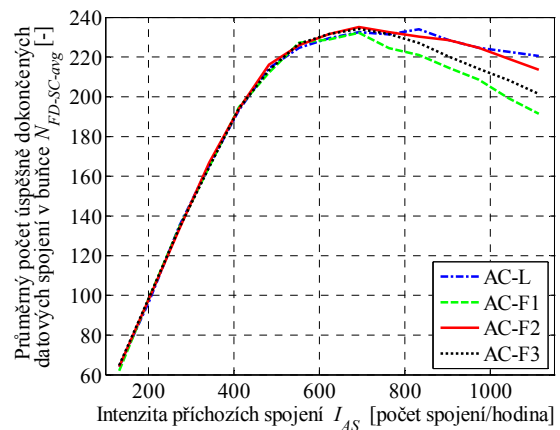
Obr. 4.15 Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy



Obr. 4.16 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



Obr. 4.17 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce

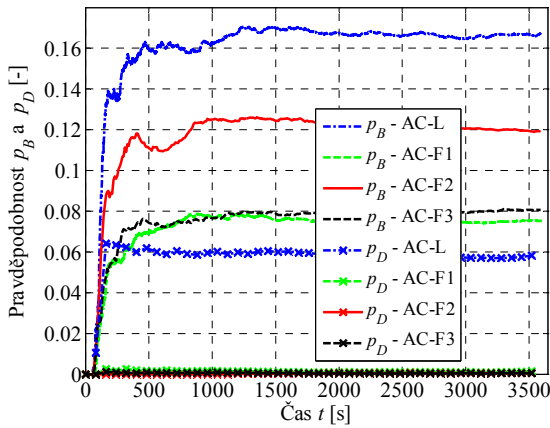


Obr. 4.18 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

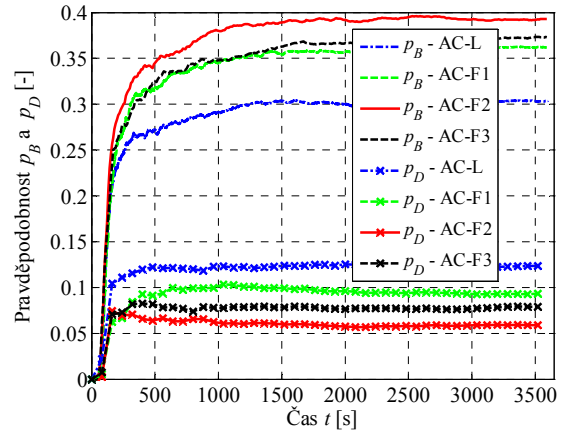
### Simulace pro konstantní intenzitu příchozích spojení

Na Obr. 4.19 až Obr. 4.25 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3 pro konstantní hodnotu intenzity příchozích spojení  $I_{AS} = 800$  spojení/hodinu, doba simulace  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 6$ . Rozhodovací prahy pro jednotlivé algoritmy jsou stejné jako u předchozí simulace. Hodnoty na konci

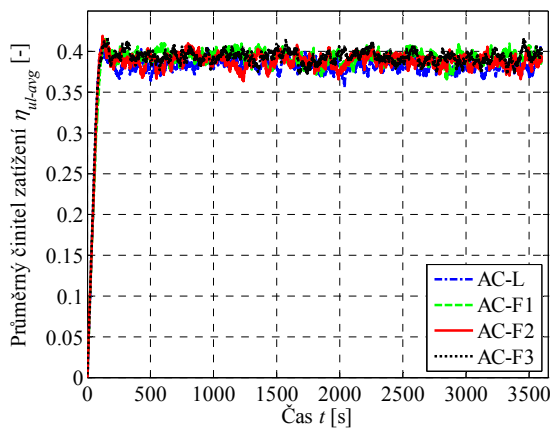
simulace (po ustálení) jsou postupně zobrazeny v ostatních simulacích. Hodnoty sledovaných veličin na konci simulací na Obr. 4.19 až Obr. 4.25 korespondují například s příslušnými hodnotami na Obr. 4.11 až Obr. 4.18. Kolísání hodnot  $p_B$  a  $p_D$  na Obr. 4.19 a Obr. 4.20 je způsobeno náhodným průběhem a vývojem simulací.



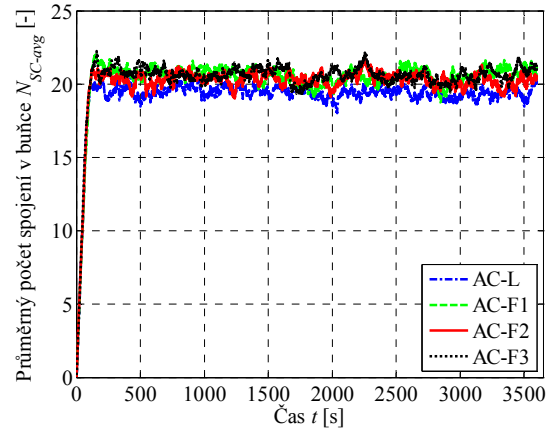
Obr. 4.19 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení



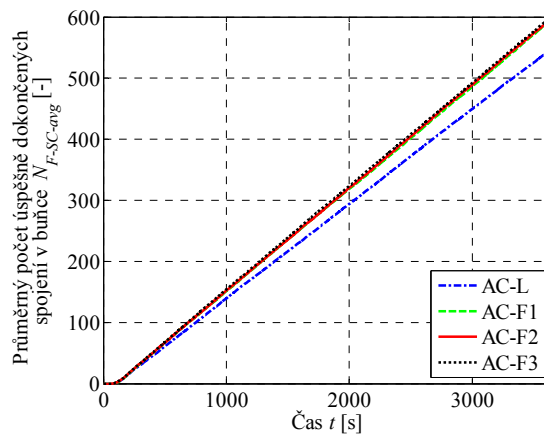
Obr. 4.20 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení



Obr. 4.21 Srovnání průměrných činitelů zatížení

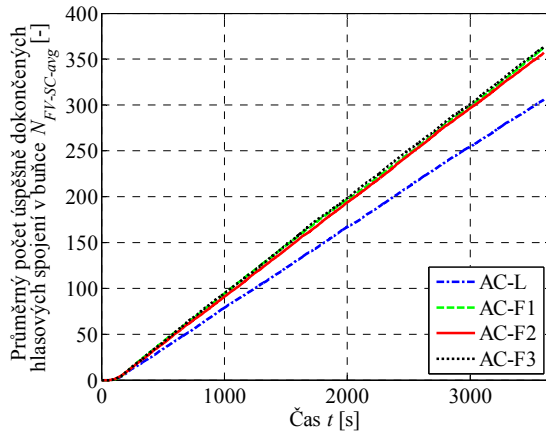


Obr. 4.22 Srovnání průměrného počtu spojení

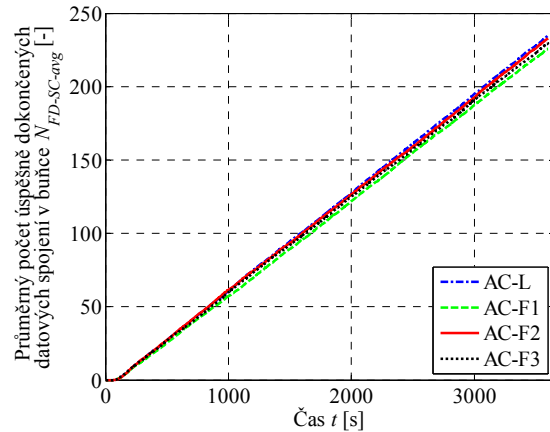


Obr. 4.23 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce





Obr. 4.24 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



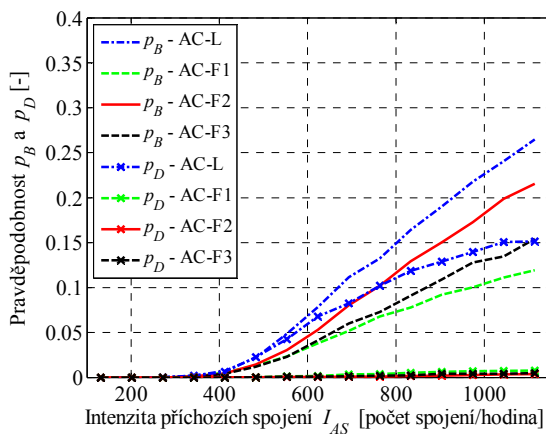
Obr. 4.25 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

### Simulace pro vyšší rychlost pohybu UEs

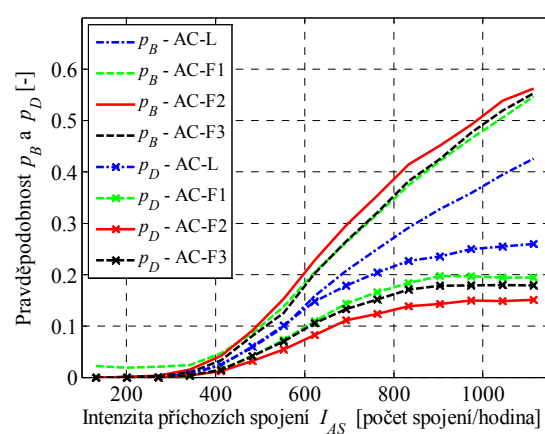
Na Obr. 4.26 a Obr. 4.27 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. Maximální rychlost pohybu UEs ( $SP_{max}$ ) byla u těchto simulací 100 km/h,  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ . Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F2,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-F3.

Hraniční body funkcí pro zpracování vstupních proměnných pro všechny fuzzy algoritmy pro  $SP$  (rychlost pohybu UEs) jsou:  $A = 35$  km/h,  $B = 70$  km/h,  $C = 98$  km/h (Tab. 4.1). Při srovnání simulací na Obr. 4.26, Obr. 4.27, Obr. 4.11 a Obr. 4.12 je patrné, že vyšší rychlost UEs způsobí nárůst  $p_D$  u všech algoritmů (častěji dochází k handoverům). Fuzzy algoritmy jsou však schopné udržet  $p_D$  hlasových spojení blízko nulové hodnoty. Rovněž u datových spojení je  $p_D$  u fuzzy algoritmů nižší než pro AC-L.



Obr. 4.26 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení,  $SP_{max} = 100$  km/h



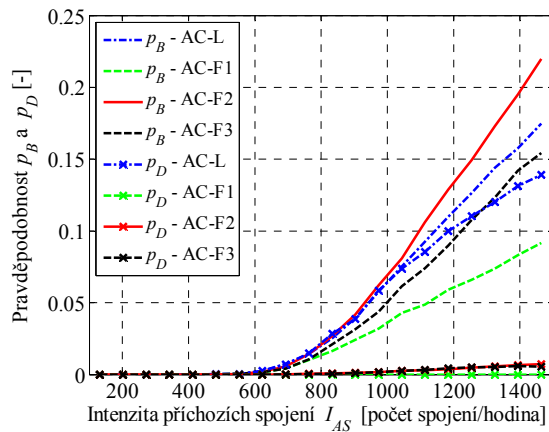
Obr. 4.27 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení,  $SP_{max} = 100$  km/h

### Simulace pro vyšší prahovou hodnotu činitele zatížení $\eta_{thr}$ v buňce

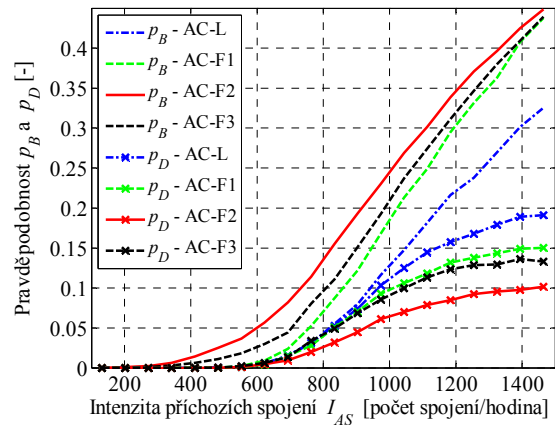
Na Obr. 4.28 až Obr. 4.35 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. V simulaci není uvažováno výkonové omezení UEs ani výkonové omezení Node Bs (ani omezení kvůli CIR). Maximální rychlost pohybu UEs ( $SP_{max}$ ) byla u těchto simulací 50 km/h, maximální prahová hodnota činitele zatížení  $\eta_{ul-thr} = \eta_{dl-thr} = 0,7$ ,  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ . Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,700$ ,  $F_{thr-DN} = 0,699$ ,  $F_{thr-VO} = 0,705$ ,  $F_{thr-DO} = 0,704$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F2,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-F3.

Hraniční body funkcí pro zpracování vstupních proměnných pro všechny fuzzy algoritmy pro  $\eta_{ul}$  (činitel zatížení) jsou:  $A = 0,55$ ,  $B = 0,65$ ,  $C = 0,70$ .

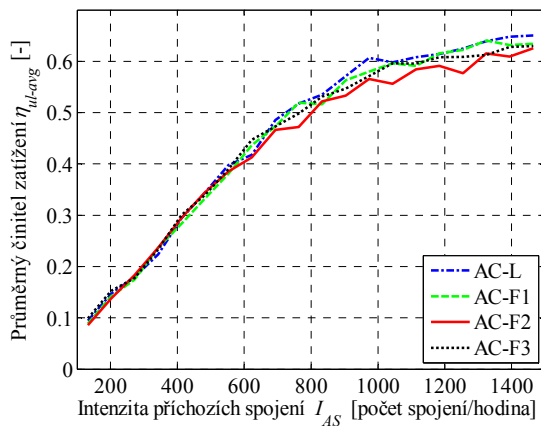


**Obr. 4.28** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení,  $\eta_{thr} = 0,7$

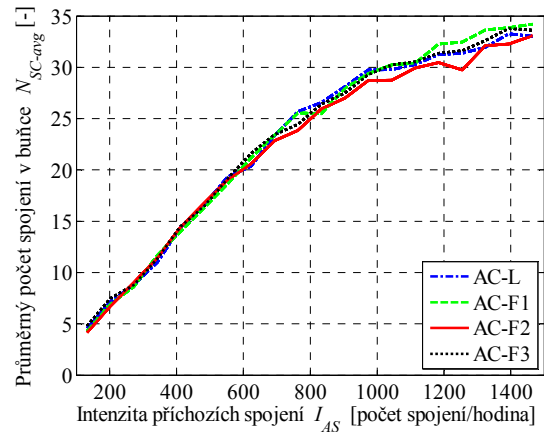


**Obr. 4.29** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení,  $\eta_{thr} = 0,7$

Při srovnání simulací na Obr. 4.28, Obr. 4.29, Obr. 4.11 a Obr. 4.12 je patrné, že  $p_B$  i  $p_D$  dosahují nižších hodnot (pro vyšší  $\eta_{thr}$ ). Důvodem je vyšší možný počet spojení v systému a zároveň stejný počet příchozích spojení (jako u simulací na Obr. 4.11 a Obr. 4.12). Průběhy obou pravděpodobností pro jednotlivé algoritmy jsou obdobné jako u předchozích simulací.

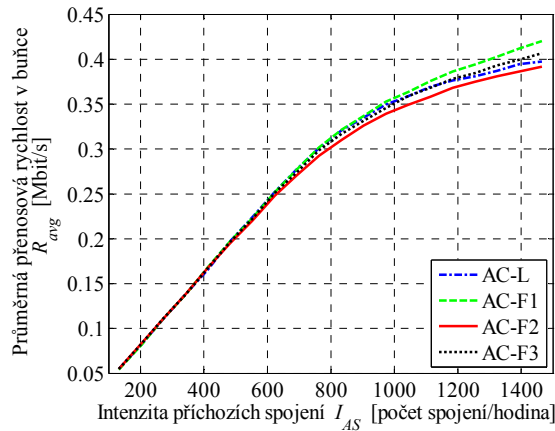


**Obr. 4.30** Srovnání průměrných činitelů zatížení

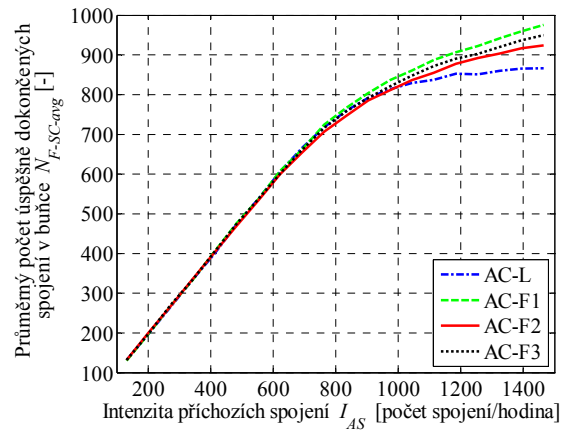


**Obr. 4.31** Srovnání průměrného počtu spojení

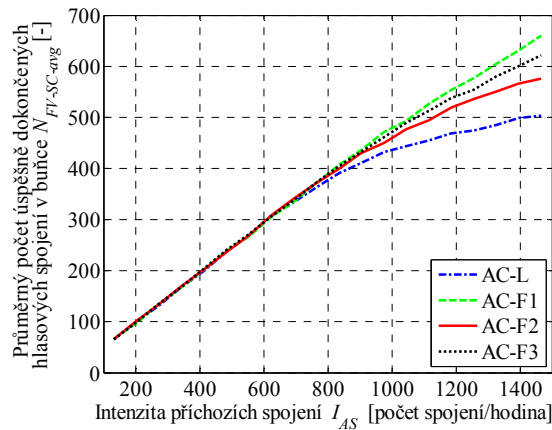
Výsledky na Obr. 4.30 až Obr. 4.35 korespondují s výsledky na Obr. 4.13 až Obr. 4.18. Sledované veličiny (počet spojení v buňce...) dosahují, dle předpokladu, vyšších hodnot, jejich průběh je však obdobný.



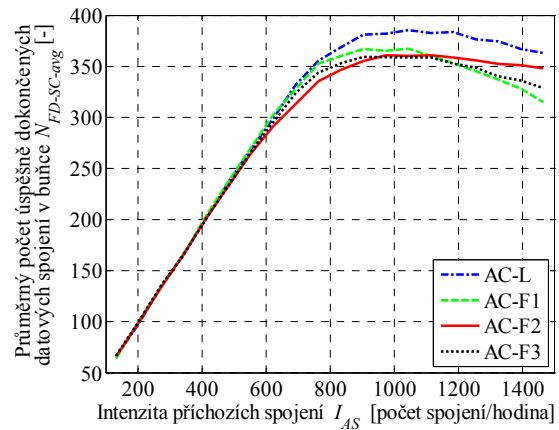
**Obr. 4.32** Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy



**Obr. 4.33** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



**Obr. 4.34** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



**Obr. 4.35** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

### Simulace pro převažující hlasová nebo datová spojení

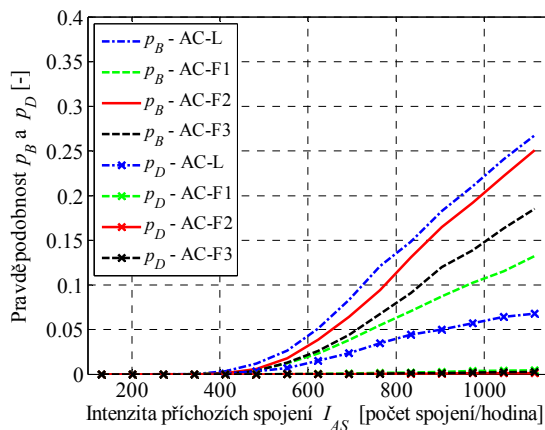
Na Obr. 4.36 až Obr. 4.53 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. Simulace srovnávají dvě situace - při převaze hlasových a při převaze datových spojení v systému. Maximální prahová hodnota činitele zatížení  $\eta_{thr} = 0,5$ ,  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ . Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F2,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-F3.

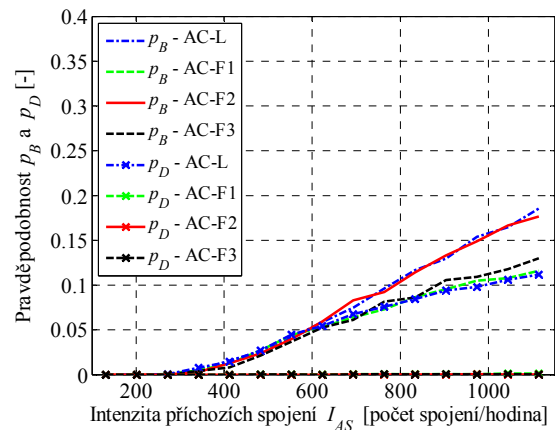
V případě převahy hlasových spojení byla generovaná spojení s pravděpodobností 0,75 hlasová, s pravděpodobností 0,25 datová. V případě převahy datových spojení byla generovaná spojení s pravděpodobností 0,25 hlasová a s pravděpodobností 0,75 datová.

Na Obr. 4.36 až Obr. 4.39 je srovnání  $p_B$  a  $p_D$  pro různé typy převládajících spojení. Na Obr. 4.40 a Obr. 4.41 je pro porovnání stav, kdy jsou hlasová a datová spojení generována se stejnou pravděpodobností (viz Obr. 4.11 a Obr. 4.12). Při srovnání simulací na Obr. 4.36, Obr. 4.38, Obr. 4.40 a Obr. 4.41 lze pozorovat změny  $p_B$  a  $p_D$  v případě převažujících hlasových spojení. Pro hlasová spojení dochází ke zvýšení  $p_B$  pro algoritmy AC-F1, AC-F2 a AC-F3. Hodnoty  $p_D$  jsou srovnatelné s Obr. 4.40. U algoritmu AC-L hodnoty  $p_B$  a  $p_D$  dokonce mírně poklesly. U datových spojení došlo k mírnému nárůstu  $p_D$  u všech algoritmů.

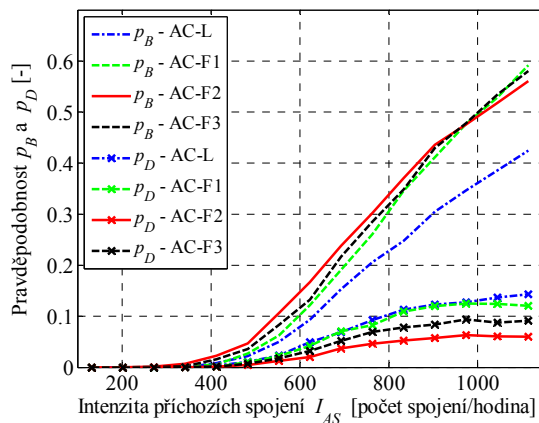
Při srovnání simulací na Obr. 4.37, Obr. 4.39, Obr. 4.40 a Obr. 4.41 lze pozorovat změny  $p_B$  a  $p_D$  v případě převažujících datových spojení. Pro hlasová spojení dochází k výraznému snížení  $p_B$  u všech algoritmů a zároveň k výraznému zvýšení  $p_D$  pro AC-L. U datových spojení dojde ke zvýšení  $p_B$  pro AC-L a mírnému snížení  $p_D$  pro AC-F.



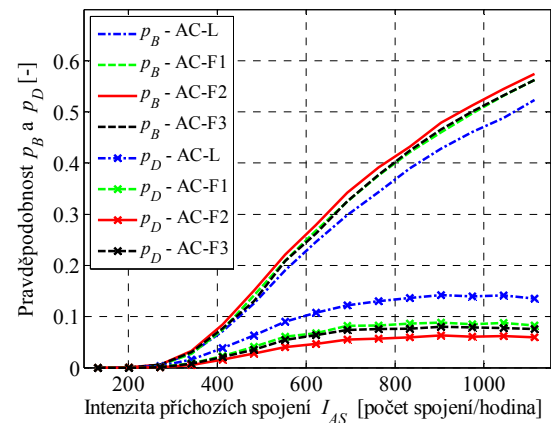
**Obr. 4.36** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – převaha hlasových spojení



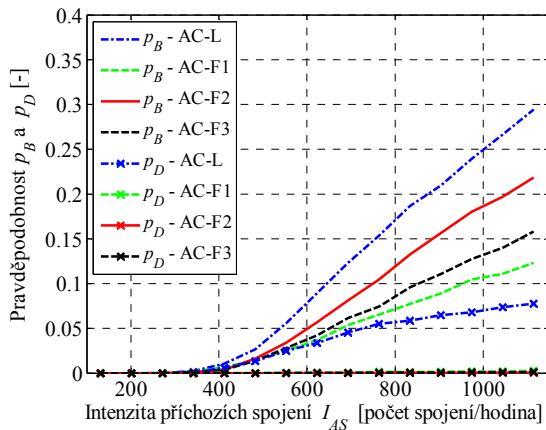
**Obr. 4.37** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – převaha datových spojení



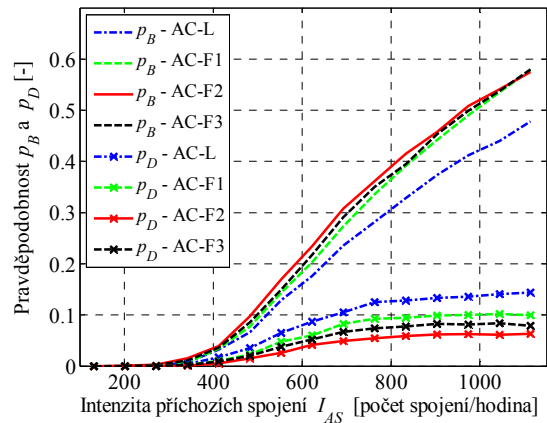
**Obr. 4.38** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – převaha hlasových spojení



**Obr. 4.39** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – převaha datových spojení

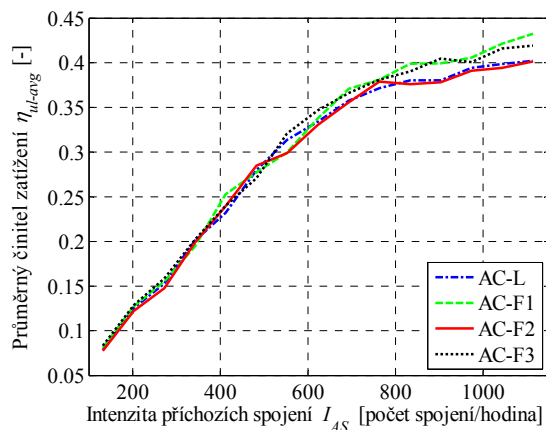


Obr. 4.40 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení

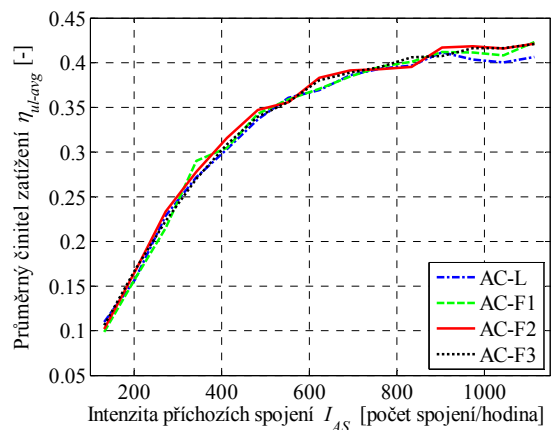


Obr. 4.41 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení

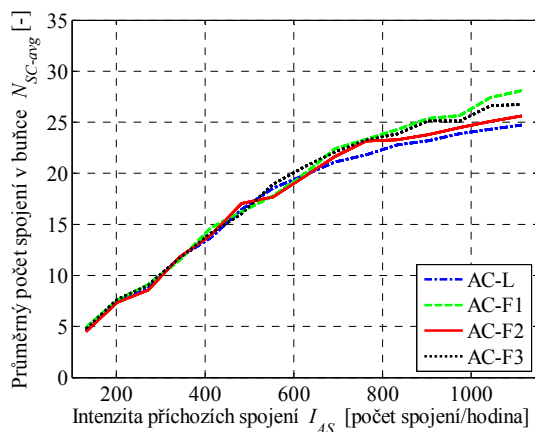
Na Obr. 4.42 až Obr. 4.53 jsou, mimo jiné, zobrazeny průměrné počty úspěšně dokončených spojení (v centrálních buňkách systému) pro jednotlivé algoritmy. Vzhledem k velkým rozdílům u některých grafů jsou použita různá měřítka (např. Obr. 4.50 a Obr. 4.51). Ze simulací je patrné, že v případě převahy datových spojení je celkový počet spojení v systému nižší (Obr. 4.45), než v případě převahy hlasových spojení (Obr. 4.44). Tato situace koresponduje s (2.15).



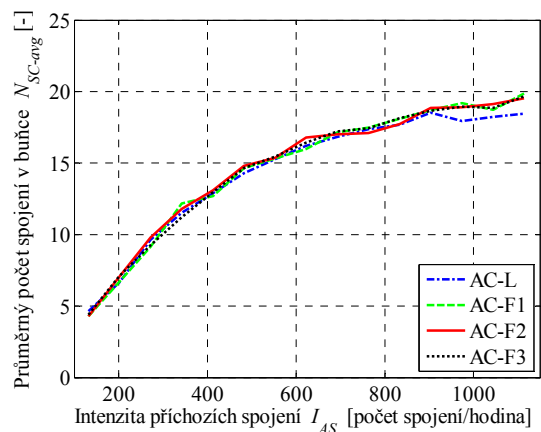
Obr. 4.42 Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha hlasových spojení



Obr. 4.43 Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha datových spojení

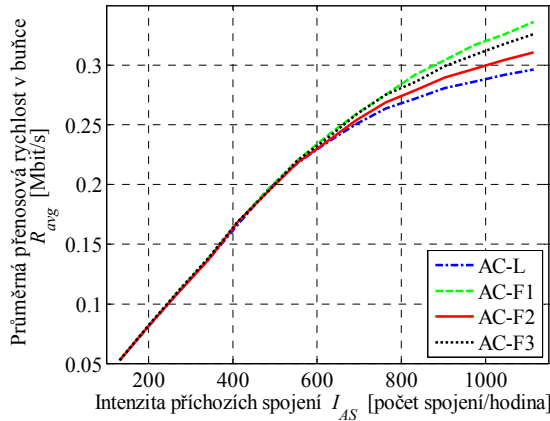


Obr. 4.44 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha hlasových spojení

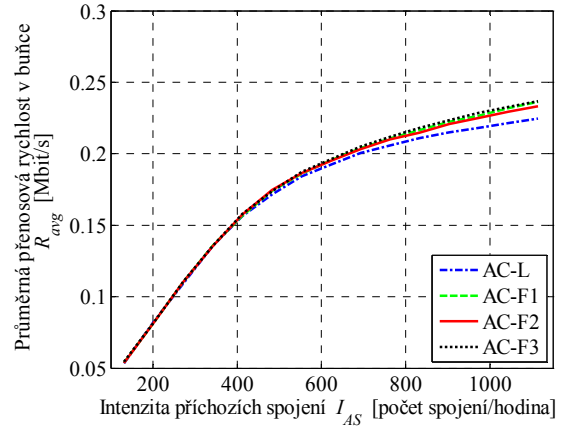


Obr. 4.45 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha datových spojení

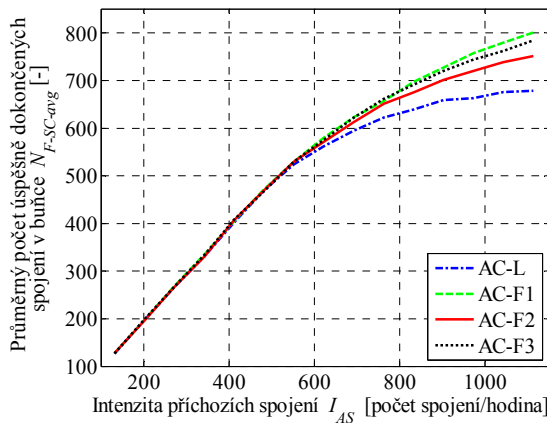
Na Obr. 4.48 až Obr. 4.53 jsou zobrazeny průměrné počty úspěšně dokončených spojení (v centrálních buňkách systému) pro jednotlivé algoritmy. Simulace odpovídají předpokladům, lze pozorovat měnící se počty spojení obou typů v systému pro oba případy. V případě převahy datových spojení (Obr. 4.53) vykazují fuzzy algoritmy větší počet úspěšně dokončených datových spojení než AC-L.



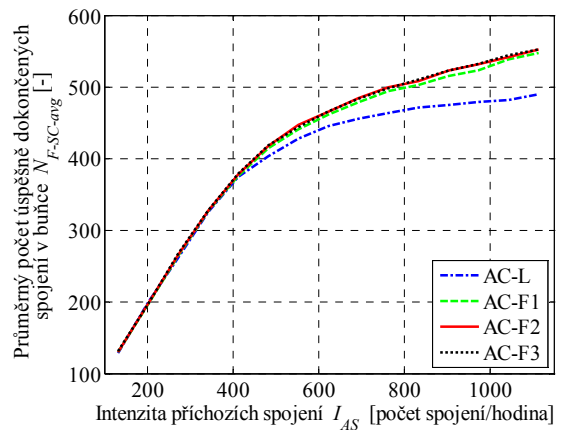
Obr. 4.46 Srovnání průměrných přenosových rychlostí – převaha hlasových spojení



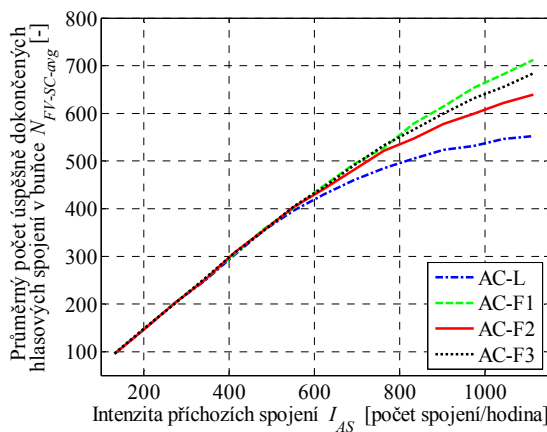
Obr. 4.47 Srovnání průměrných přenosových rychlostí – převaha datových spojení



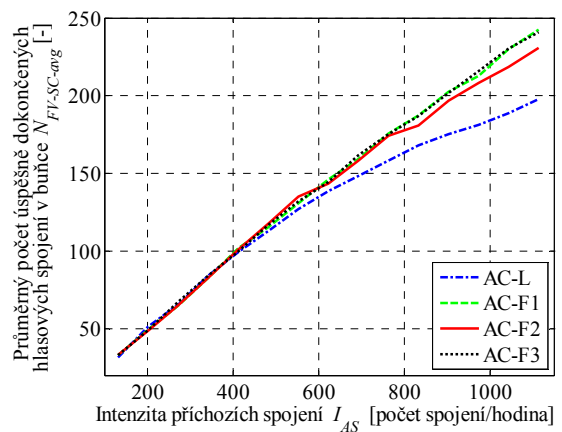
Obr. 4.48 Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha hlasových spojení



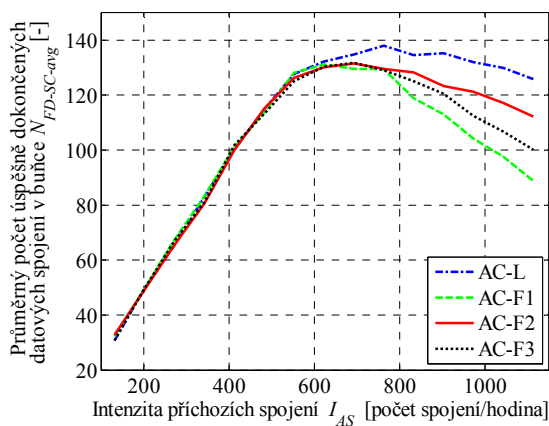
Obr. 4.49 Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha datových spojení



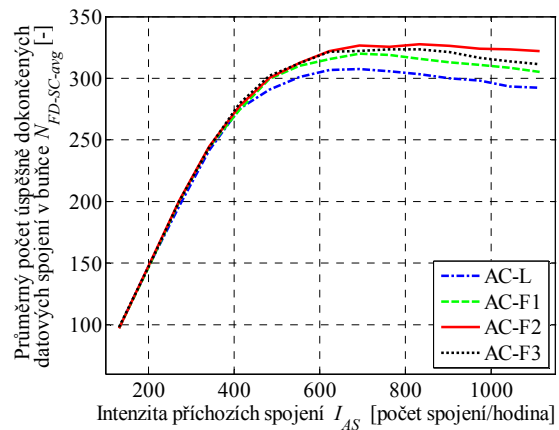
Obr. 4.50 Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha hlasových spojení



Obr. 4.51 Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha datových spojení



Obr. 4.52 Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha hlasových spojení



Obr. 4.53 Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha datových spojení

### Simulace pro extrémní počet příchozích spojení

Následující simulace na Obr. 4.54 až Obr. 4.67 srovnávají algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. Intenzita příchozích spojení (počet žádostí o nová spojení) nabývá extrémně vysokých hodnot,  $I_{AS-max} = 7150$  spojení/hodina. Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 3$ . Simulace byly provedeny bez omezení výkonu a CIR. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F2,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-F3.

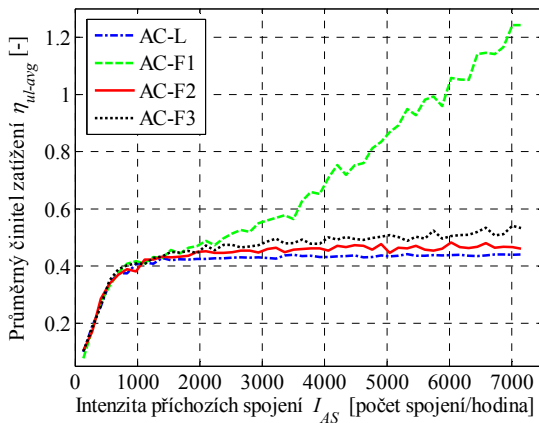
Výsledky simulací pro výše uvedené nastavení algoritmů jsou na Obr. 4.54, Obr. 4.56 až Obr. 4.66 (levý sloupec). Ze simulací (Obr. 4.54) je patrné, že při vysokých hodnotách  $I_{AS}$  nabývají hodnoty  $\eta_{ul}$  pro fuzzy algoritmy vyšších hodnot. Pro algoritmus AC-F1 je tento nárůst nejvýraznější. Porovnáním Obr. 4.64 a Obr. 4.66 lze odhadnout, že tento nárůst je zřejmě způsoben nastavením různých priorit pro hlasová a datová spojení. Fuzzy algoritmy (zejména AC-F1) výrazně omezují počet datových spojení v systému (Obr. 4.66), zároveň ale nedochází k omezování počtu hlasových spojení (Obr. 4.64). Tento stav se odráží také na hodnotách  $p_B$  a  $p_D$  (Obr. 4.56 a Obr. 4.58). U datových spojení (Obr. 4.58) klesá hodnota  $p_D$  k nule (v systému je málo spojení, tedy i malý počet přerušených spojení), zároveň velmi narůstá hodnota  $p_B$  (nová datová spojení jsou odmítána). V případě hlasových spojení (Obr. 4.56) rovněž klesá hodnota  $p_D$  k nule (na Obr. 4.56 se překrývá s hodnotami  $p_D$  pro AC-F2 a AC-F3). V tomto případě je v systému velké množství existujících hlasových spojení, která však nejsou přerušována. Hodnota  $p_B$  (Obr. 4.56) dosahuje také nízkých hodnot. Důvodem je špatná regulace a neomezování spojení v systému.

Pro správnou činnost algoritmů v případě extrémního počtu příchozích žádostí o spojení byly fuzzy algoritmy upraveny níže popsáním způsobem. Po překročení zvolené hodnoty  $\eta_{ul-thr}$  byly rozhodovací prahy zvýšeny o hodnotu  $\Delta F_{thr-V}$  pro hlasová spojení (nová i již existující) a o hodnotu  $\Delta F_{thr-D}$  pro datová spojení (nová i již existující):

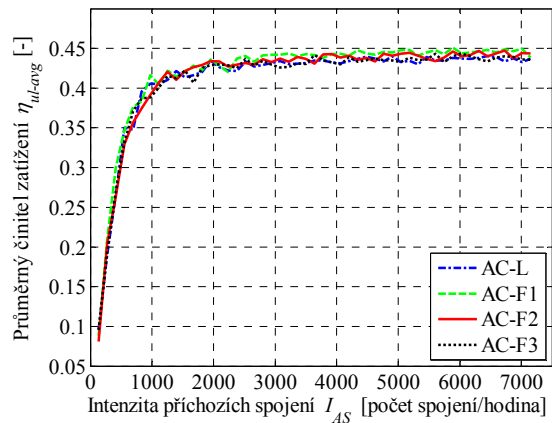
- AC-L – beze změny,

- $\eta_{ul-thr} = 0,425$ ,  $\Delta F_{thr-V} = 0,17$ ,  $\Delta F_{thr-D} = 0,38$  pro AC-F1,
- $\eta_{ul-thr} = 0,425$ ,  $\Delta F_{thr-V} = 0,17$ ,  $\Delta F_{thr-D} = 0,38$  pro AC-F2,
- $\eta_{ul-thr} = 0,420$ ,  $\Delta F_{thr-V} = 0,17$ ,  $\Delta F_{thr-D} = 0,38$  pro AC-F3.

Výsledky simulací s danou úpravou jsou na Obr. 4.55, Obr. 4.57 až Obr. 4.67 (pravý sloupec). Výše popsaná jednoduchá úprava algoritmů zajistí požadovanou limitní hodnotu  $\eta_{ul}$  (Obr. 4.55) i pro případ extrémního počtu příchozích žádostí o spojení.

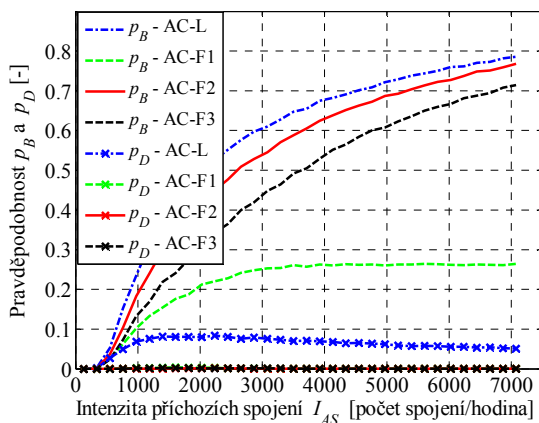


Obr. 4.54 Srovnání průměrných činitelů zatížení – bez použití  $\Delta F_{thr}$

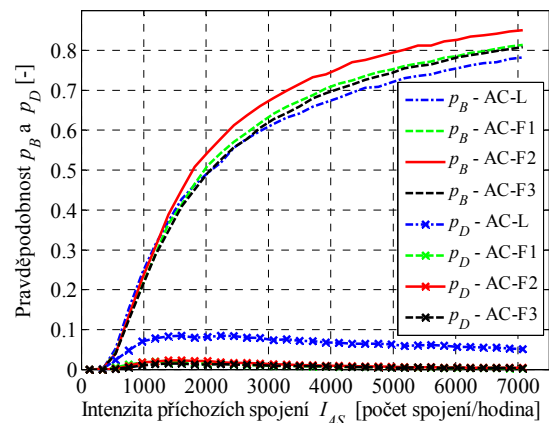


Obr. 4.55 Srovnání průměrných činitelů zatížení – s použitím  $\Delta F_{thr}$

Na Obr. 4.57 a Obr. 4.59 jsou znázorněny závislosti  $p_B$  a  $p_D$  pro upravené algoritmy. Průběh (pokles)  $p_D$  na Obr. 4.59 koresponduje s průběhem na Obr. 4.67 (klesá počet datových spojení v systému). Pro upravené fuzzy algoritmy se u datových spojení (Obr. 4.59) snížila  $p_B$  a mírně zvýšila  $p_D$  (spojení přestala být odmítána a v systému je jich větší počet). U hlasových spojení (Obr. 4.57) se zvýšila  $p_B$  (hlasová spojení začala být částečně odmítána).

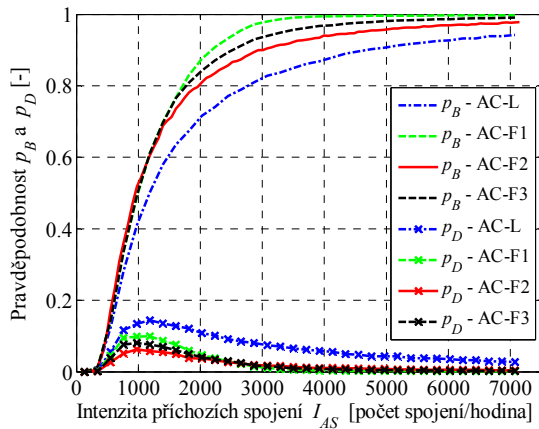


Obr. 4.56 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – bez použití  $\Delta F_{thr}$

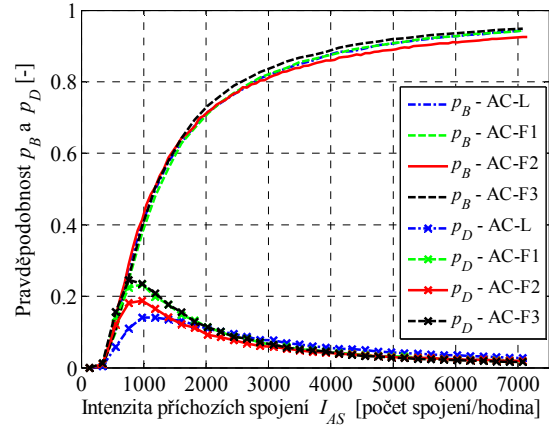


Obr. 4.57 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – s použitím  $\Delta F_{thr}$

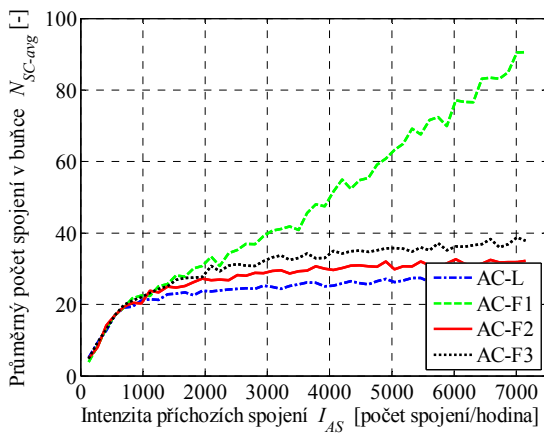




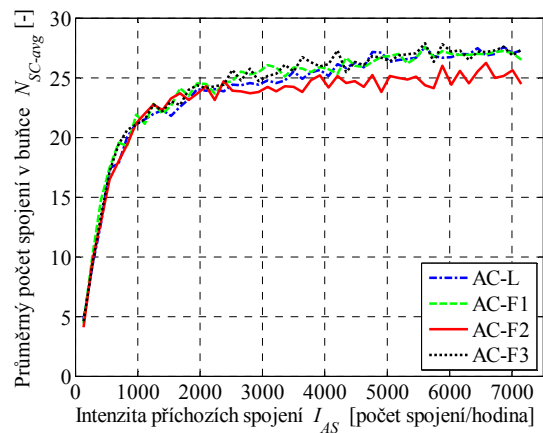
Obr. 4.58 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – bez použití  $\Delta F_{thr}$



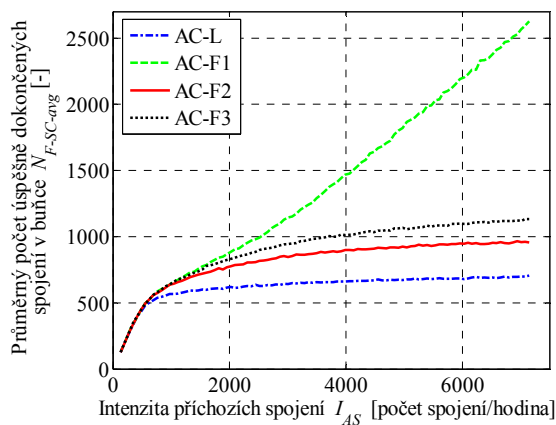
Obr. 4.59 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – s použitím  $\Delta F_{thr}$



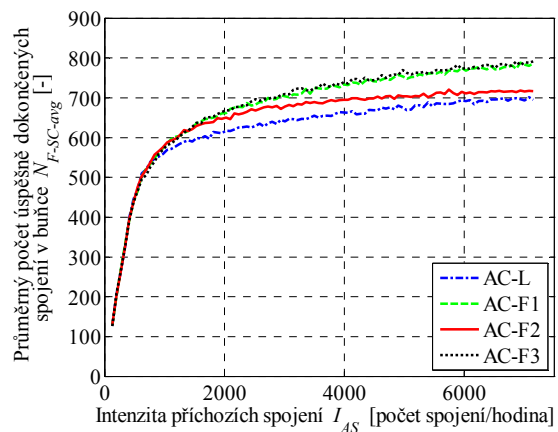
Obr. 4.60 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – bez použití  $\Delta F_{thr}$



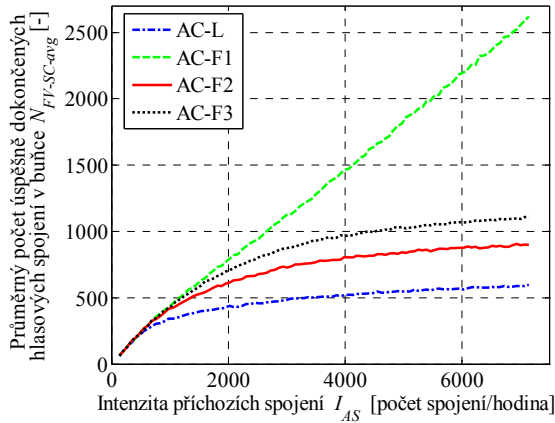
Obr. 4.61 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – s použitím  $\Delta F_{thr}$



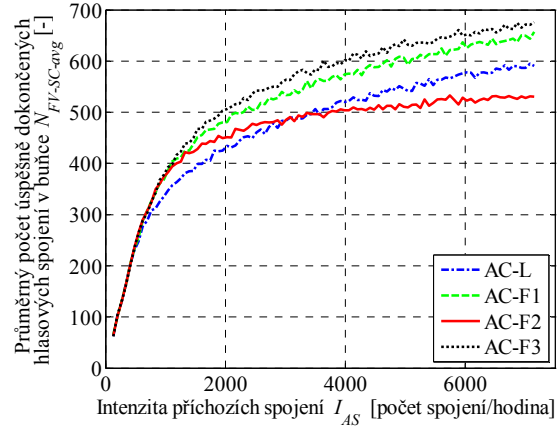
Obr. 4.62 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – bez použití  $\Delta F_{thr}$



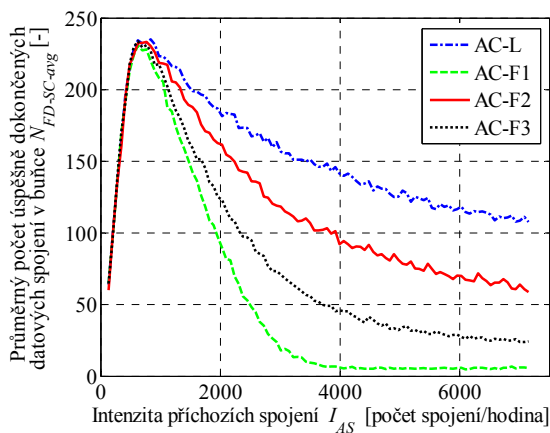
Obr. 4.63 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – s použitím  $\Delta F_{thr}$



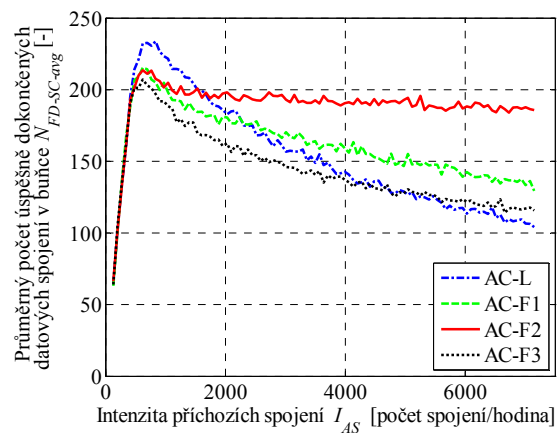
**Obr. 4.64** Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – bez použití  $\Delta F_{thr}$



**Obr. 4.65** Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – s použitím  $\Delta F_{thr}$



**Obr. 4.66** Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – bez použití  $\Delta F_{thr}$



**Obr. 4.67** Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – s použitím  $\Delta F_{thr}$

### Simulace pro čtyři typy spojení

Následující simulace na Obr. 4.68 až Obr. 4.78 ukazují možné rozšíření a použití algoritmů AC-L, AC-F1 a AC-F2 pro větší počet různých typů spojení v systému. U algoritmu AC-F2 byla místo vstupní proměnné  $N_N$  (počet uživatelů v blízkém okolí buňky) použita přenosová rychlost spojení  $R_{bit}$ . Hraníční body pro tuto proměnnou byly zvoleny:  $A = 32,0$  kb/s a  $B = 128,0$  kb/s (viz Tab. 4.1).

Provedené simulace slouží jako příklad možného rozšíření algoritmů i modelu UMTS systému. Obdobným způsobem lze rozšířit také ostatní algoritmy. Simulace pro větší počet různých typů spojení jsou však časově náročné. Pro spojení s vyššími přenosovými rychlostmi značně klesá, dle (2.15), kapacita buňky (spojení s vyššími rychlostmi je v buňce malý počet). Tento stav se pak odráží na výraznějším kolísání některých zkoumaných hodnot (např.  $\eta_{ul}$ , Obr. 4.72) vlivem náhodných jevů (generování spojení, jejich typ, pohyb UEs, atd.) v simulačním programu.

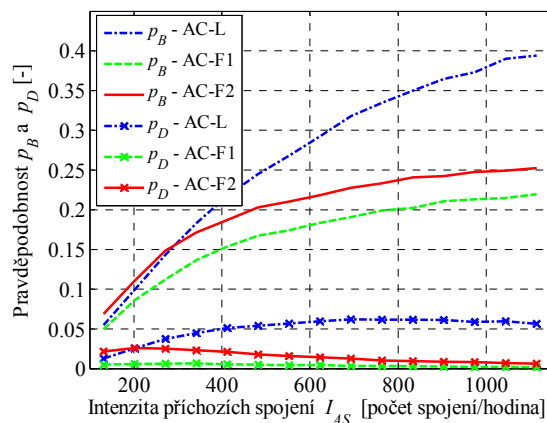
V simulaci byly jako příklad uvažovány 4 typy spojení s následujícími přenosovými rychlostmi a faktory aktivity:  $R_{bit1} = 12,2$  kb/s,  $v_{f1} = 0,5$  (hlasová spojení, nejvyšší priorita),  $R_{bit2} = 64,0$  kb/s,  $v_{f2} = 1,0$  (videohovor, vysoká priorita),  $R_{bit3} = 32,0$  kb/s,  $v_{f3} = 1,0$  (datová spojení, malá priorita),  $R_{bit4} = 128,0$  kb/s,  $v_{f4} = 1,0$  (datová spojení, malá priorita), viz [38]. Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} =$

200 ms,  $N_{sim} = 50$ . Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy (jednotlivé třídy jsou rozlišeny pomocí číselných hodnot příslušných bitových rychlostí bez jednotky):

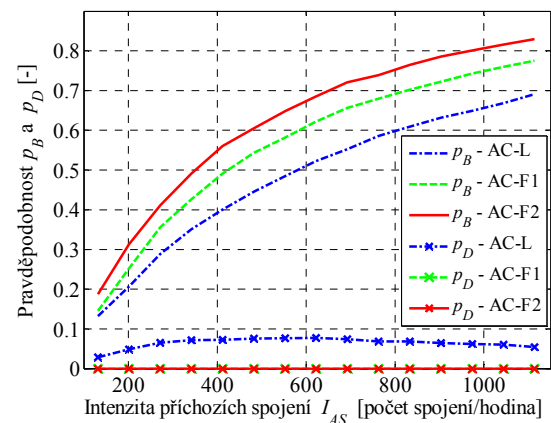
- $F_{thr-V(12,2)N} = 0,52$ ,  $F_{thr-V(64,0)N} = 0,55$ ,  $F_{thr-D(32,0)N} = 0,50$ ,  $F_{thr-D(128,0)N} = 0,55$ ,  
 $F_{thr-V(12,2)O} = 0,68$ ,  $F_{thr-V(64,0)O} = 0,65$ ,  $F_{thr-D(32,0)O} = 0,60$ ,  $F_{thr-D(128,0)O} = 0,50$  pro AC-L,
- $F_{thr-V(12,2)N} = 0,53$ ,  $F_{thr-V(64,0)N} = 0,20$ ,  $F_{thr-D(32,0)N} = 0,25$ ,  $F_{thr-D(128,0)N} = 0,65$ ,  
 $F_{thr-V(12,2)O} = 0,23$ ,  $F_{thr-V(64,0)O} = 0,00$ ,  $F_{thr-D(32,0)O} = 0,06$ ,  $F_{thr-D(128,0)O} = 0,10$   
 pro AC-F1,
- $F_{thr-V(12,2)N} = 0,57$ ,  $F_{thr-V(64,0)N} = 0,20$ ,  $F_{thr-D(32,0)N} = 0,20$ ,  $F_{thr-D(128,0)N} = 0,20$ ,  
 $F_{thr-V(12,2)O} = 0,32$ ,  $F_{thr-V(64,0)O} = -0,05$ ,  $F_{thr-D(32,0)O} = -0,05$ ,  $F_{thr-D(128,0)O} = -0,05$   
 pro AC-F2.

Generovaná spojení byla s pravděpodobností 0,50 hlasového charakteru, s pravděpodobností cca 0,16 videohovory ( $R_{bit2} = 64,0$  kb/s), s pravděpodobností cca 0,16 datová spojení ( $R_{bit3} = 32,0$  kb/s) a s pravděpodobností cca 0,16 datová spojení ( $R_{bit4} = 128,0$  kb/s).

Na Obr. 4.68 až Obr. 4.71 je srovnání  $p_B$  a  $p_D$  pro různé typy spojení. U hlasových spojení (Obr. 4.68) dosáhly oba fuzzy algoritmy výrazně nižších hodnot  $p_B$  a  $p_D$  než AC-L. Pro ostatní spojení dosahují fuzzy algoritmy nižších hodnot  $p_D$  a vyšších (srovnatelných) hodnot  $p_B$ . Pro spojení s vyšší prioritou (Obr. 4.68 a Obr. 4.69) se podařilo dosáhnout zejména nižších hodnot  $p_D$ .



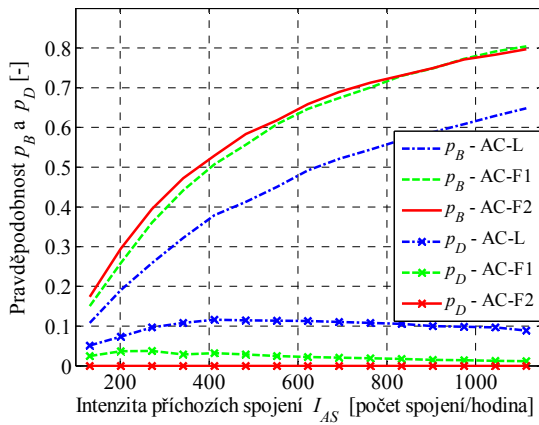
**Obr. 4.68** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení ( $R_{bit1} = 12,2$  kb/s)



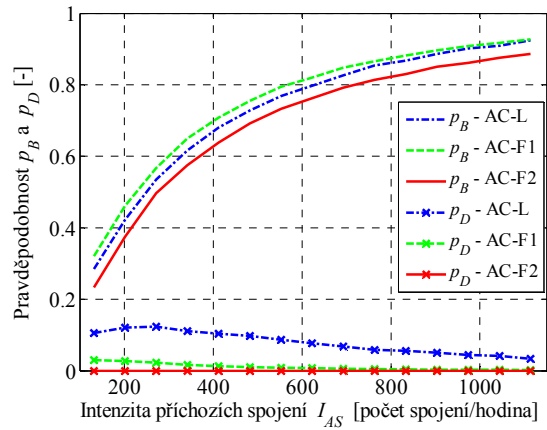
**Obr. 4.69** Srovnání několika fuzzy algoritmů pro videohovory ( $R_{bit2} = 64,0$  kb/s)

Na Obr. 4.72 je srovnání průměrných hodnot činitelů zatížení pro uplink. Všechny algoritmy dosahují srovnatelných hodnot. Na Obr. 4.73 je znázorněn průměrný počet spojení v buňce. Jejich počet je nižší než např. na Obr. 4.14. Tato situace koresponduje s (2.15).

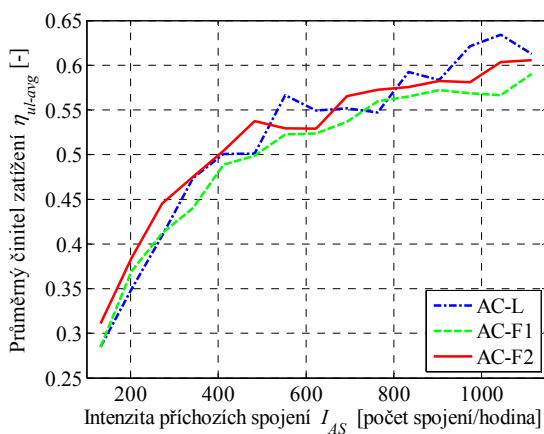
Na Obr. 4.74 až Obr. 4.78 jsou zobrazeny průměrné počty dokončených spojení v buňce. Největší počet spojení v systému je pro hlasová spojení ( $R_{bit1} = 12,2$  kb/s). Videohovory ( $R_{bit2} = 64,0$  kb/s) a datová spojení ( $R_{bit3} = 32,0$  kb/s) jsou zastoupeny v přibližně stejném počtu (Obr. 4.76 a Obr. 4.77). Datových spojení ( $R_{bit4} = 128$  kb/s) je v systému nejméně.



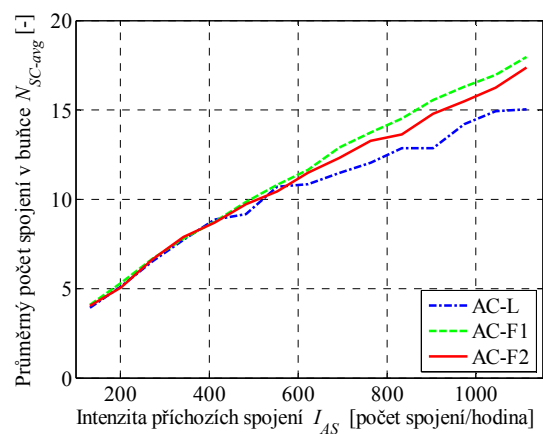
Obr. 4.70 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení ( $R_{bit3} = 32,0$  kb/s)



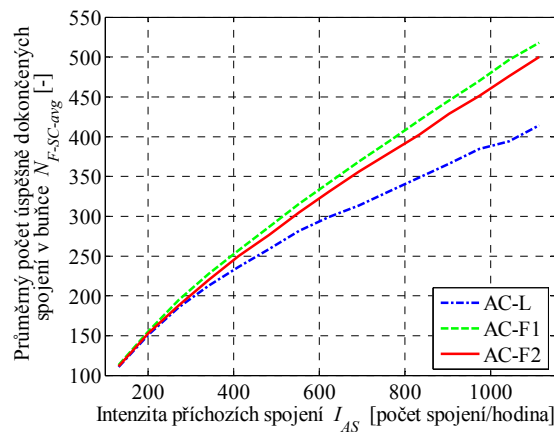
Obr. 4.71 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení ( $R_{bit4} = 128,0$  kb/s)



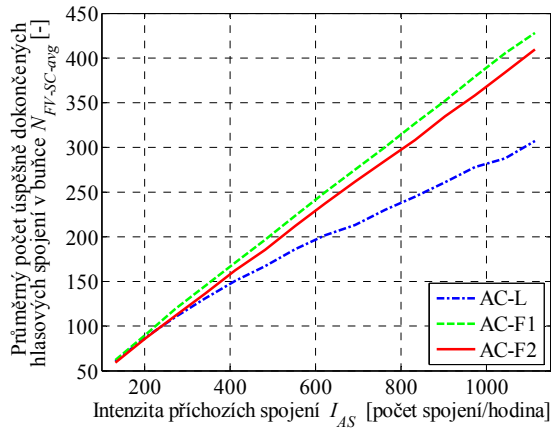
Obr. 4.72 Srovnání průměrných činitelů zatížení



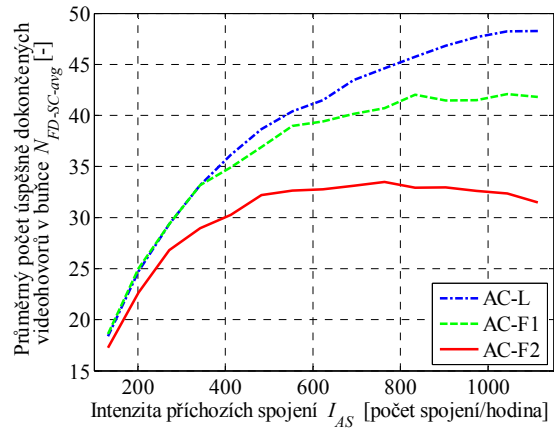
Obr. 4.73 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce



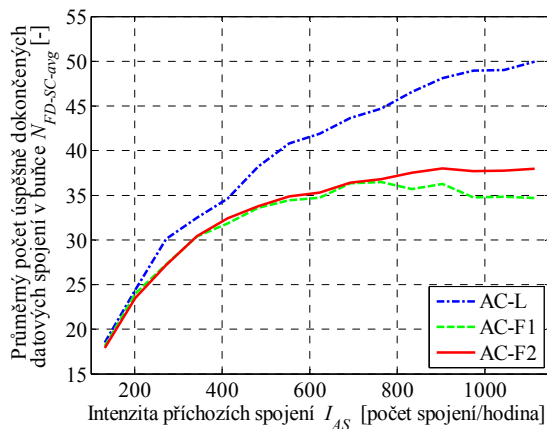
Obr. 4.74 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



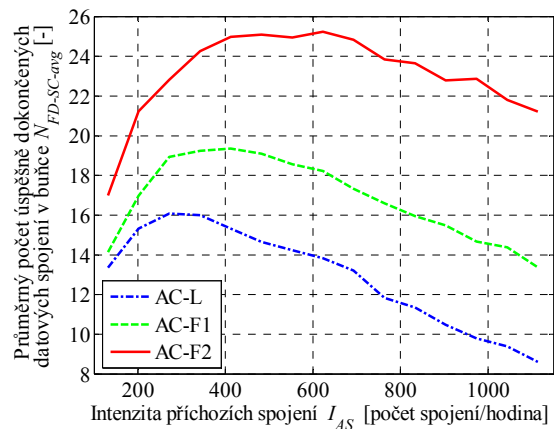
Obr. 4.75 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



Obr. 4.76 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených videohovorů v buňce



Obr. 4.77 Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce ( $R_{bit3} = 32,0$  kb/s)



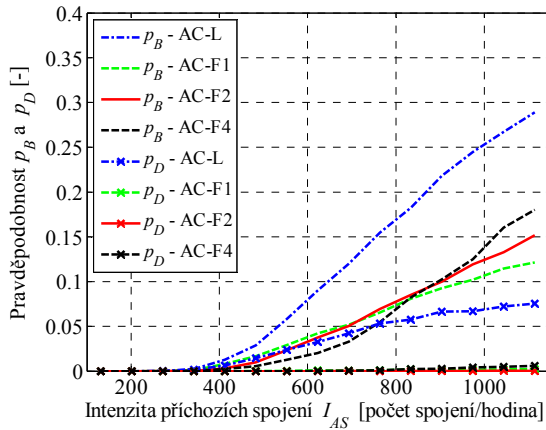
Obr. 4.78 Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce ( $R_{bit4} = 128,0$  kb/s)

#### 4.1.4 Srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F4

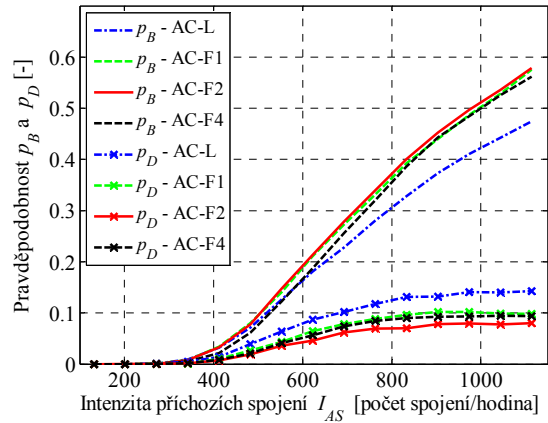
Na Obr. 4.79 až Obr. 4.86 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F4. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F2,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-F4.

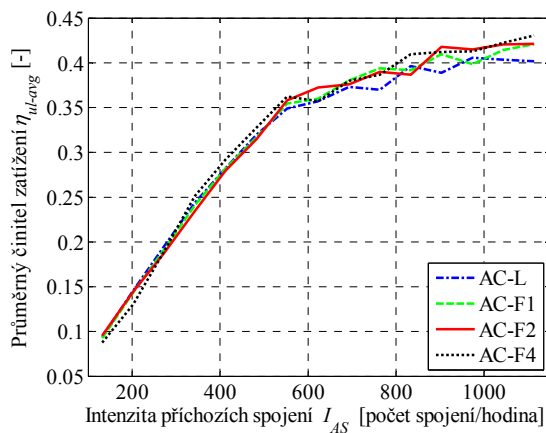
Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ . Algoritmus AC-F4 dosahuje výsledků, které jsou srovnatelné např. s AC-F2. Pravděpodobnost  $p_B$  pro hlasová spojení (pro AC-F4) na Obr. 4.79 však s rostoucí intenzitou příchozích spojení strmě narůstá (narůstá průměrný činitel zatížení  $\eta_{ul-A}$  v okolních šesti buňkách, který je algoritmem používán pro rozhodování). Ostatní výsledky korespondují s kapitolou 4.1.3.



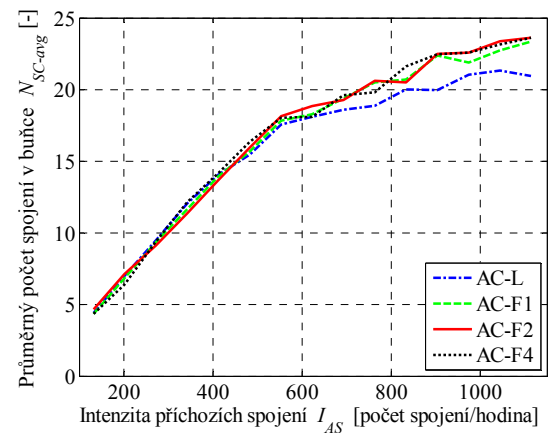
Obr. 4.79 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení



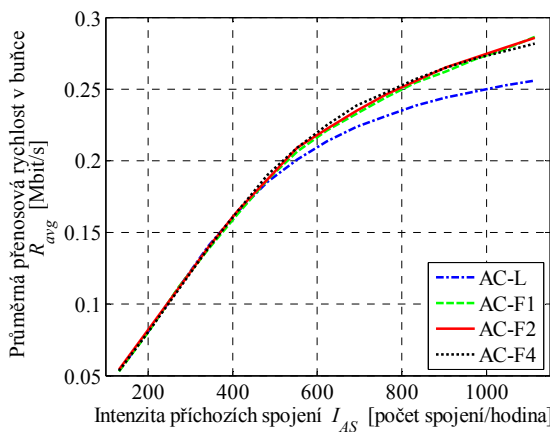
Obr. 4.80 Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení



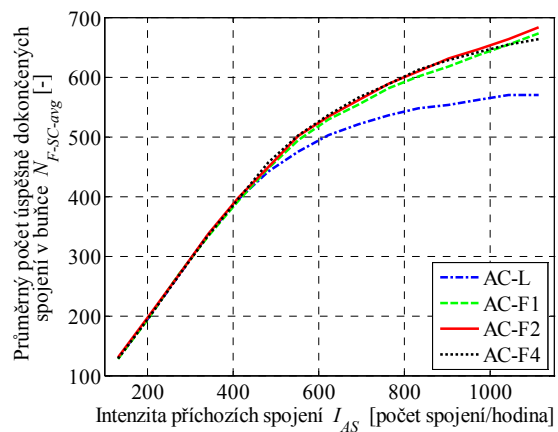
Obr. 4.81 Srovnání průměrných činitelů zatížení



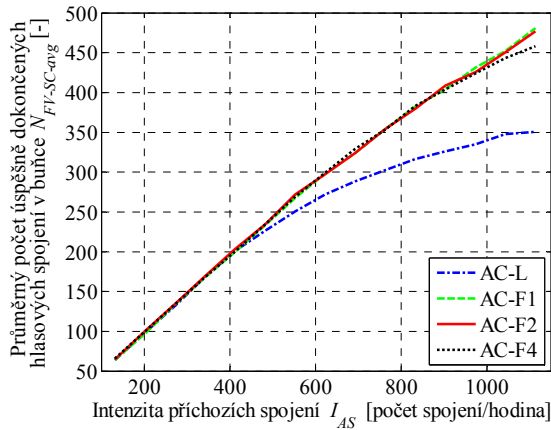
Obr. 4.82 Srovnání průměrného počtu spojení



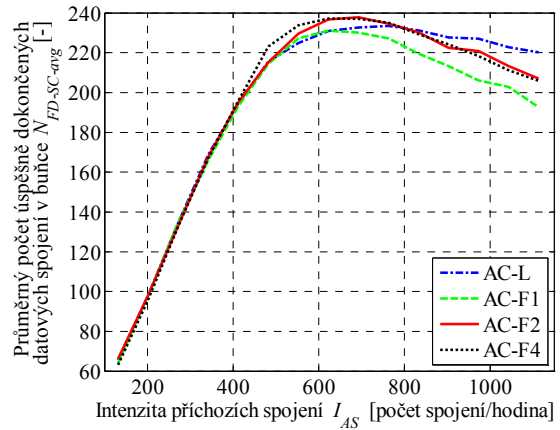
Obr. 4.83 Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy



Obr. 4.84 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



Obr. 4.85 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



Obr. 4.86 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

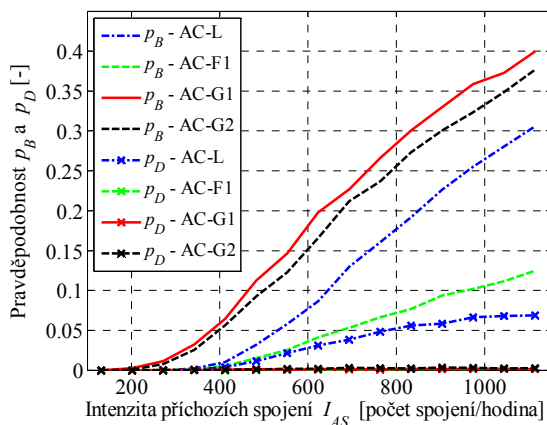
## 4.2 Simulace genetických algoritmů

V kapitole 3.3 je vysvětlen princip činnosti dvou genetických AC algoritmů. Jsou zde také uvedeny některé parametry, které byly použity v níže uvedených simulacích.

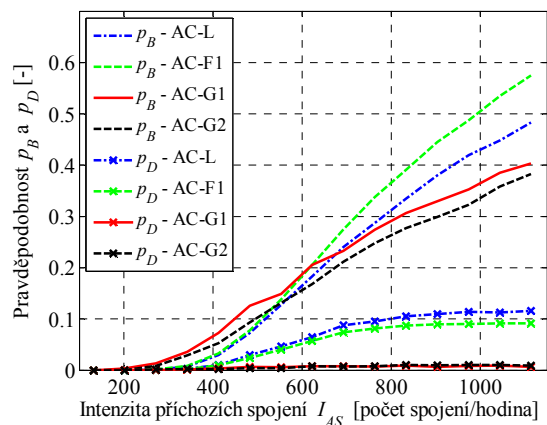
### 4.2.1 Srovnání algoritmů AC-L, AC-F1, AC-G1 a AC-G2

Na Obr. 4.87 až Obr. 4.102 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-G1, AC-G2 a také algoritmy AC-L a AC-F1. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy:

- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $a_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_2 = 8 \cdot 10^{-4}$  pro AC-G1,
- $a_1 = 20$ ,  $a_2 = 1000$ ,  $a_3 = 10$ ,  $a_4 = 20$ ,  $f(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) = 1$  pro  $(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) > -0,1$  a  $f(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) = 0$  pro  $(\eta_{ul-thr} - \eta_{ul,i}) \leq -0,1$  pro AC-G2.



Obr. 4.87 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení



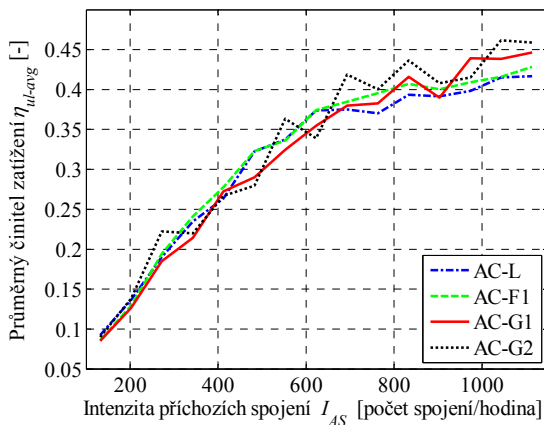
Obr. 4.88 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení

Algoritmus AC-G1 využíval 1 generaci s 10 potomky, AC-G2 využíval 2 generace s 30 potomky (z důvodu zkrácení simulace - větší počet potomků a generací výsledky

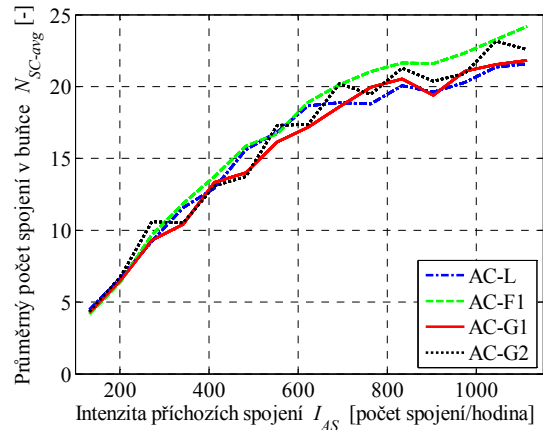
zásadně neovlivnil, ale výrazně prodloužil dobu simulace). Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 2$  s,  $N_{sim} = 10$ .

Ze simulací na Obr. 4.87 a Obr. 4.88 je patrné, že oba genetické algoritmy umožňují dosáhnout nízkých hodnot  $p_D$  a v případě datových spojení i nízkých hodnot  $p_B$ .

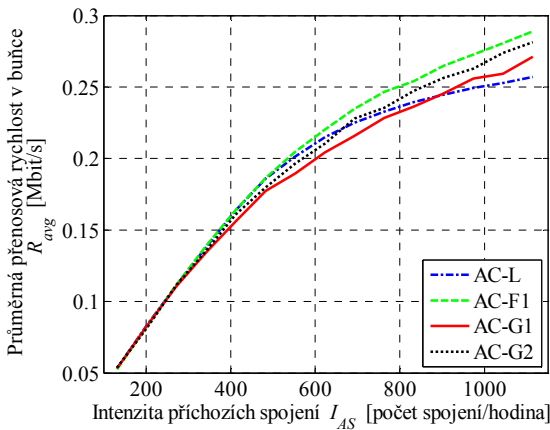
Na Obr. 4.89 až Obr. 4.94 je srovnání činitelů zatížení, srovnání počtu spojení v buňkách a srovnání přenosových rychlostí pro všechny algoritmy. Ze simulací lze např. pozorovat, že přestože má AC-G2 nejvyšší dosažený  $\eta_{ul}$  (Obr. 4.89), průměrný počet spojení v buňce (Obr. 4.90) i průměrná přenosová rychlost (Obr. 4.91) je největší pro AC-F1. Při porovnání Obr. 4.93 a Obr. 4.94 lze pozorovat, že oba genetické algoritmy preferují spíše datová spojení.



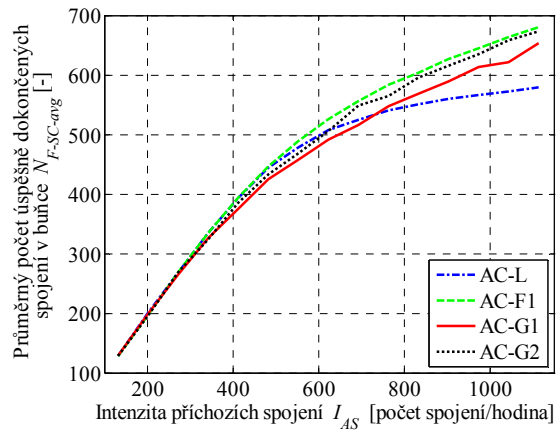
Obr. 4.89 Srovnání průměrných činitelů zatížení



Obr. 4.90 Srovnání průměrného počtu spojení

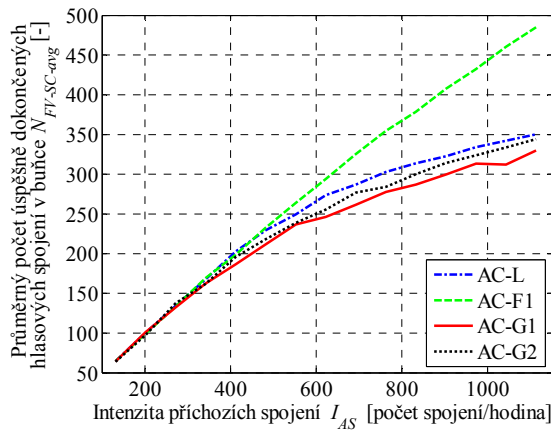


Obr. 4.91 Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy

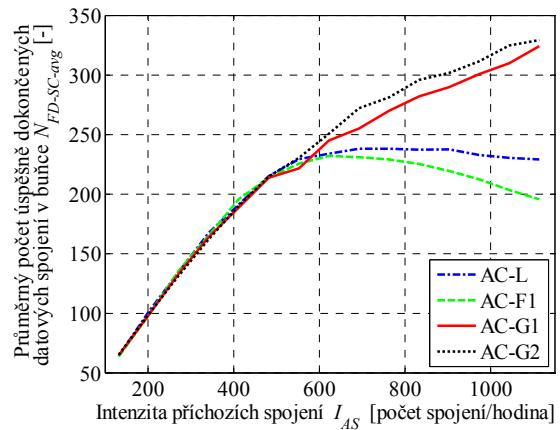


Obr. 4.92 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



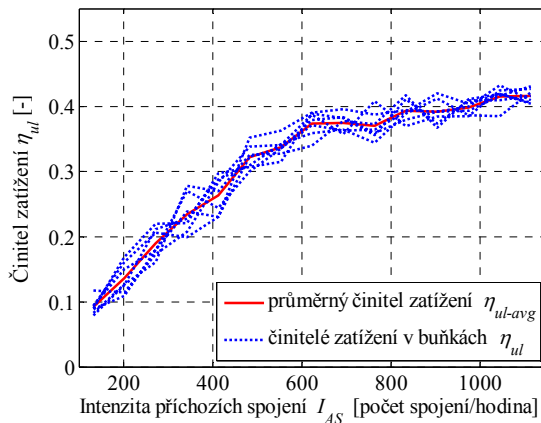


**Obr. 4.93** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce

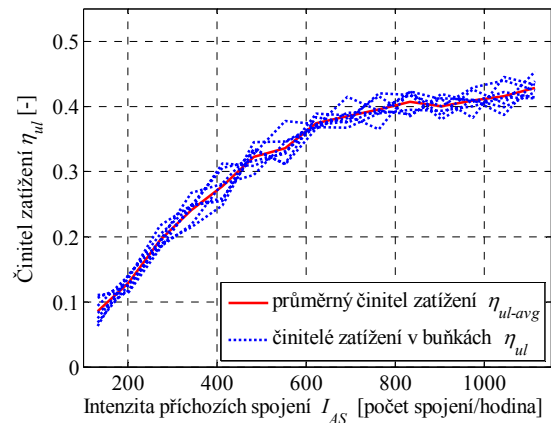


**Obr. 4.94** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

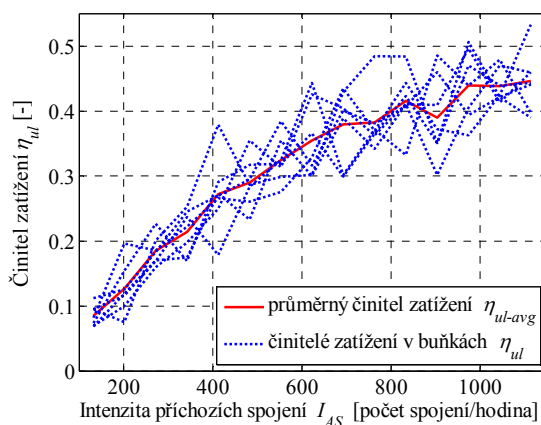
Na Obr. 4.95 až Obr. 4.98 jsou zobrazeny průběhy činitelů zatížení (v 7 buňkách v centrální oblasti sítě) a průměrný činitel zatížení pro všechny 4 algoritmy. Ze simulací lze pozorovat velké kolísání  $\eta_{ul}$  u obou genetických algoritmů.



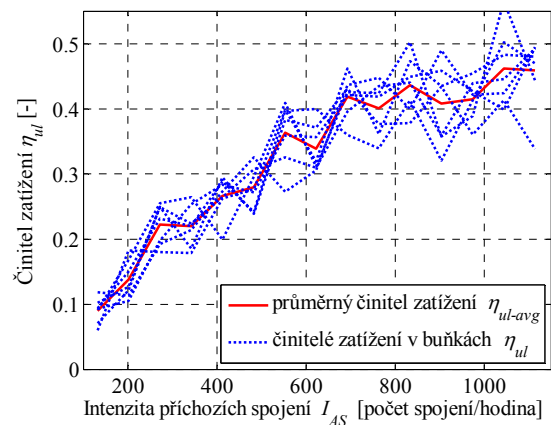
**Obr. 4.95** Průběh činitelů zatížení  $\eta_{ul}$  pro AC-L



**Obr. 4.96** Průběh činitelů zatížení  $\eta_{ul}$  pro AC-F1

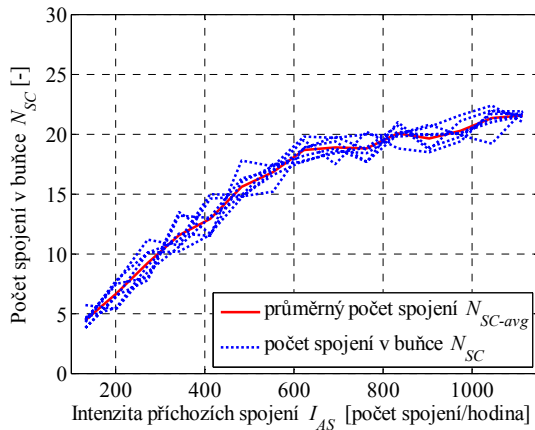


**Obr. 4.97** Průběh činitelů zatížení  $\eta_{ul}$  pro AC-G1

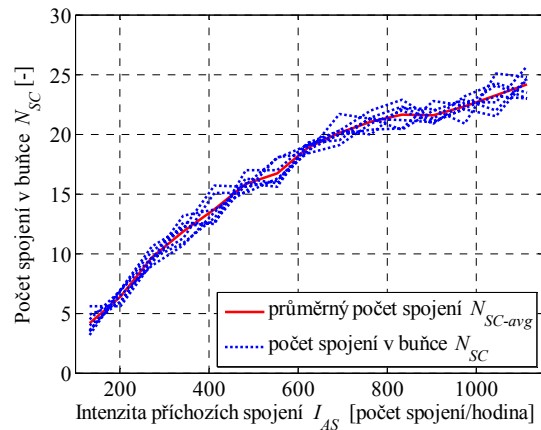


**Obr. 4.98** Průběh činitelů zatížení  $\eta_{ul}$  pro AC-G2

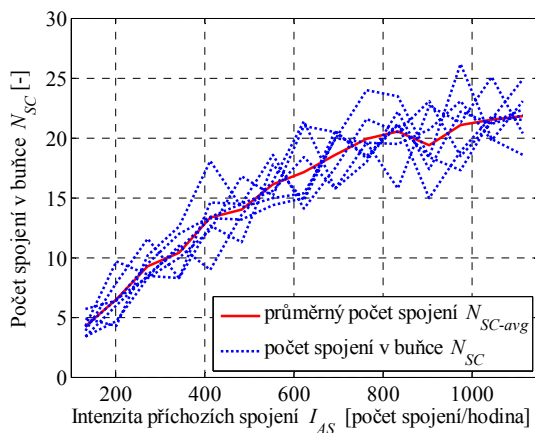
Na Obr. 4.99 až Obr. 4.102 jsou zobrazeny počty spojení (v 7 buňkách v centrální oblasti sítě) a průměrný počet spojení v buňce pro všechny 4 algoritmy. Simulace korespondují s Obr. 4.95 až Obr. 4.98. Lze pozorovat velké kolísání počtu spojení u obou genetických algoritmů.



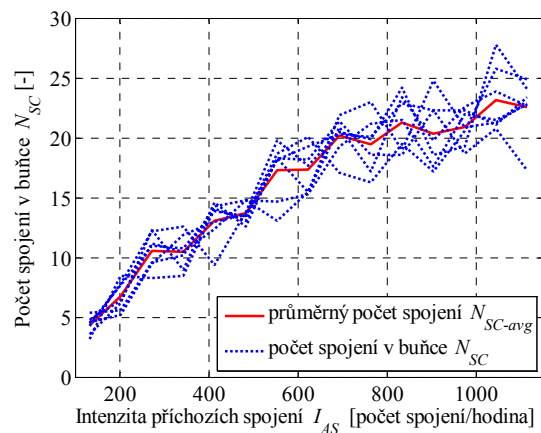
Obr. 4.99 Počet spojení v buňce pro AC-L



Obr. 4.100 Počet spojení v buňce pro AC-F1



Obr. 4.101 Počet spojení v buňce pro AC-G1



Obr. 4.102 Počet spojení v buňce pro AC-G2

### 4.3 Závěr

V této kapitole byly prezentovány výsledky simulací algoritmů, uvedených v kapitole 3. Bylo provedeno několik simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2, AC-F3, AC-F4, AC-G1 a AC-G2. Jednotlivé algoritmy byly vzájemně porovnány. Algoritmy byly prezentovány např. v [44], [50], [52], [53], [55] a [56].

V této kapitole byl také prezentován vliv použití jednoduchého řízení zahlčení sítě pro algoritmy AC-L a AC-F1. Řízení zahlčení mělo negativní vliv (zvýšení) na hodnoty  $p_B$  a zejména na  $p_D$ .

Pro algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3 byla provedena celá řada simulací pro různá nastavení a různé stavy v systému. Jediným závažnějším problémem simulovaných fuzzy algoritmů byla nutná úprava pro případ extrémního počtu příchozích spojení do sítě. Fuzzy algoritmy umožnily (při srovnání s AC-L) dosáhnout zejména nižších hodnot  $p_D$  (pro obdobný nebo mírně vyšší počet spojení v systému). Algoritmus AC-F3 vykazoval podobné výsledky jako algoritmus AC-F1. Algoritmus AC-F2 vykazoval nejnižší hodnoty  $p_D$ , ale zároveň také nižší počty spojení v buňce. Při výběru mezi těmito algoritmy lze doporučit AC-F3, případně AC-F1 (u něj je, při srovnání s AC-F3, hlavní výhodou jednoduchost). Algoritmus AC-F4 vykazoval vlastnosti, srovnatelné s AC-F3, ale také relativně strmý nárůst  $p_B$  (Obr. 4.79).

U genetických algoritmů (AC-G1 a AC-G2) byly prováděné simulace časově náročné. U obou algoritmů bylo obtížné nastavit různé priority pro různé typy spojení. Simulace ukazují, že u simulovaných genetických algoritmů dochází k relativně velkému kolísání počtu spojení v systému, a tedy i ke kolísání  $n_{ul}$ . Při použití řízení zahlcení sítě by výrazné kolísání  $n_{ul}$  vedlo ke zvýšení  $p_B$  i  $p_D$  u obou algoritmů.

## 5 Algoritmy pro řízení přístupu do sítě s predikcí a automatickou regulací

V kapitole 3 byly popsány některé algoritmy pro řízení přístupu do sítě. Výsledky simulací těchto algoritmů byly uvedeny v kapitole 4. V této kapitole je uvedeno několik AC algoritmů, založených převážně na AC-F1 (kapitola 3.2.1). Níže uvedené algoritmy využívají predikci pohybu UEs, predikci provozu v síti a také jsou doplněny o automatickou regulaci některých parametrů.

Predikci pohybu UEs v systému se věnuje např. [35], kde jsou využity genetické algoritmy a databáze dřívějších trajektorií pohybu uživatelů. V [34] je pro predikci pohybu použit také mapový podklad dané lokality.

Predikcí provozu v síti s využitím fuzzy logiky se zabývá např. [36]. Publikace [37] využívá různé metody predikce video přenosu pro HSDPA (High Speed Downlink Packet Access).

Automatická regulace RRM je obecně rozebrána např. v [16]. Publikace uvádí příklady parametrů, které lze automatickou regulací upravovat. V publikaci je uvedeno také několik konkrétních příkladů provedení automatické regulace.

### 5.1 Predikce pohybu UEs

V kapitole 3.2.3 je uveden algoritmus AC-F3, který detekuje uživatele v blízkém okolí aktuální buňky a také rozlišuje směr jejich pohybu. Neuvažuje však rychlost UEs. V této kapitole je uvedeno několik algoritmů, které se jednoduchým způsobem snaží odhadnout počet uživatelů v buňce v čase  $t+\tau$ , kde  $\tau$  je doba odhadu. Princip predikce polohy UEs je znázorněn na Obr. 5.1, částečně vychází z [20]. Aktuální pozice UE je označena jako  $x_t$ , minulé pozice jako  $x_{t-1}$  a  $x_{t-2}$ . Algoritmy využívají jednoduchou lineární predikci, kdy poloha v čase  $t+\tau$  (pozice  $x_{1,t+\tau}$ ) je vypočítána pomocí pozic  $x_t$  a  $x_{t-1}$ . Některé algoritmy uvažují i případnou změnu pohybu UEs (pozice  $x_{2-4,t+\tau}$ ). Tyto pozice jsou nalezeny jako průsečíky dvou kružnic. Poloměr první kružnice  $R_{c1} = |x_t x_{1,t+\tau}|$  ( $|A B|$  značí vzdálenost mezi body A a B), střed kružnice je v bodě  $x_t$ . Druhá kružnice má střed v bodě  $x_{1,t+\tau}$ . Poloměr druhé kružnice se liší pro jednotlivé pozice:  $R_{c2} = R_{c1} / 1,6$  pro  $x_{2,t+\tau}$ ,  $R_{c2} = R_{c1} / 1,1$  pro  $x_{3,t+\tau}$  a  $R_{c2} = R_{c1} / 0,75$  pro  $x_{4,t+\tau}$ .

#### 5.1.1 Fuzzy algoritmus s predikcí č. 1 (AC-FP1)

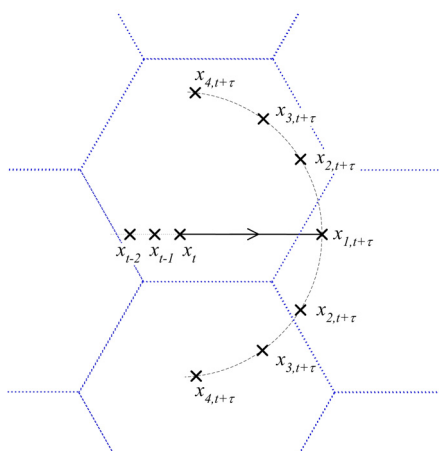
Algoritmus je rozšířením AC-F1 (kapitola 3.2.1). Je u něj doplněna predikce pohybu pro UEs. Algoritmus, dále označovaný zkratkou **AC-FP1**, využívá 4 vstupní proměnné. Tři proměnné jsou stejné jako u AC-F1. Čtvrtou proměnnou je predikovaný počet UEs,  $N_{mu-P}$ , kteří se do uvažované buňky přesunou v uvažovaném časovém úseku (doba odhadu)  $\tau$ . Algoritmus AC-FP1 uvažuje pouze lineární pohyb uživatelů (viz Obr. 5.1, bod  $x_{1,t+\tau}$ ).

### 5.1.2 Fuzzy algoritmus s predikcí č. 2 (AC-FP2)

Algoritmus je obdobou AC-FP1. Čtvrtou používanou proměnnou je predikovaný počet UEs,  $N_{nu-P}$ , kteří se do uvažované buňky přesunou v uvažovaném časovém úseku  $\tau$ . Algoritmus AC-FP2 uvažuje lineární pohyb uživatelů (Obr. 5.1, bod  $x_{1,t+\tau}$ ), ale také možnou změnu pohybu (Obr. 5.1, body  $x_{2,t+\tau}$ ). Algoritmus je dále v textu označován zkratkou **AC-FP2**. Predikovaný počet UEs,  $N_{nu-P}$ , je vypočítán jako váhovaný součet dvou predikovaných hodnot, které korespondují s pozicí  $x_{1,t+\tau}$  a pozicemi  $x_{2,t+\tau}$ :

$$N_{nu-P} = N_{nu-P}(x_1) + 0,8 \cdot N_{nu-P}(x_2). \quad (5.1)$$

Hodnota  $N_{nu-P}(x_2)$  udává predikovaný počet UEs na obou pozicích  $x_{2,t+\tau}$ .



Obr. 5.1 Princip predikce polohy UEs

### 5.1.3 Fuzzy algoritmus s predikcí č. 3 (AC-FP3)

Algoritmus je obdobou AC-FP2. Čtvrtou používanou proměnnou je predikovaný počet UEs,  $N_{nu-P}$ , kteří se do uvažované buňky přesunou v uvažovaném časovém úseku  $\tau$ . Algoritmus AC-FP3 uvažuje lineární pohyb uživatelů (Obr. 5.1, bod  $x_{1,t+\tau}$ ), ale také možnou změnu pohybu (Obr. 5.1, body  $x_{2,t+\tau}$ ,  $x_{3,t+\tau}$  a  $x_{4,t+\tau}$ ). Algoritmus je dále v textu označován zkratkou **AC-FP3**. Predikovaný počet UEs,  $N_{nu-P}$ , je vypočítán jako váhovaný součet čtyř predikovaných hodnot, které korespondují s danými pozicemi:

$$N_{nu-P} = N_{nu-P}(x_1) + 0,8 \cdot N_{nu-P}(x_2) + 0,4 \cdot N_{nu-P}(x_3) + 0,2 \cdot N_{nu-P}(x_4). \quad (5.2)$$

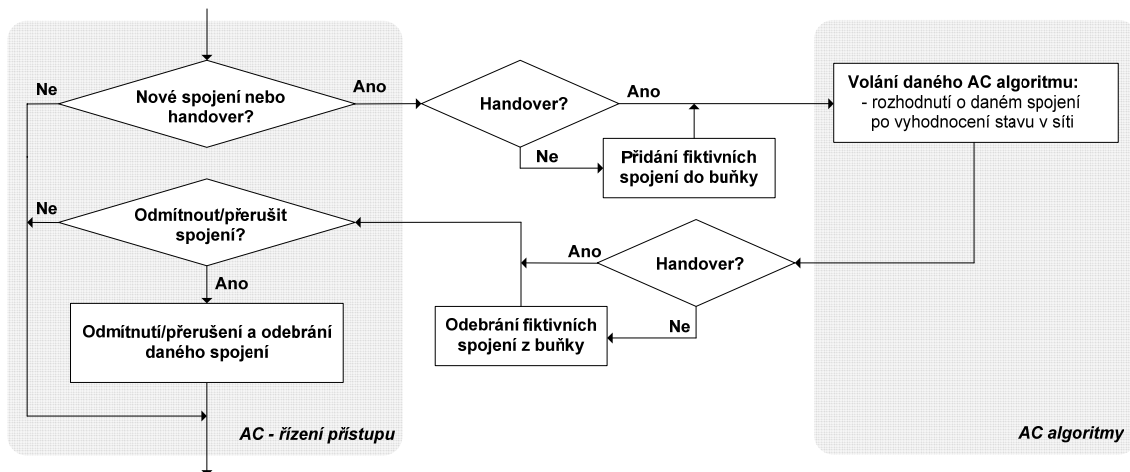
Hodnoty  $N_{nu-P}(x_{2-4})$  udávají predikovaný počet UEs na obou pozicích  $x_{2-4,t+\tau}$ .

## 5.2 Predikce provozu v síti

V literatuře, např. [36] nebo [37], se objevují různé metody pro odhad provozu v síti a využití tohoto odhadu pro řízení přístupu do sítě. Vzhledem k charakteru simulačního programu nelze uvedený přístup (např. ve [37]) využít. Dále budou uvedeny dva jednoduché algoritmy.

### 5.2.1 Fuzzy algoritmus s predikcí č. 4 (AC-FP4)

Algoritmus je rozšířením AC-F1 (kapitola 3.2.1). Algoritmus je kombinací predikce provozu a rezervování kapacity v síti. Algoritmus, dále označovaný zkratkou **AC-FP4**, využívá 3 vstupní proměnné, stejné jako u AC-F1. Pro nová spojení je, před voláním algoritmu pro AC (Obr. 5.2), do systému (do dané buňky) přidáno několik fiktivních spojení. Počet těchto fiktivních spojení je  $N_{AP-P1}$ . Po rozhodnutí o přijetí nového spojení jsou fiktivní spojení ze systému znovu odebrána. Hodnota  $N_{AP-P1}$  je vypočítána jako podíl celkového počtu příchozích spojení v následujících 10 vteřinách (hodnota není pro jednoduchost odhadována – je použita známá hodnota viz generování nových spojení, kapitola 2.2) a počtu buněk v systému.



Obr. 5.2 Princip řízení přístupu pro AC-FP4

### 5.2.2 Fuzzy algoritmus s predikcí č. 5 (AC-FP5)

Algoritmus je rozšířením AC-F1 (kapitola 3.2.1). Algoritmus, dále označovaný zkratkou **AC-FP5**, využívá 4 vstupní proměnné. Tři proměnné jsou stejné jako u AC-F1. Čtvrtou proměnnou je celkový počet příchozích spojení  $N_{AP-P2}$  v dané buňce za posledních 20 sekund ( $\tau = 20$  s). Hraniční body funkce pro zpracování vstupní proměnné  $N_{AP-P2}$  jsou pro AC-FP5 shodné s hraničními body pro zpracování  $N_N$  a  $N_{N-A}$  (viz Tab. 4.1).

## 5.3 Fuzzy algoritmus se dvěma typy predikce (AC-FP15)

Na základě výsledů simulací v kapitole 6.1 a 6.2, byl navržen algoritmus vycházející z AC-FP1 a AC-FP5. Navržený algoritmus, dále označovaný zkratkou **AC-FP15**, využívá 5 vstupních proměnných. Tři proměnné jsou stejné jako u AC-F1 ( $\eta_{ul}$ ,  $SP$  a  $v_f$ ). Čtvrtou proměnnou je predikovaný počet UEs,  $N_{mu-P}$ , kteří se do uvažované buňky přesunou v uvažovaném časovém úseku (doba odhadu)  $\tau_1$ . Pátou proměnnou je celkový počet příchozích spojení  $N_{AP-P2}$  v dané buňce za posledních 20 sekund ( $\tau_2 = 20$  s). Algoritmus používá 72 fuzzy pravidel. Pravidla jsou definována v Tab. 5.1 až Tab. 5.4. Pro zpracování posledních dvou proměnných ( $N_{AP-P2}$  a  $N_{mu-P}$ ) je využita stejná funkce, jako pro zpracování např.  $\eta_{ul-A}$  (Obr. 3.3).

Tab. 5.1 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, první část

Pravidlo č.	$N_{AP-P2}$	$N_{nu-P}$	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
1	nízký	nízký	nízký	nízký	nízký	určitě přijmout
2	nízký	nízký	nízký	nízký	střední	přijmout
3	nízký	nízký	nízký	nízký	vysoký	asi přijmout
4	nízký	nízký	nízký	střední	nízký	určitě přijmout
5	nízký	nízký	nízký	střední	střední	asi přijmout
6	nízký	nízký	nízký	střední	vysoký	asi přijmout
7	nízký	nízký	nízký	vysoký	nízký	přijmout
8	nízký	nízký	nízký	vysoký	střední	asi přijmout
9	nízký	nízký	nízký	vysoký	vysoký	asi odmítnout
10	nízký	nízký	vysoký	nízký	nízký	určitě přijmout
11	nízký	nízký	vysoký	nízký	střední	přijmout
12	nízký	nízký	vysoký	nízký	vysoký	asi odmítnout
13	nízký	nízký	vysoký	střední	nízký	přijmout
14	nízký	nízký	vysoký	střední	střední	asi přijmout
15	nízký	nízký	vysoký	střední	vysoký	asi odmítnout
16	nízký	nízký	vysoký	vysoký	nízký	asi přijmout
17	nízký	nízký	vysoký	vysoký	střední	asi přijmout
18	nízký	nízký	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

Tab. 5.2 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, druhá část

Pravidlo č.	$N_{AP-P2}$	$N_{nu-P}$	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
19	nízký	vysoký	nízký	nízký	nízký	přijmout
20	nízký	vysoký	nízký	nízký	střední	asi přijmout
21	nízký	vysoký	nízký	nízký	vysoký	asi odmítnout
22	nízký	vysoký	nízký	střední	nízký	přijmout
23	nízký	vysoký	nízký	střední	střední	asi odmítnout
24	nízký	vysoký	nízký	střední	vysoký	asi odmítnout
25	nízký	vysoký	nízký	vysoký	nízký	asi přijmout
26	nízký	vysoký	nízký	vysoký	střední	asi odmítnout
27	nízký	vysoký	nízký	vysoký	vysoký	odmítnout
28	nízký	vysoký	vysoký	nízký	nízký	přijmout
29	nízký	vysoký	vysoký	nízký	střední	asi přijmout
30	nízký	vysoký	vysoký	nízký	vysoký	odmítnout
31	nízký	vysoký	vysoký	střední	nízký	asi přijmout
32	nízký	vysoký	vysoký	střední	střední	asi odmítnout
33	nízký	vysoký	vysoký	střední	vysoký	odmítnout
34	nízký	vysoký	vysoký	vysoký	nízký	asi odmítnout
35	nízký	vysoký	vysoký	vysoký	střední	asi odmítnout
36	nízký	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

Tab. 5.3 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, třetí část

Pravidlo č.	$N_{AP-P2}$	$N_{nu-P}$	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
37	vysoký	nízký	nízký	nízký	nízký	přijmout
38	vysoký	nízký	nízký	nízký	střední	přijmout
39	vysoký	nízký	nízký	nízký	vysoký	asi přijmout
40	vysoký	nízký	nízký	střední	nízký	přijmout
41	vysoký	nízký	nízký	střední	střední	asi přijmout
42	vysoký	nízký	nízký	střední	vysoký	asi přijmout
43	vysoký	nízký	nízký	vysoký	nízký	přijmout
44	vysoký	nízký	nízký	vysoký	střední	asi přijmout
45	vysoký	nízký	nízký	vysoký	vysoký	odmítnout
46	vysoký	nízký	vysoký	nízký	nízký	přijmout
47	vysoký	nízký	vysoký	nízký	střední	přijmout
48	vysoký	nízký	vysoký	nízký	vysoký	odmítnout
49	vysoký	nízký	vysoký	střední	nízký	přijmout
50	vysoký	nízký	vysoký	střední	střední	asi přijmout
51	vysoký	nízký	vysoký	střední	vysoký	odmítnout
52	vysoký	nízký	vysoký	vysoký	nízký	asi přijmout
53	vysoký	nízký	vysoký	vysoký	střední	asi přijmout
54	vysoký	nízký	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

Tab. 5.4 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, čtvrtá část

Pravidlo č.	$N_{AP-P2}$	$N_{nu-P}$	$v_f$	$SP$	$\eta_{ul}$	Rozhodnutí
55	vysoký	vysoký	nízký	nízký	nízký	přijmout
56	vysoký	vysoký	nízký	nízký	střední	asi přijmout
57	vysoký	vysoký	nízký	nízký	vysoký	asi odmítnout
58	vysoký	vysoký	nízký	střední	nízký	přijmout
59	vysoký	vysoký	nízký	střední	střední	odmítnout
60	vysoký	vysoký	nízký	střední	vysoký	odmítnout
61	vysoký	vysoký	nízký	vysoký	nízký	asi přijmout
62	vysoký	vysoký	nízký	vysoký	střední	odmítnout
63	vysoký	vysoký	nízký	vysoký	vysoký	odmítnout
64	vysoký	vysoký	vysoký	nízký	nízký	přijmout
65	vysoký	vysoký	vysoký	nízký	střední	asi přijmout
66	vysoký	vysoký	vysoký	nízký	vysoký	odmítnout
67	vysoký	vysoký	vysoký	střední	nízký	asi přijmout
68	vysoký	vysoký	vysoký	střední	střední	odmítnout
69	vysoký	vysoký	vysoký	střední	vysoký	odmítnout
70	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	nízký	odmítnout
71	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	střední	odmítnout
72	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	vysoký	odmítnout

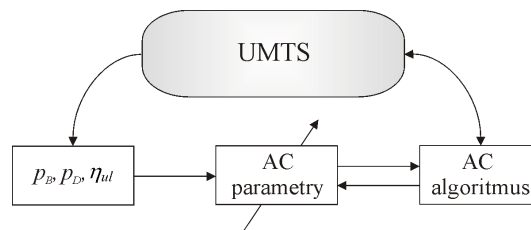


## 5.4 Automatická regulace algoritmů

Automatická regulace RRM algoritmů je obecně rozebrána např. v [16]. Jsou zde také uvedeny některé konkrétní příklady provedení autoregulace. Autoregulaci RRM lze provádět u řady parametrů (velikosti prahových hodnot, délka průměrovacích oken, hodnoty váhovacích koeficientů, atd.). Kritéria pro regulaci mohou být také různá. Autoregulaci zvolených parametrů lze provádět např. s ohledem na  $p_B$ ,  $p_D$ , s ohledem na kvalitu spojení, apod. Často se jako kritérium pro regulaci používá  $f_{obj}$ , [16]:

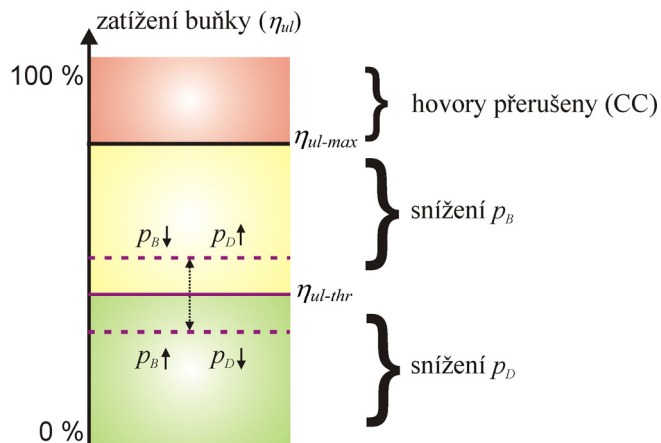
$$f_{obj} = p_B + \beta \cdot p_D, \quad (5.3)$$

kde  $\beta$  je váhovací koeficient. Princip činnosti je patrný z Obr. 5.3. Algoritmus pro řízení přístupu (RRM algoritmus obecně) spolupracuje s vlastní UMTS sítí. Vybrané indikátory kvality spojení (stavu systému) jsou použity pro automatickou regulaci parametrů AC algoritmu.



Obr. 5.3 Princip automatické regulace AC algoritmů

Níže prezentované algoritmy používají automatickou regulaci rozhodovacích prahů  $F_{thr}$  (prahových hodnot  $\eta_{ul}$  v případě AC-L). Nastavení těchto prahů je obecně kompromis mezi počty odmítnutých a přerušených spojení, viz Obr. 5.4. Snížení  $\eta_{ul-thr}$  způsobí snížení  $p_D$ , snížení zatížení buňky a zlepšení QoS. Nevýhodou je malé zatížení buňky (malá kapacita buňky) a zvýšení  $p_B$ . Při zvýšení  $\eta_{ul-thr}$  dochází naopak ke zvýšení  $p_D$ , zvýšení zatížení buňky a zhoršení QoS. Hodnota  $p_B$  naopak klesá. Optimální nastavení prahů by mělo zajistit maximální zatížení buňky při přijatelných hodnotách QoS,  $p_B$  a  $p_D$ . Pro  $\eta_{ul} > \eta_{ul-max}$  nastává zahlcení sítě. V tomto případě začíná fungovat řízení zahlcení sítě (CC), které přerušuje spojení (případně dochází ke snížení přenosových rychlostí jednotlivých spojení).

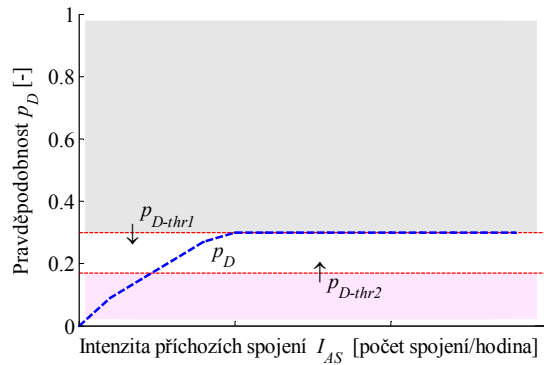


Obr. 5.4 Vliv změny prahové hodnoty  $\eta_{ul-thr}$

### 5.4.1 Automatická regulace $p_D$ (AC- $X_{R1}$ )

Jednou z možností automatické regulace je např. udržení  $p_D$  pod zvolenou prahovou hodnotou. Tento přístup je použit v následujících simulacích jako ukázka možné automatické regulace. Princip činnosti je patrný z Obr. 5.5. Při překročení prahové hodnoty  $p_{D-thr1}$  (šedá oblast na Obr. 5.5) jsou automaticky upraveny rozhodovací prahy jednotlivých algoritmů. Jejich úprava zajistí snížení  $p_D$  a zároveň zvýší  $p_B$ . Při následném poklesu  $p_D$  pod prahovou hodnotu  $p_{D-thr2}$  (fialová oblast na Obr. 5.5) jsou prahy částečně upraveny opačným způsobem. Tato úprava zajistí, aby se hodnota  $p_D$  pohybovala v přijatelné oblasti a zároveň omezuje velikost  $p_B$ .

Každý algoritmus používá pro výsledné rozhodnutí 4 prahové hodnoty:  $F_{thr-VN}$  (nová hlasová spojení),  $F_{thr-DN}$  (nová datová spojení),  $F_{thr-VO}$  (existující hlasová spojení),  $F_{thr-DO}$  (existující datová spojení). Automatická regulace nastavuje zmíněné prahové hodnoty. Pro každý algoritmus jsou definovány čtyři prahové hodnoty  $p_D$ :  $p_{D-thr1V}$ ,  $p_{D-thr2V}$  (hlasová spojení),  $p_{D-thr1D}$  a  $p_{D-thr2D}$  (datová spojení). Dále jsou definovány 4 proměnné  $\Delta F_{thr}$ :  $\Delta F_{thr-VN}$ ,  $\Delta F_{thr-DN}$ ,  $\Delta F_{thr-VO}$  a  $\Delta F_{thr-DO}$ . Definováno je také 8 konstant  $F_{C-thr-1/2}$ :  $F_{C-thr-VN-1}$ ,  $F_{C-thr-DN-1}$ ,  $F_{C-thr-VO-1}$ ,  $F_{C-thr-DO-1}$ ,  $F_{C-thr-VN-2}$ ,  $F_{C-thr-DN-2}$ ,  $F_{C-thr-VO-2}$  a  $F_{C-thr-DO-2}$ .  $F_{C-thr-VN-1}$  je např. hodnota pro hlasová (V) nová (N) spojení a práh  $p_{D-thr1V}$ .



Obr. 5.5 Princip automatické regulace  $p_D$

Počáteční hodnoty proměnných,  $\Delta F_{thr}$ , jsou nulové. Hodnota každé proměnné  $\Delta F_{thr}$  je při překročení prahové hodnoty  $p_{D-thr1}$  ( $p_{D-thr2}$ ) upravena příslušnou konstantou  $F_{C-thr-1}$  ( $F_{C-thr-2}$ ). V průběhu simulace tak proměnné nabývají různých hodnot. Aktuální použitý rozhodovací práh,  $F_{thr-act}$ , je součtem nastavené hodnoty  $F_{thr}$  a  $\Delta F_{thr}$ :

$$\Delta F_{thr} = \Delta F_{thr} + F_{C-thr} , \quad (5.4)$$

$$F_{thr-act} = F_{thr} + \Delta F_{thr} . \quad (5.5)$$

Algoritmy, upravené tímto způsobem, jsou dále označeny indexem  $R_1$ . Regulace probíhá samostatně pro každou buňku systému (v každé buňce jsou výše uvedené proměnné definovány a aktualizovány samostatně).

### 5.4.2 Automatická regulace $p_B$ a $p_D$ (AC- $X_{R2}$ )

Automatická regulace, prezentovaná v této kapitole, je založena na (5.3). Rozhodovacím kritériem je poměr mezi aktuálními hodnotami  $p_B$  a  $p_D$ . Princip automatické regulace je založen na porovnávání  $p_D$  s váhovanou hodnotou  $p_B$ . Regulační mechanismus se snaží zajistit, aby platil následující vztah:

$$p_D = \frac{p_B}{\beta}. \quad (5.6)$$

Princip regulace je stejný jako v kapitole 5.4.1, rozdílné je pouze optimalizační kritérium. Pro  $p_D > p_B / \beta$  jsou proměnné  $\Delta F_{thr}$  upravovány konstantami  $F_{C-thr-xx-h}$ . Pro  $p_D < p_B / \beta$  jsou proměnné  $\Delta F_{thr}$  upravovány konstantami  $F_{C-thr-xx-l}$ . U fuzzy algoritmů je navíc po překročení hodnoty  $\eta_{ul-thr}$  ke všem proměnným přičtena konstanta  $\Delta F_{C-thr}$ . Algoritmy, upravené tímto způsobem, jsou dále označeny indexem R2.

### 5.5 Závěr

V této kapitole byly popsány některé algoritmy pro řízení přístupu do sítě. Algoritmy jsou založené převážně na AC-F1 (kapitola 3.2.1). Uvedené algoritmy využívají predikci pohybu UEs, predikci provozu v síti a také jsou doplněny o automatickou regulaci některých parametrů. Algoritmy uvedené v této kapitole jsou opět do jisté míry originální. Na základě simulací a jejich vyhodnocení (kapitola 6.1 a 6.2) byl navržen vlastní algoritmus AC-FP15, který je kombinací AC-FP1 a AC-FP5. Algoritmy byly prezentovány např. v [54] a [58].

## 6 Simulace AC algoritmů s predikcí a automatickou regulací

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací a vzájemné srovnání algoritmů pro řízení přístupu, které byly podrobněji popsány v kapitole 5. Algoritmy s predikcí a automatickou regulací jsou částečně srovnány s algoritmy, uvedenými v kapitole 3. Nastavení prahů jednotlivých algoritmů a nastavení simulací je stejné jako v kapitole 4.

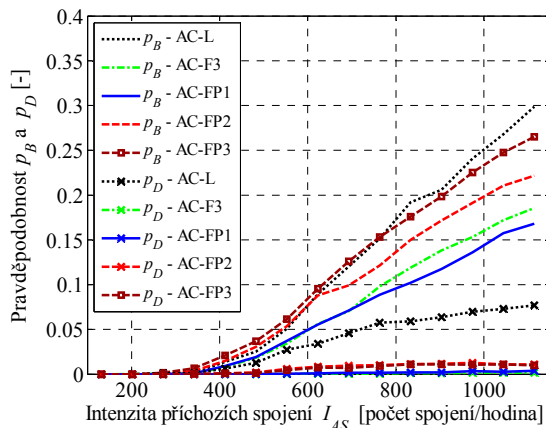
### 6.1 Simulace algoritmů s predikcí pohybu

Na Obr. 6.1 až Obr. 6.8 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F3, AC-FP1, AC-FP2 a AC-FP3. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy a nastavení:

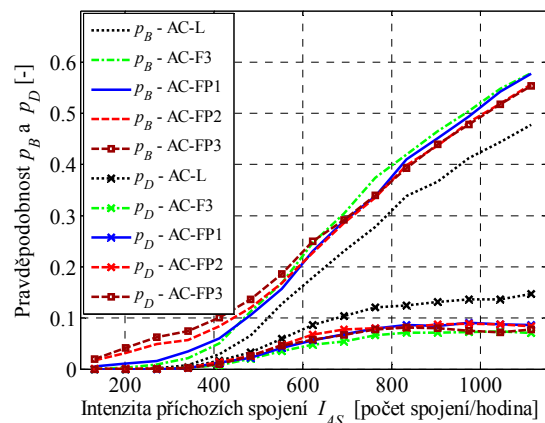
- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,53$ ,  $F_{thr-DN} = 0,58$ ,  $F_{thr-VO} = 0,23$ ,  $F_{thr-DO} = 0,28$  pro AC-F3,
- $F_{thr-VN} = 0,53$ ,  $F_{thr-DN} = 0,58$ ,  $F_{thr-VO} = 0,23$ ,  $F_{thr-DO} = 0,28$  pro AC-FP1,
- $F_{thr-VN} = 0,48$ ,  $F_{thr-DN} = 0,53$ ,  $F_{thr-VO} = 0,18$ ,  $F_{thr-DO} = 0,23$  pro AC-FP2,
- $F_{thr-VN} = 0,47$ ,  $F_{thr-DN} = 0,52$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$  pro AC-FP3.

Hraniční body funkce pro zpracování vstupní proměnné  $N_{nu-P}$  jsou pro AC-FP1 shodné s hraničními body pro zpracování  $N_N$  a  $N_{N-A}$  (viz Tab. 4.1):  $A = 2$ ,  $B = 20$ . Pro AC-FP2 jsou použity hraniční body  $A = 4$ ,  $B = 20$ . Pro AC-FP3 jsou použity hraniční body:  $A = 6$ ,  $B = 20$ . Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 8$ ,  $\tau = 20$  s.

Ze simulací na Obr. 6.1 a Obr. 6.2 je patrné, že fuzzy algoritmy umožní dosáhnout nižších hodnot  $p_D$  než AC-L a pro hlasová spojení také nižších hodnot  $p_B$ .



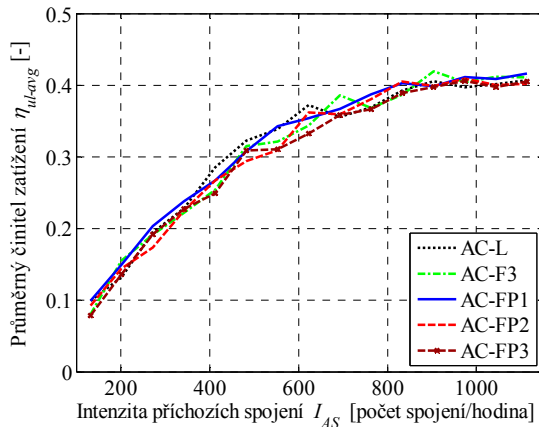
Obr. 6.1 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení



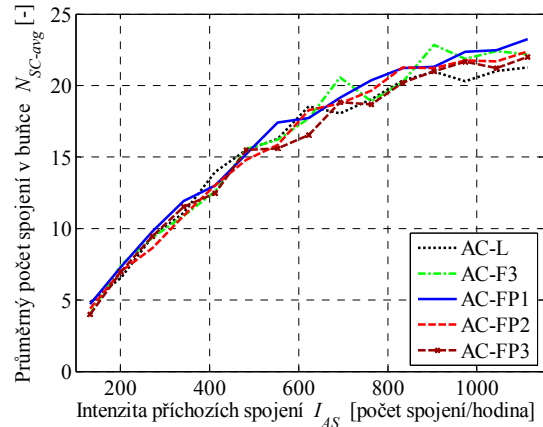
Obr. 6.2 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení

Všechny simulované algoritmy dosáhly srovnatelných hodnot činitele zatížení (Obr. 6.3), počtu spojení v buňce (Obr. 6.4) i přenosových rychlostí (Obr. 6.5). Na

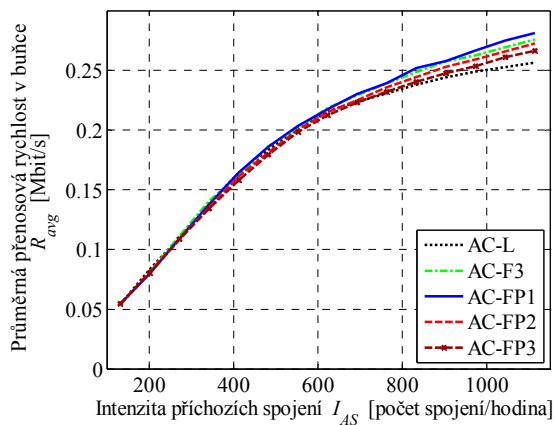
Obr. 6.6 až Obr. 6.8 jsou zobrazeny průměrné počty úspěšně dokončených spojení. Ze simulací je patrné, že při použití fuzzy algoritmů je tento počet vyšší. Zároveň lze ze simulací pozorovat vliv různých priorit hlasových a datových spojení. Pro vyšší intenzitu příchozích spojení jsou (u všech použitých algoritmů) datová spojení omezována na úkor hlasových spojení (Obr. 6.7 a Obr. 6.8). Z pohledu hlasových spojení se jako nejvýhodnější jeví použití algoritmu AC-FP1.



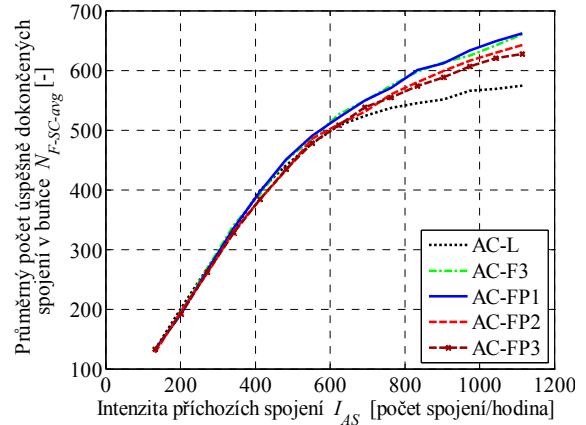
Obr. 6.3 Srovnání průměrných činitelů zatížení



Obr. 6.4 Srovnání průměrného počtu spojení

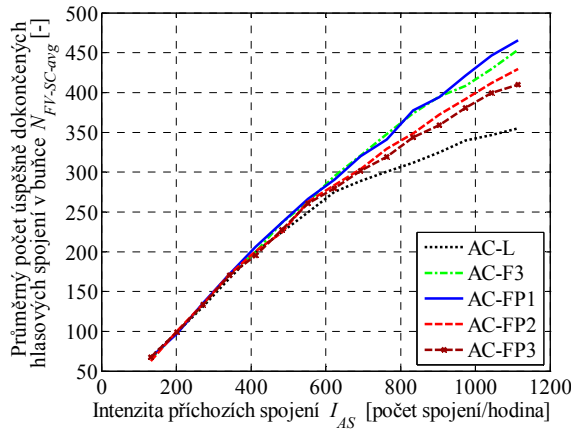


Obr. 6.5 Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy

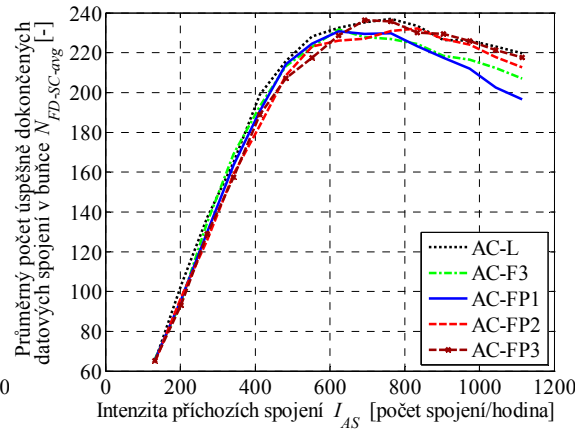


Obr. 6.6 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce

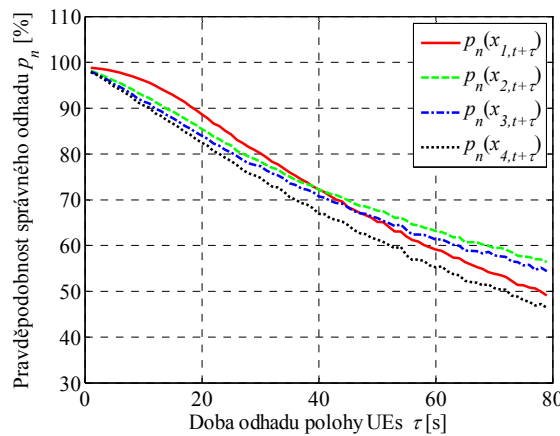
Na Obr. 6.9 je výsledek simulace, která ukazuje vliv doby odhadu  $\tau$  na přesnost odhadu polohy UEs pro jednotlivé predikované pozice, viz Obr. 5.1. Odhad polohy se, v souladu s kapitolou 5.1, týká odhadu buňky, ve které se daný UE bude nacházet v době  $t+\tau$ . Z tohoto důvodu není součet jednotlivých pravděpodobností na Obr. 6.9 roven jedné. Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 1$  s,  $N_{sim} = 1$ ,  $I_{AS} = 760$  spojení za hodinu (v jedné buňce). Ze simulace je patrné, že s rostoucí dobou odhadu klesá pravděpodobnost správné predikce polohy UEs. Ze simulace je také patrné, že pravděpodobnost predikce při změně pohybu dosahuje rovněž vysokých hodnot. Pro  $\tau = 20$  s je pravděpodobnost úspěšného odhadu větší než 80 % pro všechny polohy. Nejlepších výsledků je dosaženo (pro  $\tau < 40$  s) pro lineární predikci polohy (Obr. 5.1, bod  $x_{l,t+\tau}$ ). Při změně směru pohybu (Obr. 5.1, body  $x_{2-4,t+\tau}$ ) jsou pravděpodobnosti úspěšného odhadu mírně nižší.



**Obr. 6.7** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



**Obr. 6.8** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce



**Obr. 6.9** Vliv doby odhadu  $\tau$  na přesnost odhadu polohy UEs

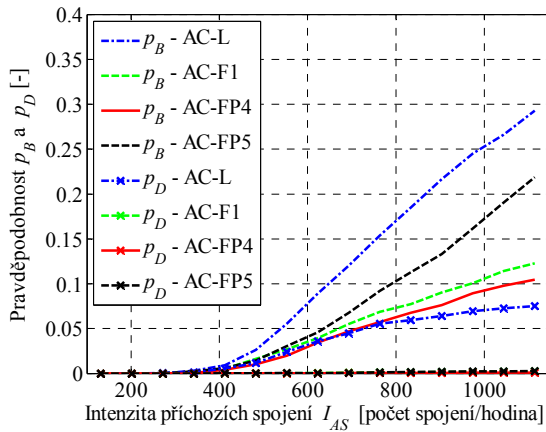
## 6.2 Simulace algoritmů s predikcí provozu v síti

Na Obr. 6.10 až Obr. 6.17 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-FP4 a AC-FP5. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy a nastavení:

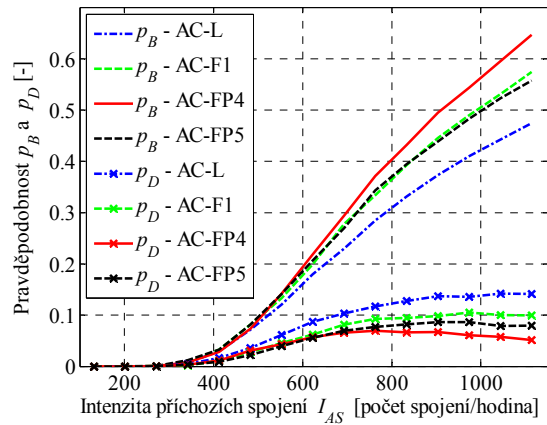
- $F_{thr-VN} = 0,450$ ,  $F_{thr-DN} = 0,449$ ,  $F_{thr-VO} = 0,455$ ,  $F_{thr-DO} = 0,454$  pro AC-L,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,42$ ,  $F_{thr-DN} = 0,45$ ,  $F_{thr-VO} = 0,24$ ,  $F_{thr-DO} = 0,29$  pro AC-FP4,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-FP5.

Hraniční body funkce pro zpracování vstupní proměnné  $N_{AP-P2}$  jsou pro AC-FP5 shodné s hraničními body pro zpracování  $N_N$  a  $N_{N-A}$  (viz Tab. 4.1):  $A = 2$ ,  $B = 20$ . Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ .

Ze simulací na Obr. 6.10 a Obr. 6.11 je patrné, že algoritmy s predikcí provozu umožňují dosáhnout nižší (srovnatelné)  $p_D$  než AC-L a AC-F1, a pro hlasová spojení také nižší  $p_B$ .

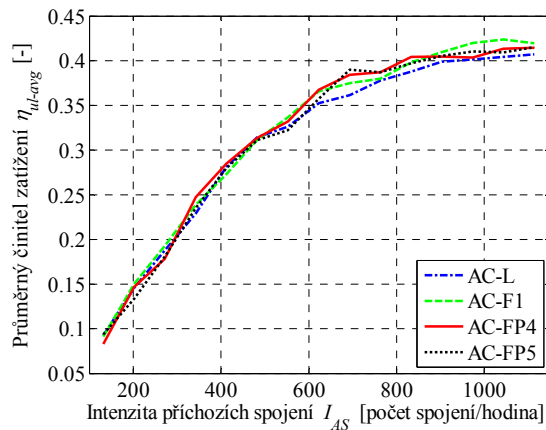


Obr. 6.10 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení

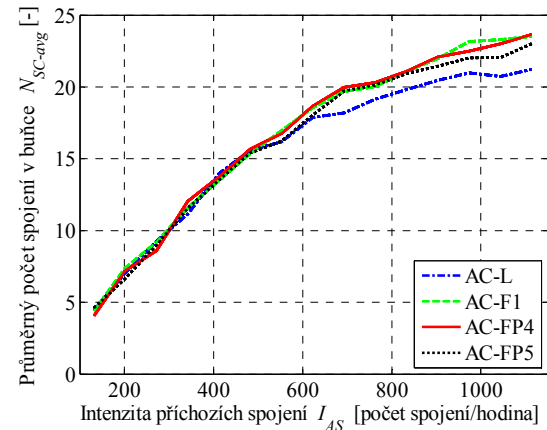


Obr. 6.11 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení

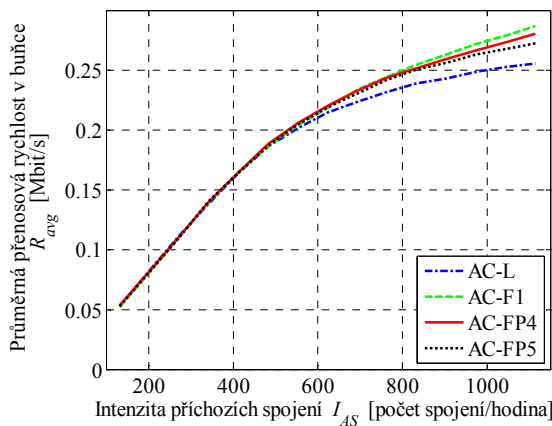
Na Obr. 6.12 a Obr. 6.13 je znázorněn průměrný činitel zatížení pro uplink a průměrný počet spojení v buňce. Algoritmy AC-L a AC-FP4 dosahují nejvyššího průměrného počtu spojení v buňce a ze simulace na Obr. 6.14 je patrné, že dosahují i největších přenosových rychlostí. Z celkového pohledu (případně z pohledu hlasových spojení, viz Obr. 6.16) se jako nejvýhodnější jeví použití algoritmu AC-FP4, případně AC-FP5.



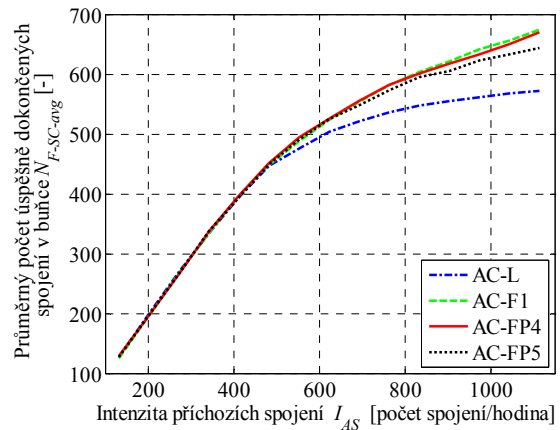
Obr. 6.12 Srovnání průměrných činitelů zatížení



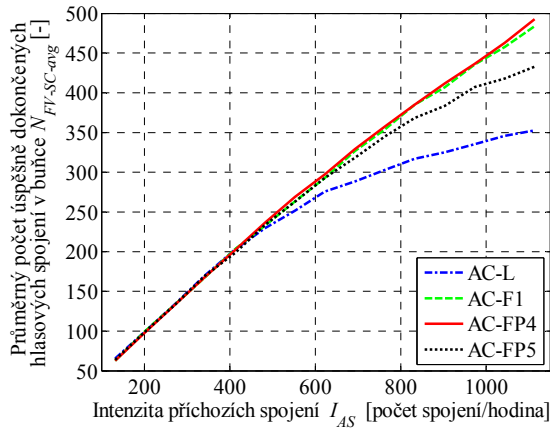
Obr. 6.13 Srovnání průměrného počtu spojení



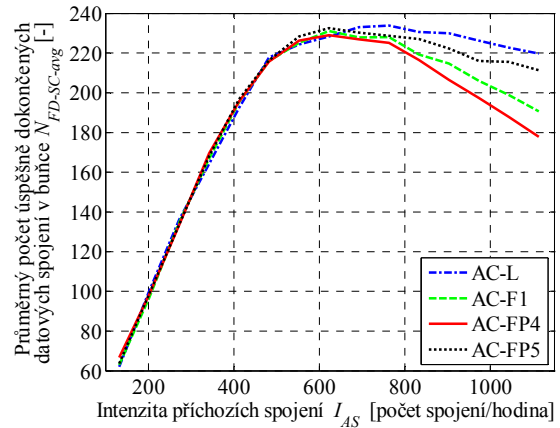
Obr. 6.14 Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy



Obr. 6.15 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



**Obr. 6.16** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



**Obr. 6.17** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

### 6.3 Srovnání vybraných algoritmů

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací pro některé vybrané algoritmy. Uvažované algoritmy vykazovaly (v simulacích v kapitolách 4, 6.1 a 6.2) nejvýhodnějších vlastností a nejlepších výsledků. Jedná se o algoritmy AC-F1, AC-FP1 a AC-FP5, které jsou srovnány s AC-FP15 (uvedeným v kapitole 5.3).

#### Základní srovnání algoritmů AC-F1, AC-FP1, AC-FP5 a AC-FP15

Na Obr. 6.18 až Obr. 6.25 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-F1, AC-FP1, AC-FP5 a AC-FP15. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy a nastavení:

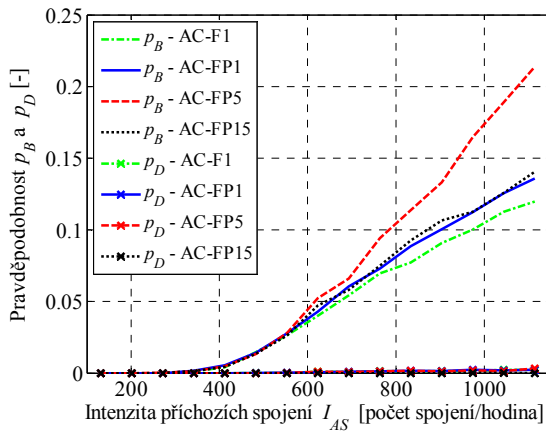
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$  pro AC-F1,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-FP1,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$  pro AC-FP5,
- $F_{thr-VN} = 0,48$ ,  $F_{thr-DN} = 0,53$ ,  $F_{thr-VO} = 0,05$ ,  $F_{thr-DO} = 0,10$  pro AC-FP15.

Hraniční body funkce pro zpracování vstupní proměnné  $N_{nu-P}$  jsou pro AC-FP1 shodné s hraničními body pro zpracování  $N_N$  a  $N_{N-A}$  (viz Tab. 4.1):  $A = 2$ ,  $B = 20$ ,  $\tau = 20$  s. Pro AC-FP5 jsou použity parametry a hraniční body (pro  $N_{AP-P2}$ ):  $A = 2$ ,  $B = 20$ ,  $\tau = 20$  s. Pro AC-FP15 jsou použity hraniční body:  $A = 2$ ,  $B = 20$ ,  $\tau_1 = \tau_2 = 20$  s pro  $N_{nu-P}$  i pro  $N_{AP-P2}$ . Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ .

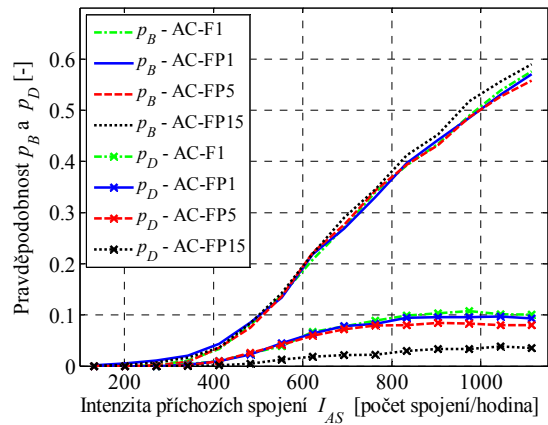
Ze simulací na Obr. 6.18 a Obr. 6.19 je patrné, že algoritmy AC-F1 a AC-FP1 dosahují podobných výsledků. Algoritmus AC-FP5 dosahuje mírně nižší hodnoty  $p_D$  pro datová spojení (ve srovnání s AC-F1 a AC-FP1), ale zároveň nejvyšší hodnoty  $p_B$  pro hlasová spojení. Algoritmus AC-FP15 dosahuje nejnižších hodnot  $p_D$ . Hodnoty  $p_B$  jsou srovnatelné s ostatními algoritmy. Z toho pohledu se AC-FP15 jeví jako nejlepší.



## 6. Simulace AC algoritmů s predikcí a automatickou regulací

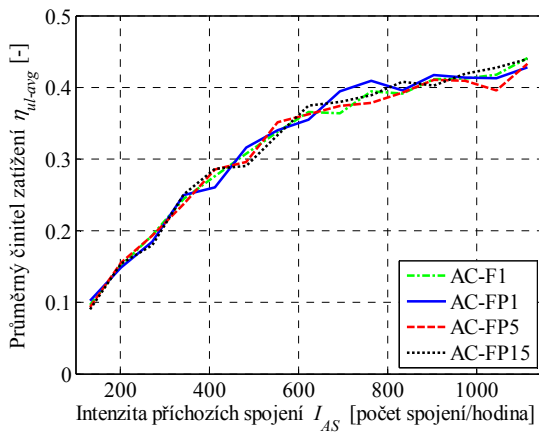


**Obr. 6.18** Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení

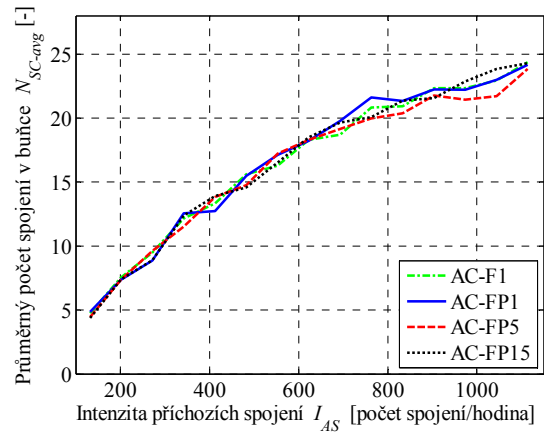


**Obr. 6.19** Srovnání několika algoritmů pro datová spojení

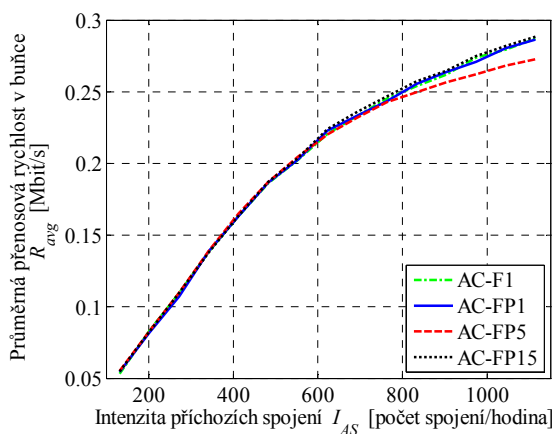
Na Obr. 6.20 a Obr. 6.21 je znázorněn průměrný činitel zatížení pro uplink a průměrný počet spojení v buňce. Algoritmy dosahují srovnatelných hodnot  $\eta_{ul-avg}$ ,  $N_{SC-avg}$  i  $R_{avg}$  (Obr. 6.22).



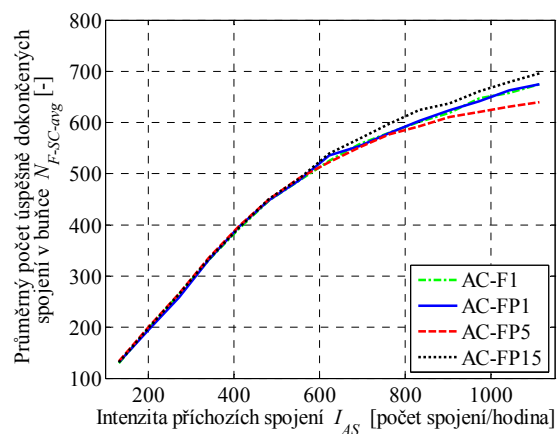
**Obr. 6.20** Srovnání průměrných činitelů zatížení



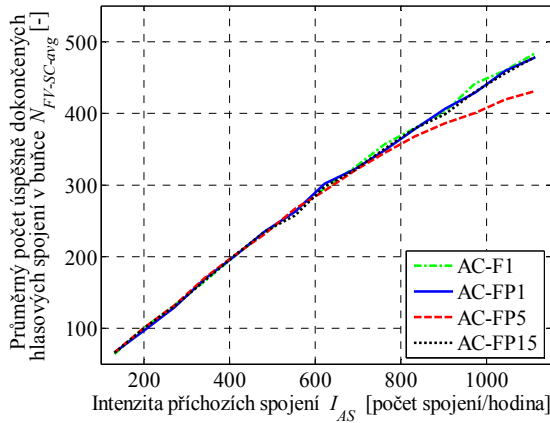
**Obr. 6.21** Srovnání průměrného počtu spojení



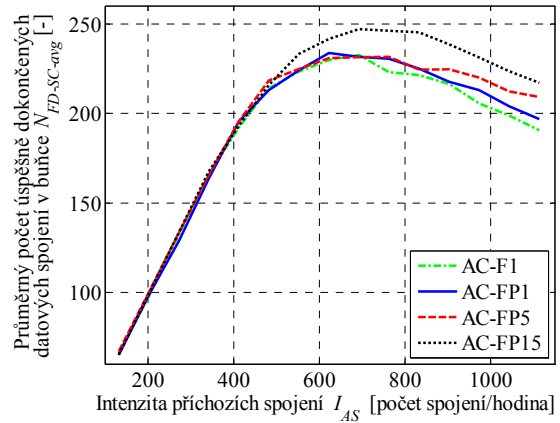
**Obr. 6.22** Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy



**Obr. 6.23** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce



**Obr. 6.24** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce



**Obr. 6.25** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce

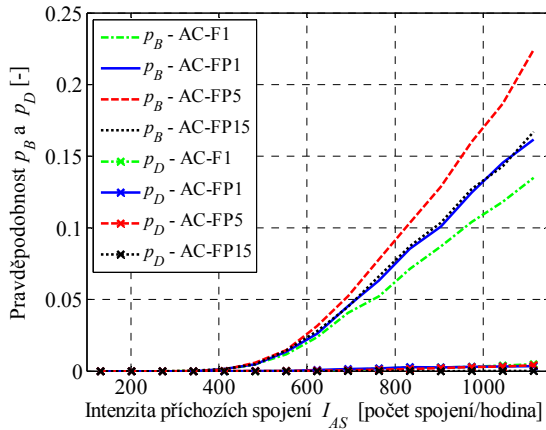
Na Obr. 6.23 až Obr. 6.25 jsou znázorněny průměrné počty úspěšně dokončených spojení v buňce. Algoritmus AC-F15 dosahuje největšího počtu dokončených spojení, největšího počtu dokončených datových spojení a zároveň srovnatelného počtu dokončených hlasových spojení.

### Simulace pro převažující hlasová nebo datová spojení

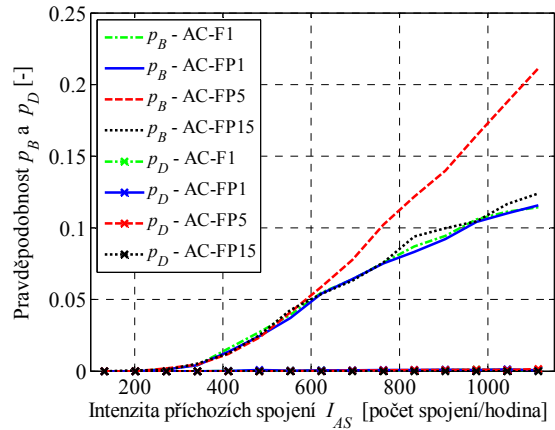
Na Obr. 6.26 až Obr. 6.39 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-F1, AC-FP1, AC-FP5 a AC-FP15. Simulace srovnávají dvě situace - při převaze hlasových a při převaze datových spojení v systému. Parametry simulace:  $T_{sim} = 60$  minut,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 10$ . Rozhodovací prahy, hraniční body funkcí pro zpracování vstupních proměnných a ostatní nastavení jsou stejné, jako u výše uvedené simulace pro základní srovnání algoritmů. V případě převahy hlasových spojení byla generovaná spojení s pravděpodobností 0,75 hlasová, s pravděpodobností 0,25 datová. V případě převahy datových spojení byla generovaná spojení s pravděpodobností 0,25 hlasová a s pravděpodobností 0,75 datová.

Na Obr. 6.26 až Obr. 6.29 je srovnání  $p_B$  a  $p_D$  pro různé typy převládajících spojení. Při srovnání simulací na Obr. 6.26, Obr. 6.28, Obr. 6.18 a Obr. 6.19 lze pozorovat změny  $p_B$  a  $p_D$  v případě převažujících hlasových spojení. Pro hlasová spojení dochází ke zvýšení  $p_B$  u všech algoritmů. Hodnoty  $p_D$  jsou srovnatelné s Obr. 6.18. U algoritmu AC-L hodnoty  $p_B$  a  $p_D$  dokonce mírně poklesly. U datových spojení došlo k mírnému nárůstu  $p_D$  u AC-F1.

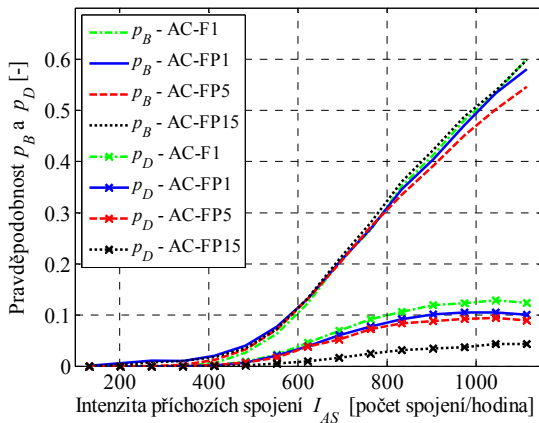
Při srovnání simulací na Obr. 6.27, Obr. 6.29, Obr. 6.18 a Obr. 6.19 lze pozorovat změny  $p_B$  a  $p_D$  v případě převažujících datových spojení. Pro hlasová spojení dochází ke snížení  $p_B$  u algoritmů AC-FP1 a AC-FP15.



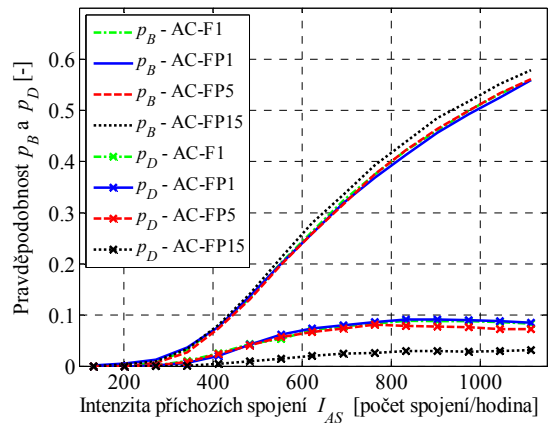
Obr. 6.26 Srovnání algoritmu pro hlasová spojení – převaha hlasových spojení



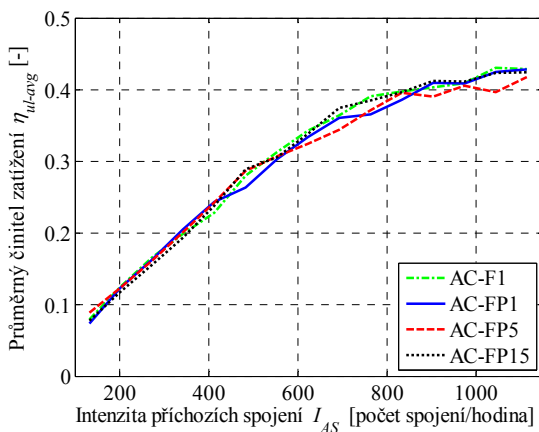
Obr. 6.27 Srovnání algoritmu pro hlasová spojení – převaha datových spojení



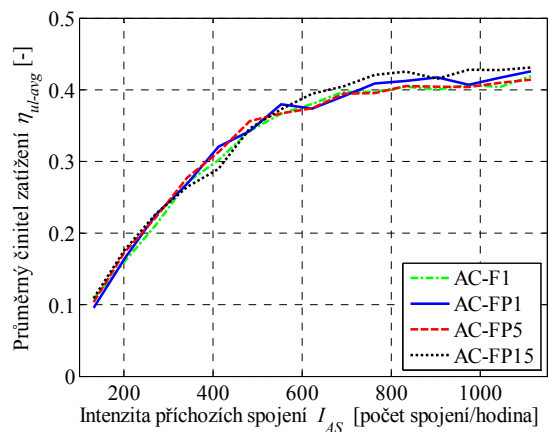
Obr. 6.28 Srovnání algoritmu pro datová spojení – převaha hlasových spojení



Obr. 6.29 Srovnání algoritmu pro datová spojení – převaha datových spojení

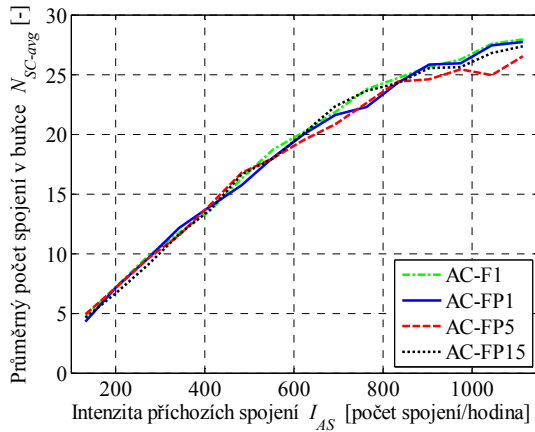


Obr. 6.30 Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha hlasových spojení

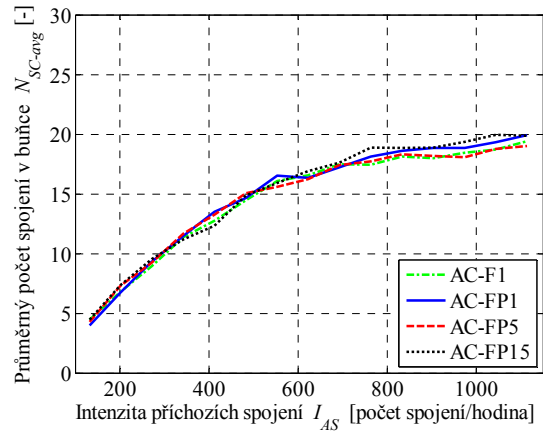


Obr. 6.31 Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha datových spojení

Na Obr. 6.30 až Obr. 6.39 jsou, mimo jiné, zobrazeny průměrné počty úspěšně dokončených spojení (v centrálních buňkách systému) pro jednotlivé algoritmy. Ze simulací je patrné, že v případě převahy datových spojení je celkový počet spojení v systému nižší (Obr. 6.33), než v případě převahy hlasových spojení (Obr. 6.32). Tato situace koresponduje s (2.15).

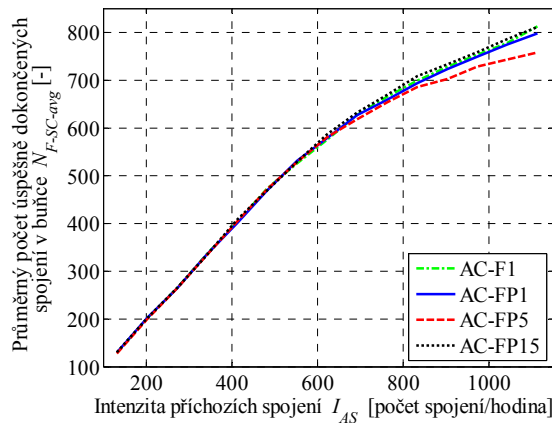


**Obr. 6.32** Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha hlasových spojení

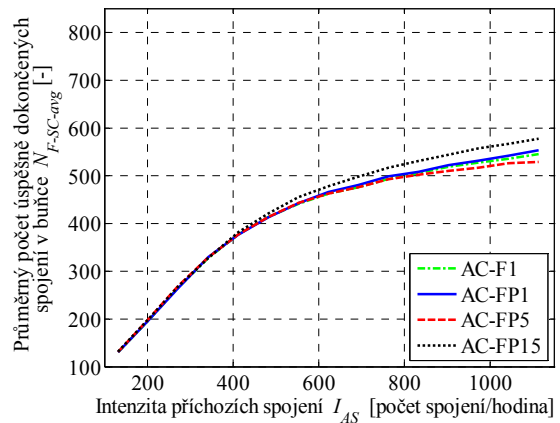


**Obr. 6.33** Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha datových spojení

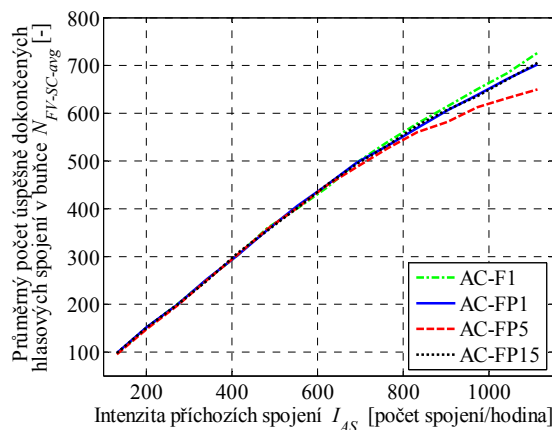
Na Obr. 6.34 až Obr. 6.39 jsou zobrazeny průměrné počty úspěšně dokončených spojení (v centrálních buňkách systému) pro jednotlivé algoritmy. Simulace odpovídají předpokladům, lze pozorovat měnící se počty spojení obou typů v systému pro oba případy. V případě převahy datových spojení (Obr. 6.39) dosahuje AC-FP15 nejvyššího počtu úspěšně dokončených datových spojení. Počet dokončených hlasových spojení je pro AC-FP15 zároveň srovnatelný s AC-F1 a AC-FP1 (Obr. 6.37).



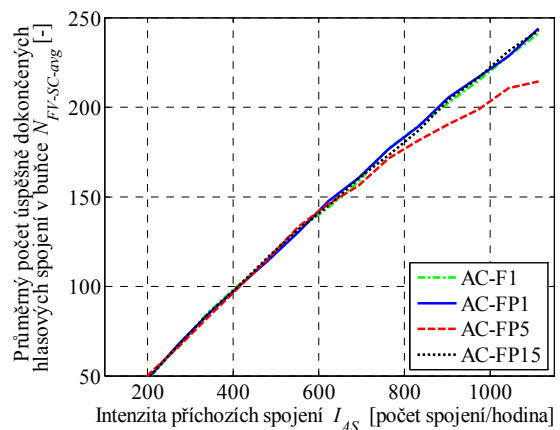
**Obr. 6.34** Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha hlasových spojení



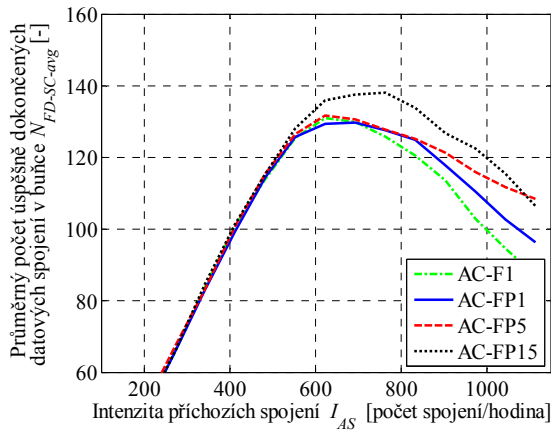
**Obr. 6.35** Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha datových spojení



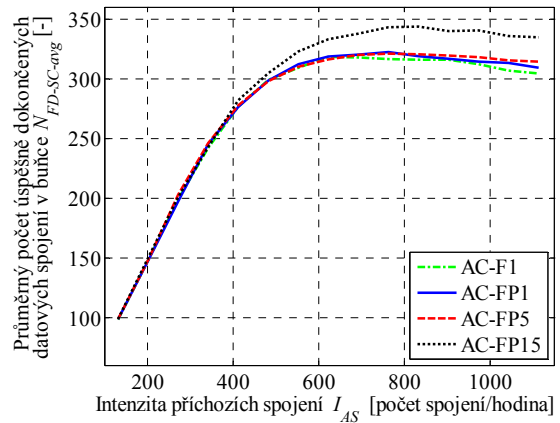
**Obr. 6.36** Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha hlasových spojení



**Obr. 6.37** Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha datových spojení



Obr. 6.38 Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha hlasových spojení



Obr. 6.39 Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha datových spojení

## 6.4 Simulace algoritmů s automatickou regulací

V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací pro algoritmy, definované v kapitole 5.4.

### 6.4.1 Automatická regulace $p_D$

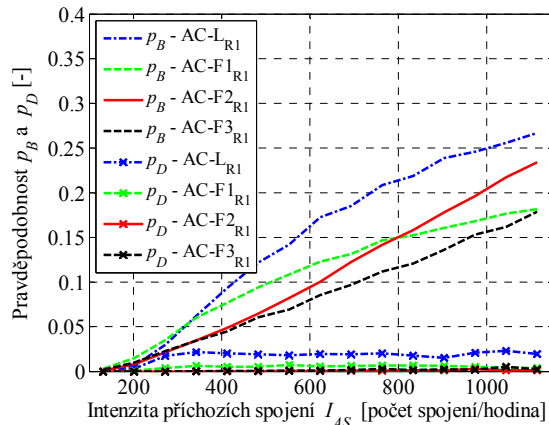
V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3 v případě použití automatické regulace  $p_D$ , viz kapitola 5.4.1. Algoritmy, upravené podle kapitoly 5.4.1, budou dále (pro odlišení) označeny **AC-L<sub>R1</sub>**, **AC-F1<sub>R1</sub>**, **AC-F2<sub>R1</sub>** a **AC-F3<sub>R1</sub>**.

Na Obr. 6.40 až Obr. 6.53 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L<sub>R1</sub>, AC-F1<sub>R1</sub>, AC-F2<sub>R1</sub>, AC-F3<sub>R1</sub>, AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3. Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy a konstanty:

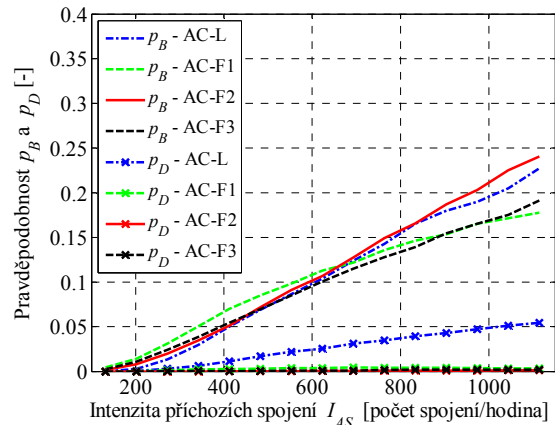
- $F_{thr-VN} = 0,500$ ,  $F_{thr-DN} = 0,499$ ,  $F_{thr-VO} = 0,515$ ,  $F_{thr-DO} = 0,484$ ;  $p_{D-thr1V} = 0,030$ ,  $p_{D-thr2V} = 0,028$ ,  $p_{D-thr1D} = 0,060$ ,  $p_{D-thr2D} = 0,058$ ;  $F_{C-thr-VN-1} = -5 \cdot 10^{-6}$ ,  $F_{C-thr-DN-1} = -5 \cdot 10^{-5}$ ,  $F_{C-thr-VO-1} = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-DO-1} = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-VN-2} = 1 \cdot 10^{-6}$ ,  $F_{C-thr-DN-2} = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-VO-2} = -1 \cdot 10^{-4}$  a  $F_{C-thr-DO-2} = -1 \cdot 10^{-3}$  pro AC-L<sub>R1</sub> (část pro AC-L),
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$ ;  $p_{D-thr1V} = 0,030$ ,  $p_{D-thr2V} = 0,028$ ,  $p_{D-thr1D} = 0,060$ ,  $p_{D-thr2D} = 0,058$ ;  $F_{C-thr-VN-1} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-1} = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-VO-1} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-1} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VN-2} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-2} = -1 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-VO-2} = 1 \cdot 10^{-3}$  a  $F_{C-thr-DO-2} = 1 \cdot 10^{-3}$  pro AC-F1<sub>R1</sub> (AC-F1),
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$ ;  $p_{D-thr1V} = 0,030$ ,  $p_{D-thr2V} = 0,028$ ,  $p_{D-thr1D} = 0,060$ ,  $p_{D-thr2D} = 0,058$ ;  $F_{C-thr-VN-1} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-1} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-1} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-1} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VN-2} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-2} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-2} = 1 \cdot 10^{-3}$  a  $F_{C-thr-DO-2} = 1 \cdot 10^{-3}$  pro AC-F2<sub>R1</sub> (AC-F2),
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$ ;  $p_{D-thr1V} = 0,030$ ,  $p_{D-thr2V} = 0,028$ ,  $p_{D-thr1D} = 0,060$ ,  $p_{D-thr2D} = 0,058$ ;  $F_{C-thr-VN-1} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-1} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-1} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-1} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VN-2} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-2} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-2} = 1 \cdot 10^{-3}$  a  $F_{C-thr-DO-2} = 1 \cdot 10^{-3}$  pro AC-F3<sub>R1</sub> (AC-F3).

Parametry simulací:  $T_{sim} = 60$  min,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 20$ . U této simulace byly použity rozdílné hodnoty bitových rychlostí pro hlasová a datová spojení:  $R_{bit1} = 12,2$  kb/s,  $R_{bit2} = 32,0$  kb/s.

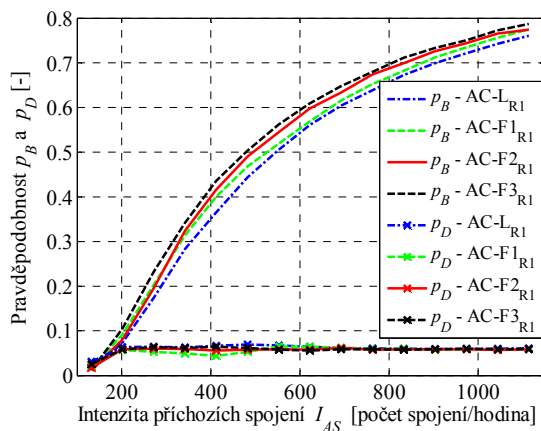
Při srovnání Obr. 6.40 až Obr. 6.43 je patné, že při použití automatické regulace došlo ke snížení  $p_D$  pro všechny algoritmy. Mechanismus automatické regulace udržuje  $p_D$  v okolí předem definované a žádané hodnoty. Nejvýraznější pokles  $p_D$  nastal u datových spojení. Hodnoty  $p_B$  se pro datová spojení zvýšily shodně pro všechny algoritmy. U hlasových spojení byl největší nárůst  $p_B$  pro AC-L<sub>R1</sub>, pro ostatní algoritmy se hodnoty  $p_B$  změnilly pouze nepatrně.



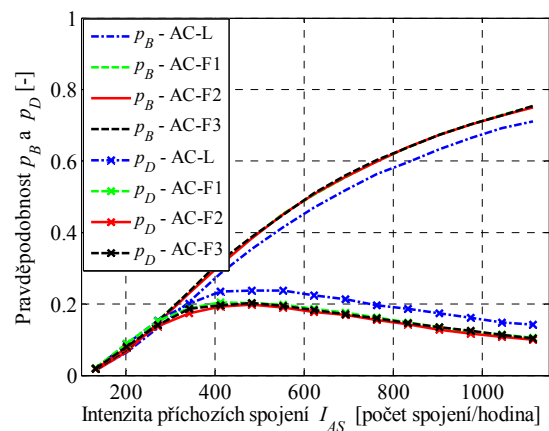
Obr. 6.40 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení – s regulací  $p_D$



Obr. 6.41 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení – bez regulace  $p_D$



Obr. 6.42 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení – s regulací  $p_D$

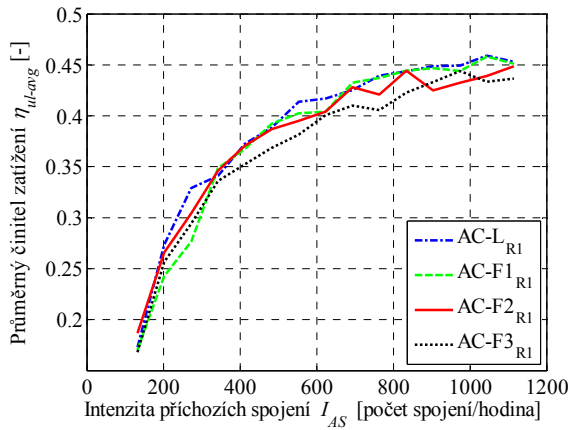


Obr. 6.43 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení – bez regulace  $p_D$

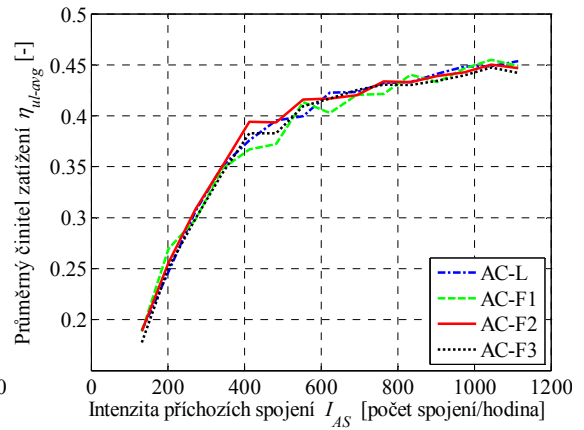
Při srovnání Obr. 6.44 až Obr. 6.47 je patné, že automatická regulace měla pouze minimální vliv na činitele zatížení pro uplink a počty spojení v buňce.

Obr. 6.48 až Obr. 6.53 srovnávají počty úspěšně dokončených spojení v buňce. Nejvýraznější rozdíl je u datových spojení. V případě automatické regulace je jich v systému o cca 10 až 20 % více než bez automatické regulace.

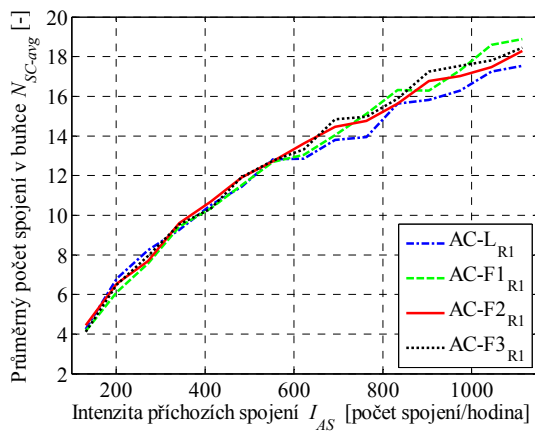
## 6. Simulace AC algoritmů s predikcí a automatickou regulací



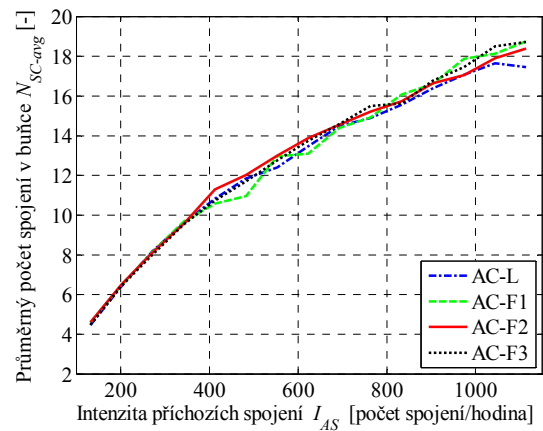
**Obr. 6.44** Srovnání průměrných činitelů zatížení v buňce – s regulací  $p_D$



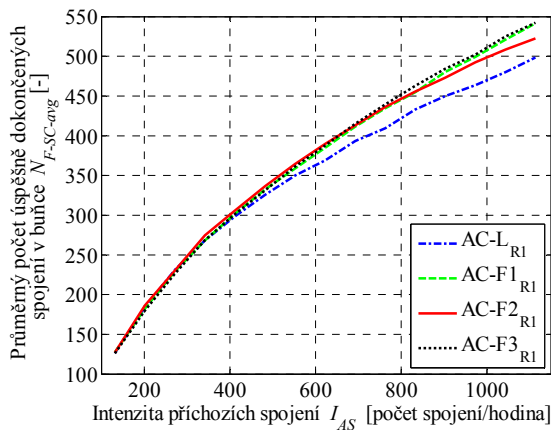
**Obr. 6.45** Srovnání průměrných činitelů zatížení v buňce – bez regulace  $p_D$



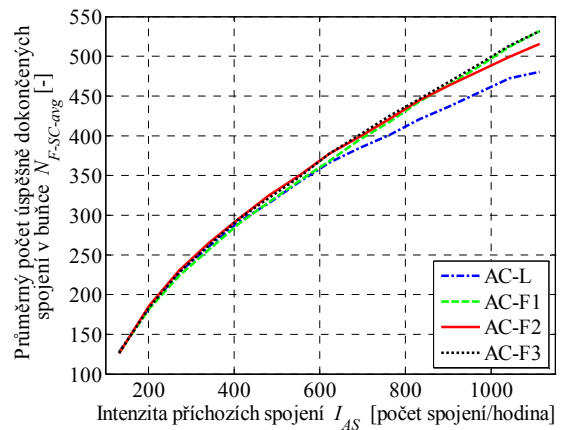
**Obr. 6.46** Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – s regulací  $p_D$



**Obr. 6.47** Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – bez regulace  $p_D$

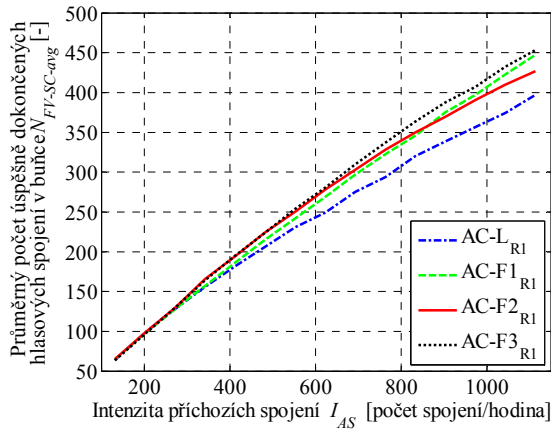


**Obr. 6.48** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – s regulací  $p_D$

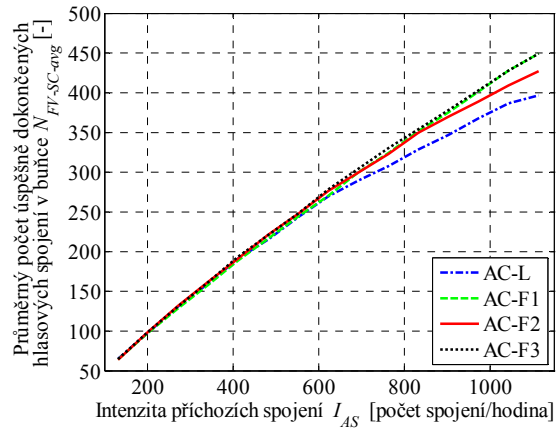


**Obr. 6.49** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – bez regulace  $p_D$

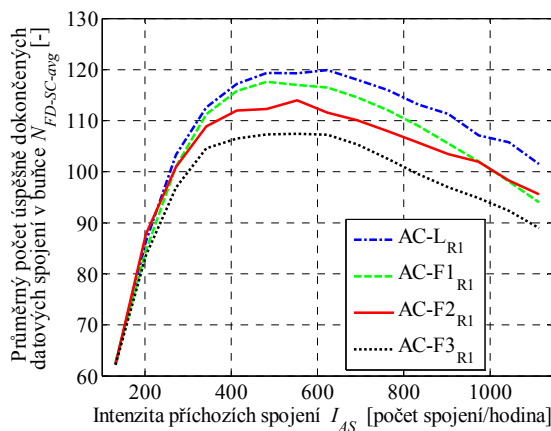
## 6. Simulace AC algoritmů s predikcí a automatickou regulací



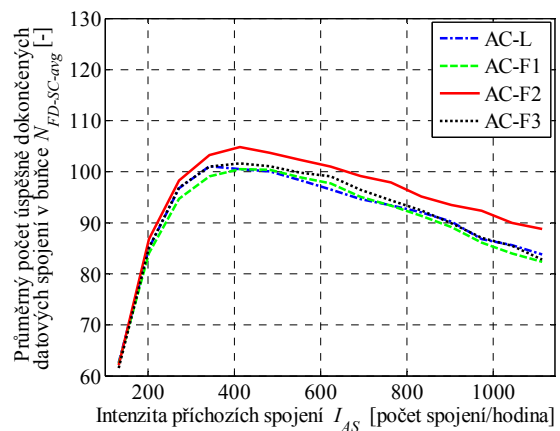
**Obr. 6.50** Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – s regulací  $p_D$



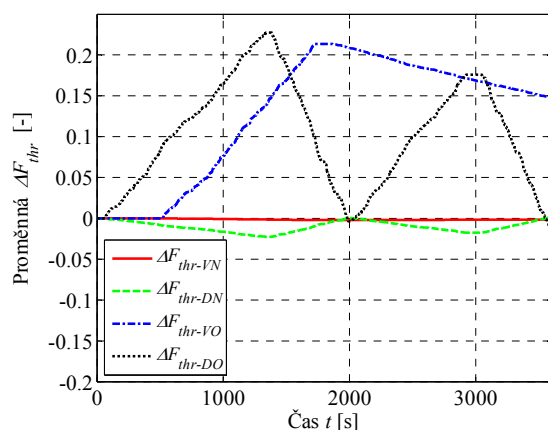
**Obr. 6.51** Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – bez regulace  $p_D$



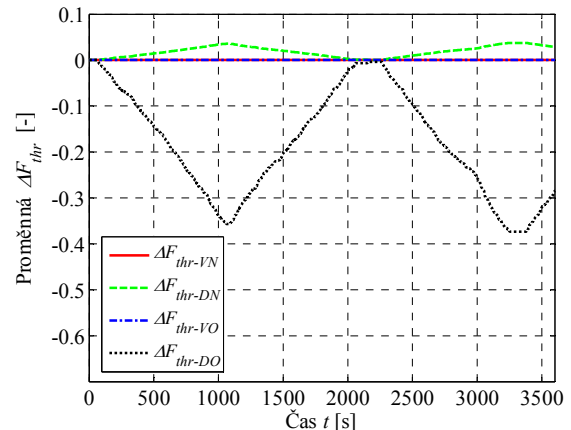
**Obr. 6.52** Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – s regulací  $p_D$



**Obr. 6.53** Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – bez regulace  $p_D$



**Obr. 6.54** Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-L<sub>R1</sub>

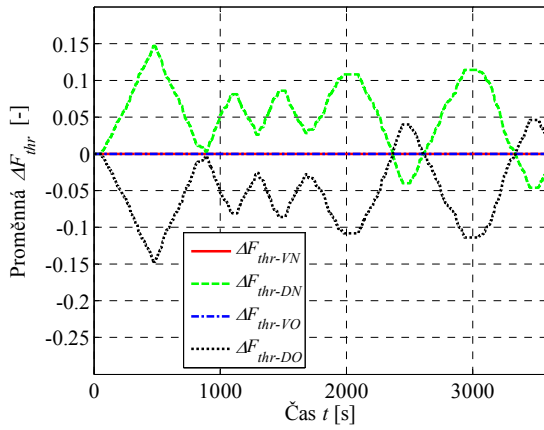


**Obr. 6.55** Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-F1<sub>R1</sub>

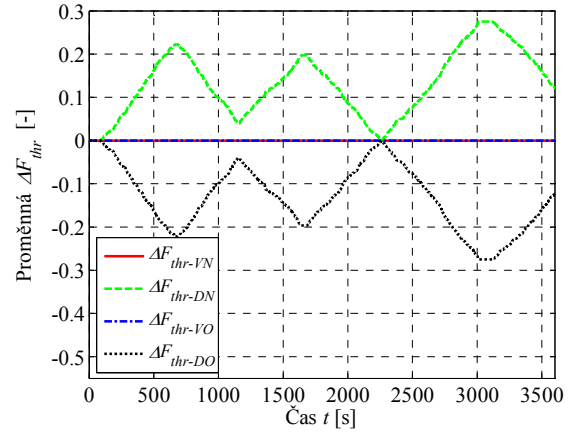
Na Obr. 6.54 až Obr. 6.57 jsou pro ilustraci uvedeny průběhy jednotlivých proměnných  $\Delta F_{thr}$ , (5.4), v čase. Parametry simulace jsou stejné (jsou uvedeny na začátku kapitoly 6.4.1). Intenzita příchozích spojení  $I_{AS} = 800$  spojení/hodina,  $N_{sim} = 1$ . Ze simulací je patrné, že největší vliv pro AC-L<sub>R1</sub> měla automatická regulace na proměnné  $\Delta F_{thr-VO}$  a  $\Delta F_{thr-DO}$ , tedy na existující hlasová a datová spojení.



To koresponduje s výsledky na Obr. 6.40 až Obr. 6.43, kde automatická regulace u AC-L<sub>R1</sub> ovlivnila zejména  $p_D$  (existující spojení). Částečně byla také regulována proměnná  $\Delta F_{thr-DN}$ , pro nová datová spojení. U fuzzy algoritmů měla automatická regulace největší vliv na proměnné  $\Delta F_{thr-DN}$  a  $\Delta F_{thr-DO}$ , tedy na nová a existující datová spojení. K největším výchyilkám došlo u algoritmu AC-F1<sub>R1</sub>. Největší vliv automatické regulace (obecně) je patrný na  $p_D$  (zejména u datových spojení).



Obr. 6.56 Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-F2<sub>R1</sub>



Obr. 6.57 Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-F3<sub>R1</sub>

### 6.4.2 Automatická regulace $p_B$ a $p_D$

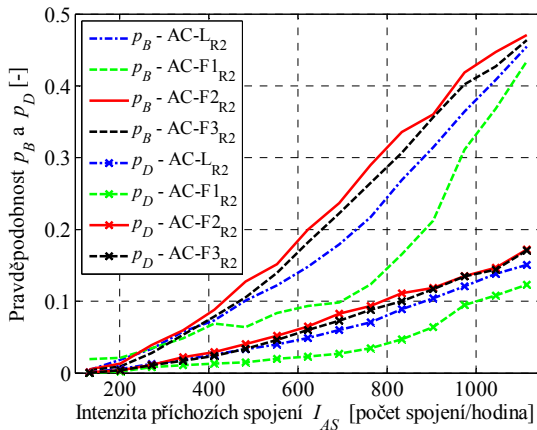
V této kapitole jsou uvedeny výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2 a AC-F3 v případě použití automatické regulace  $p_B$  a  $p_D$ , viz kapitola 5.4.2. Algoritmy, upravené podle kapitoly 5.4.2, budou dále (pro odlišení) označeny AC-L<sub>R2</sub>, AC-F1<sub>R2</sub>, AC-F2<sub>R2</sub> a AC-F3<sub>R2</sub>.

Na Obr. 6.58 až Obr. 6.71 jsou výsledky simulací, srovnávající algoritmy AC-L<sub>R2</sub>, AC-F1<sub>R2</sub>, AC-F2<sub>R2</sub> a AC-F3<sub>R2</sub> pro dvě hodnoty  $\beta$  ( $\beta = 3$  a  $\beta = 4$ ), viz (5.6). Pro simulace byly použity následující rozhodovací prahy a konstanty:

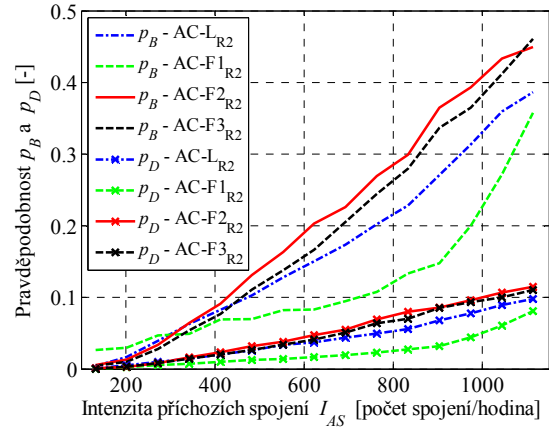
- $F_{thr-VN} = 0,500$ ,  $F_{thr-DN} = 0,499$ ,  $F_{thr-VO} = 0,515$ ,  $F_{thr-DO} = 0,484$ ;  $F_{C-thr-VN-h} = -5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-DN-h} = -5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-VO-h} = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-DO-h} = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-VN-l} = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $F_{C-thr-DN-l} = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $L_{C-thr-VO-l} = -5 \cdot 10^{-4}$  a  $F_{C-thr-DO-l} = -5 \cdot 10^{-4}$  pro AC-L<sub>R2</sub>,
- $F_{thr-VN} = 0,55$ ,  $F_{thr-DN} = 0,60$ ,  $F_{thr-VO} = 0,25$ ,  $F_{thr-DO} = 0,30$ ;  $F_{C-thr-VN-h} = 1 \cdot 10^{-2}$ ,  $F_{C-thr-DN-h} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-h} = -1,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $F_{C-thr-DO-h} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VN-l} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-l} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-l} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-l} = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\eta_{ul-thr} = 0,52$ ,  $\Delta F_{C-thr} = 1 \cdot 10^{-3}$  pro AC-F1<sub>R2</sub>,
- $F_{thr-VN} = 0,45$ ,  $F_{thr-DN} = 0,50$ ,  $F_{thr-VO} = 0,15$ ,  $F_{thr-DO} = 0,20$ ;  $F_{C-thr-VN-h} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-h} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-h} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-h} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VN-l} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-l} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-l} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-l} = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\eta_{ul-thr} = 0,55$ ,  $\Delta F_{C-thr} = 5 \cdot 10^{-2}$  pro AC-F2<sub>R2</sub>,
- $F_{thr-VN} = 0,50$ ,  $F_{thr-DN} = 0,55$ ,  $F_{thr-VO} = 0,20$ ,  $F_{thr-DO} = 0,25$ ;  $F_{C-thr-VN-h} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-h} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-h} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-h} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VN-l} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DN-l} = -1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-VO-l} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $F_{C-thr-DO-l} = 1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\eta_{ul-thr} = 0,45$ ,  $\Delta F_{C-thr} = 5 \cdot 10^{-2}$  pro AC-F3<sub>R2</sub>.

Parametry simulací:  $T_{sim} = 60$  min,  $T_{iter} = 200$  ms,  $N_{sim} = 30$ . U této simulace byly použity rozdílné hodnoty bitových rychlostí pro hlasová a datová spojení:  $R_{bit1} = 12,2$  kb/s,  $R_{bit2} = 32,0$  kb/s.

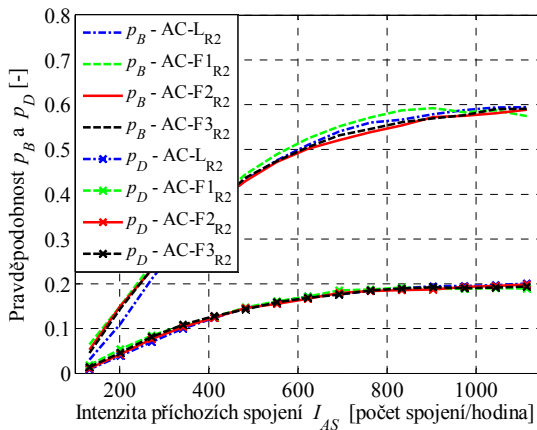
Při srovnání Obr. 6.58 až Obr. 6.61 (a také Obr. 6.41 a Obr. 6.43) je patné, že při použití automatické regulace došlo k výraznému ovlivnění hodnot  $p_D$  a  $p_B$ . U datových spojení došlo k poklesu  $p_B$  (při srovnání s Obr. 6.43) pro všechny algoritmy. U hlasových spojení došlo k nárůstu  $p_D$  i  $p_B$ . Cílem algoritmů není minimalizovat  $p_D$ , ale udržet konstantní poměr mezi  $p_B$  a  $p_D$ , (5.6). Algoritmus AC-F1<sub>R2</sub> dosahuje nejnižších hodnot  $p_B$  a  $p_D$  pro hlasová spojení a pouze mírně vyšších hodnot  $p_B$  pro spojení datová.



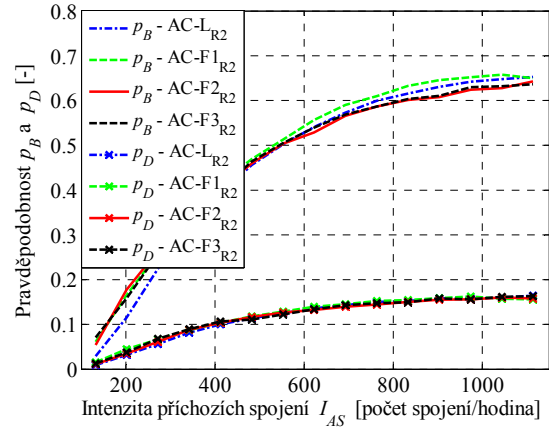
Obr. 6.58 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení,  $\beta = 3$



Obr. 6.59 Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení,  $\beta = 4$



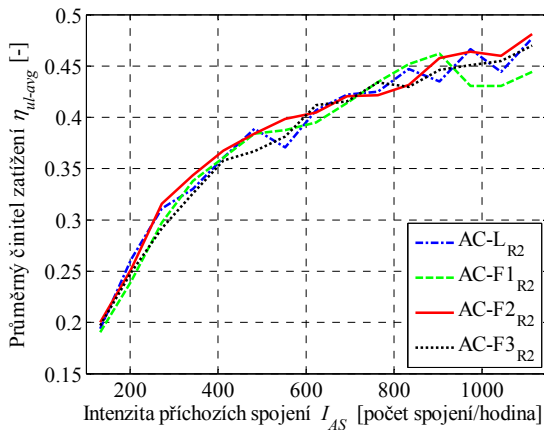
Obr. 6.60 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení,  $\beta = 3$



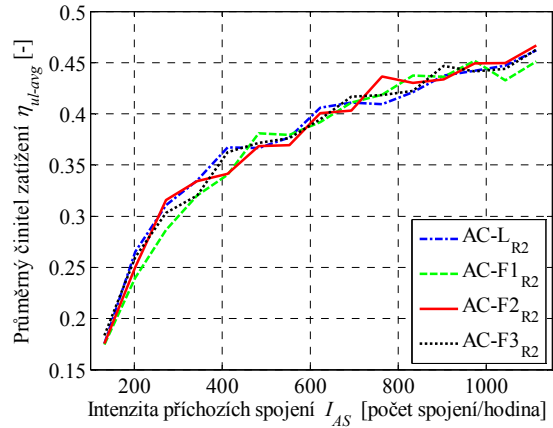
Obr. 6.61 Srovnání několika algoritmů pro datová spojení,  $\beta = 4$

Při srovnání Obr. 6.62 až Obr. 6.65, Obr. 6.45 a Obr. 6.47 je patné, že automatická regulace měla pouze minimální vliv na činitele zatížení pro uplink, ale ovlivnila počet spojení v systému. Počet spojení v systému je v případě regulace  $p_B$  a  $p_D$  nižší. S rostoucí intenzitou příchozích spojení,  $I_{AS}$ , tento počet pro AC-F1<sub>R2</sub> dokonce klesá. Vysvětlení lze nalézt na Obr. 6.66 až Obr. 6.71. Při vysoké intenzitě příchozích spojení začínají algoritmy částečně preferovat datová spojení. Počet úspěšně dokončených datových spojení mírně narůstá. Nejvýraznější nárůst je pro algoritmy AC-L<sub>R2</sub> a AC-F1<sub>R2</sub> (Obr. 6.70 a Obr. 6.71). Počet úspěšně dokončených hlasových spojení s rostoucí intenzitou příchozích spojení klesá (Obr. 6.68 a Obr. 6.69). Důvodem

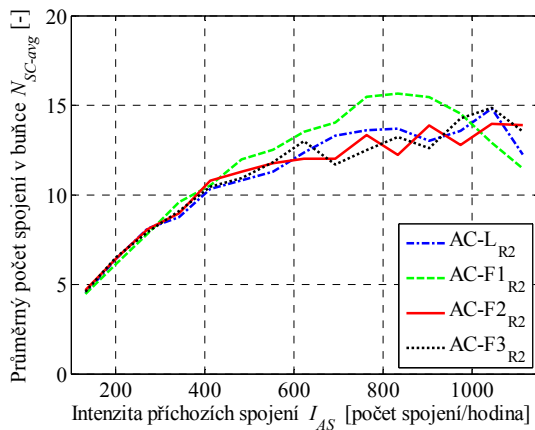
je automatická regulace prahových hodnot, která ovlivňuje nastavení priorit pro jednotlivé typy spojení.



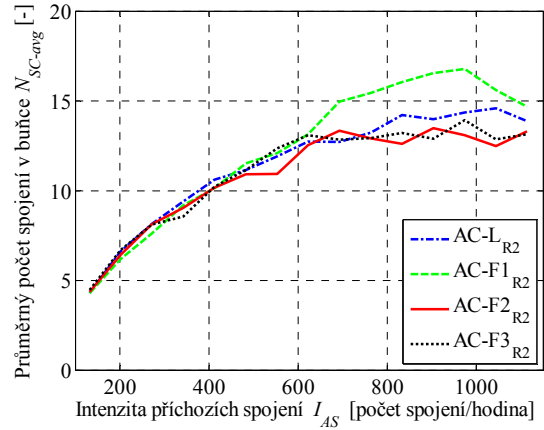
Obr. 6.62 Srovnání průměrných činitelů zatížení,  $\beta = 3$



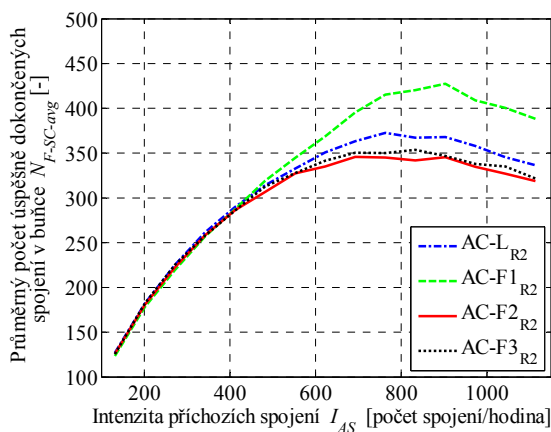
Obr. 6.63 Srovnání průměrných činitelů zatížení,  $\beta = 4$



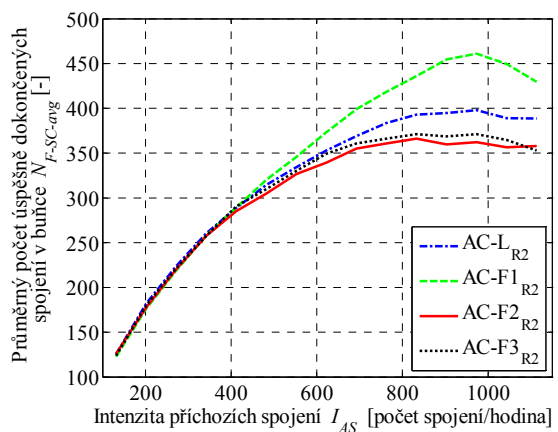
Obr. 6.64 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce,  $\beta = 3$



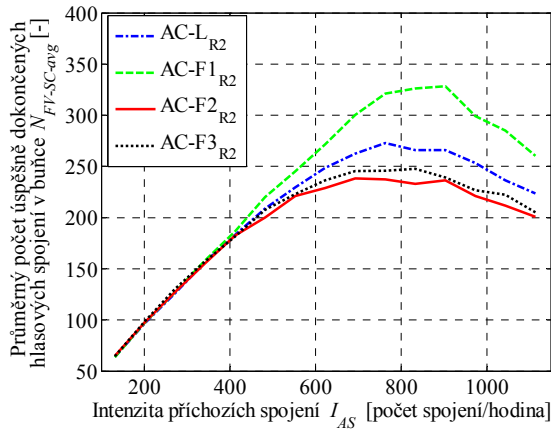
Obr. 6.65 Srovnání průměrného počtu spojení v buňce,  $\beta = 4$



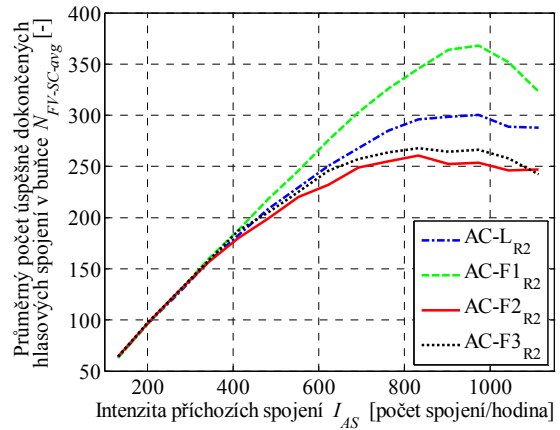
Obr. 6.66 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce,  $\beta = 3$



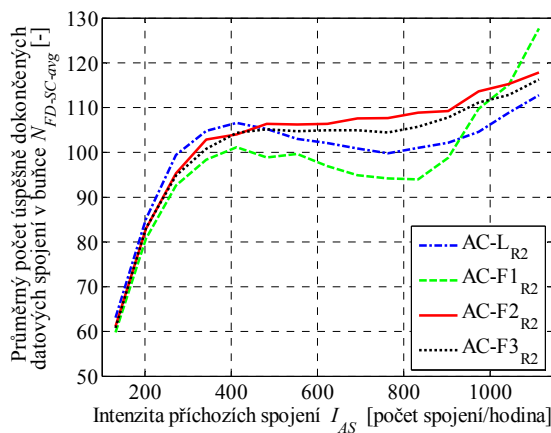
Obr. 6.67 Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce,  $\beta = 4$



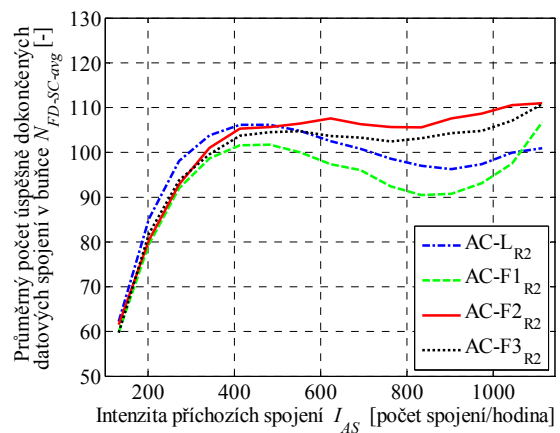
**Obr. 6.68** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce,  $\beta = 3$



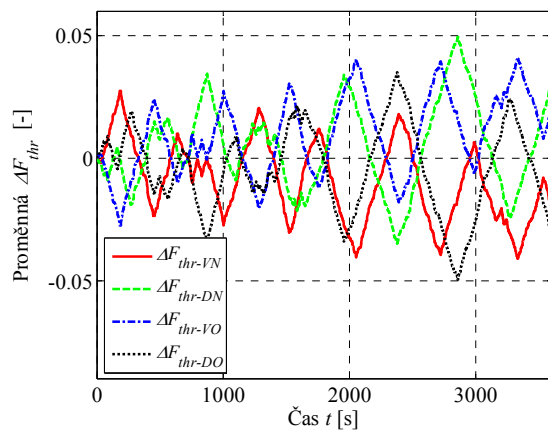
**Obr. 6.69** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce,  $\beta = 4$



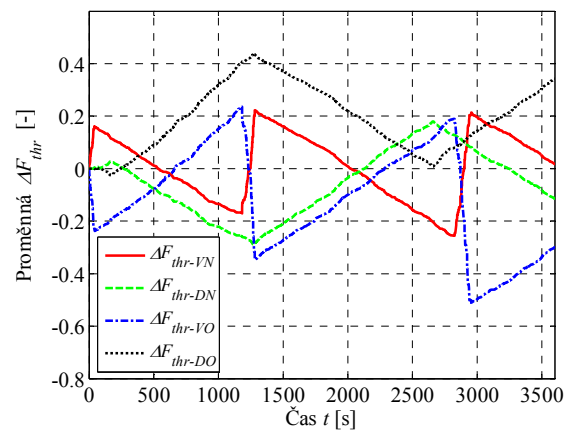
**Obr. 6.70** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce,  $\beta = 3$



**Obr. 6.71** Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce,  $\beta = 4$



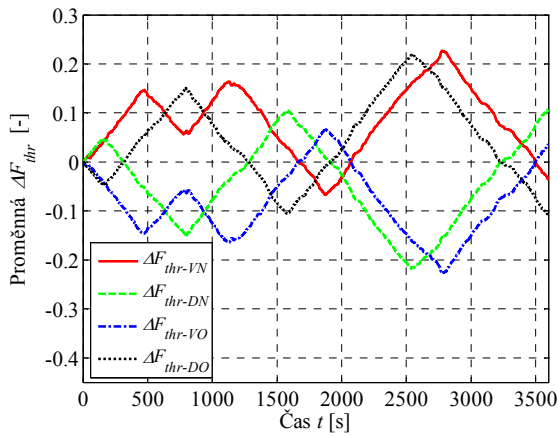
**Obr. 6.72** Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-L<sub>R2</sub>,  $\beta = 3$



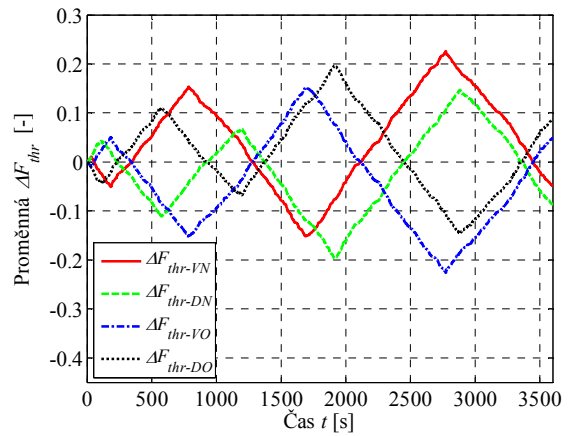
**Obr. 6.73** Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-F1<sub>R2</sub>,  $\beta = 3$

Na Obr. 6.72 až Obr. 6.75 jsou pro ilustraci uvedeny průběhy jednotlivých proměnných  $\Delta F_{thr}$ , viz (5.4), v čase. Parametry simulace jsou stejné (jsou uvedeny na začátku kapitoly 6.4.2). Intenzita příchozích spojení  $I_{AS} = 800$  spojení/hodina,  $N_{sim} = 1$ . U simulací v kapitole 6.4.1 měla automatická regulace vliv převážně na proměnné  $\Delta F_{thr-DN}$  a  $\Delta F_{thr-DO}$ . U automatické regulace  $p_B$  a  $p_D$  měla tato regulace vliv na všechny

4 proměnné:  $\Delta F_{thr-VN}$ ,  $\Delta F_{thr-DN}$ ,  $\Delta F_{thr-VO}$  a  $\Delta F_{thr-DO}$ . K nejmenším výchylkám došlo u algoritmu AC-L<sub>R2</sub> ( $\Delta F_{thr}$  má u AC-L<sub>R2</sub> odlišný význam než u fuzzy algoritmů). K největším výchylkám došlo u algoritmu AC-F1<sub>R2</sub>.



Obr. 6.74 Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-F2<sub>R2</sub>,  $\beta = 3$



Obr. 6.75 Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro AC-F3<sub>R2</sub>,  $\beta = 3$

## 6.5 Závěr

V této kapitole byly prezentovány výsledky simulací algoritmů, uvedených v kapitole 5. Jednotlivé algoritmy byly vzájemně porovnány. Bylo provedeno několik simulací srovnávající algoritmy AC-L, AC-F1, AC-F2, AC-F3, AC-FP1, AC-FP2, AC-FP3, AC-FP4, AC-FP5, AC-FP15, AC-L<sub>R1</sub>, AC-F1<sub>R1</sub>, AC-F2<sub>R1</sub>, AC-F3<sub>R1</sub>, AC-L<sub>R2</sub>, AC-F1<sub>R2</sub>, AC-F2<sub>R2</sub> a AC-F3<sub>R2</sub>.

Byly provedeny simulace pro algoritmy s predikcí pohybu UEs. Z těchto algoritmů se jako nejvýhodnější jeví AC-FP1. Algoritmy s predikcí pohybu byly prezentovány např. v [54].

Dále byly provedeny simulace pro algoritmy s predikcí provozu v síti. Z těchto algoritmů vykazuje nejlepší vlastnosti algoritmus AC-FP4, případně AC-FP5. Výsledky byly prezentovány v [59].

Kapitola obsahuje také srovnání vybraných algoritmů (AC-F1, AC-FP1, AC-FP5), které se v předchozích simulacích jeví jako úspěšné, a algoritmu AC-FP15, který je kombinací AC-FP1 a AC-FP5. Výsledky byly prezentovány v [59].

Kapitola také obsahuje simulace, demonstrující možnost automatické regulace parametrů AC algoritmů. U simulací s automatickou regulací  $p_D$  vykazovaly nejlepší vlastností algoritmy AC-F1 a AC-F3. V případě automatické regulace  $p_B$  a  $p_D$  vykazuje nejlepší vlastnosti algoritmus AC-F1. Výsledky pro případ automatické regulace byly prezentovány v [58].

## 7 Závěrečné shrnutí a doporučení

Mezi základní úkoly řízení přístupu do sítě (RRM funkcí obecně) patří maximalizace využití sítě při dostatečné QoS a QoE (Quality of user Experience). Maximální využití sítě zvyšuje zisk operátora, zároveň je však nutné zajistit určitý stupeň subjektivní (QoE) i objektivní (QoS) kvality spojení, kterou vnímají uživatelé. Algoritmy pro řízení přístupu do sítě udržují tyto protichůdné požadavky na úrovni, která je přijatelná pro uživatele i operátora. V dizertační práci bylo prezentováno a simulováno několik verzí AC algoritmů.

Algoritmus AC-L, založený na výpočtu činitele zatížení, je relativně jednoduchý algoritmus. Po rozšíření (např. [41], [42]) je však schopný vykonávat AC (a garantovat různou prioritu pro různé typy spojení) i v případě několika typů spojení v systému. V kapitole 4.1.3 je ukázka pro 4 různé typy spojení.

Fuzzy algoritmy (kapitola 3.2) jsou sice výpočetně náročnější, umožňují však zpracovat více systémových informací a (ve srovnání s AC-L) umožní snížit zejména pravděpodobnost přerušení spojení  $p_D$ , případně i pravděpodobnost odmítnutí spojení  $p_B$ . Jak ukazují výsledky simulací v kapitole 4.1.3, jednotlivé algoritmy jsou schopny se vypořádat s různými situacemi v síti. Např. v případě převahy datových spojení (Obr. 4.53) vykazují fuzzy algoritmy větší počet úspěšně dokončených datových spojení než AC-L. Fuzzy algoritmy lze rovněž jednoduše přizpůsobit pro případ více typů spojení v systému.

U genetických algoritmů (kapitola 4.2.1) bylo problematické nastavit různé priority pro dva simulované typy spojení. Simulované genetické algoritmy byly značně výpočetně náročné (dlouho trvající simulace) a vykazovaly relativně velké kolísání činitele zatížení pro uplink i kolísání počtu spojení v buňce.

U zkoumaných algoritmů s predikcí pohybu UEs se ukázalo (kapitola 6.1), že algoritmus AC-FP1 (s jednoduchou lineární predikcí) dosahuje obdobných výsledků jako AC-FP2 a AC-FP3 (složitější predikce pohybu), a zároveň dosahuje lepších výsledků, než algoritmy bez predikce polohy UEs v síti. Algoritmy s predikcí provozu v síti (kapitola 6.2) také dosahují lepších výsledků než algoritmy bez predikce, příkladem je algoritmus AC-FP5. Sloučením algoritmů AC-FP1 a AC-FP5 byl navržen a vytvořen algoritmus AC-FP15, který využívá lineární predikci pohybu UEs a také predikci provozu v síti. Algoritmus dosahuje (ve srovnání s AC-F1, AC-FP1 a AC-FP5) velmi dobrých výsledků (kapitola 6.3).

V poslední části práce jsou prezentovány dva možné příklady automatické regulace parametrů AC algoritmů podle stavu v systému (kapitola 6.4). Simulace ukazují, že obě metody umožní dosáhnout požadovaných hodnot  $p_B$  a  $p_D$ .

Poznatky a doporučení pro AC algoritmy (RRM funkce):

- Algoritmy je dobré vyzkoušet pro různá nastavení a různé stavy v síti. U algoritmů AC-F1 až AC-F3 bylo např. potřeba provést jednoduché ošetření pro případ extrémního počtu přichozích spojení v síti.

- Jednoduché algoritmy mohou vykazovat stejné, případně i lepší výsledky než jejich složitější verze. Příkladem může být AC-F1 nebo také AC-FP1, který využívá pouze lineární predikci pohybu UEs.
- Simulace vytvořených genetických algoritmů byly časově velmi náročné. U těchto algoritmů bylo navíc problematické nastavit různé priority pro různé třídy spojení, a také počet uživatelů v systému (v buňce) značně kolísal.
- V kapitole 6.4 byly prezentovány dva možné způsoby automatické regulace AC algoritmů. Ukazuje se, že automatická regulace může narušit nastavení priorit pro jednotlivé typy spojení (kapitola 6.4.2). Tuhle skutečnost by případně bylo nutné ošetřit.
- Jednoduchá funkce pro řízení zahlcení sítě CC značně zvyšuje hodnoty  $p_D$ . Pro omezení tohoto nežádoucího nárůstu by bylo vhodné použít CC, která by místo přerušení spojení snížila přenosové rychlosti vybraných spojení, případně zohledňovala různé priority a různé třídy spojení v systému.

## 8 Závěr

Vývoj, optimalizace a ověřování funkcí pro správu rádiových prostředků v mobilních sítích patří, v současné době, k aktuálním tématům. Jejich společným cílem je optimální využití rádiových prostředků mobilních systémů, zajištění požadované kvality spojení a maximální využití kapacity sítě.

Dizertační práce se zabývá metodami pro řízení přístupu do CDMA sítí. Cílem této dizertační práce bylo vytvoření modelu systému UMTS, simulace a ohodnocení několika konkrétních algoritmů pro řízení přístupu. Na základě simulací byla shrnuta některá doporučení.

Kapitola 2 se detailně zabývá popisem a principem činnosti vytvořeného UMTS simulátoru. V kapitole je popsána činnost vlastního UMTS modelu a také způsob implementace jednotlivých algoritmů, nejen pro řízení přístupu.

Ve třetí kapitole jsou podrobněji popsány jednotlivé algoritmy pro řízení přístupu. Je zde detailněji popsán a vysvětlen princip jejich činnosti. Je zde uveden algoritmus pracující s použitím činitele zatížení, několik algoritmů využívajících fuzzy logiku a také genetické algoritmy.

Čtvrtá kapitola obsahuje výsledky simulací, které srovnávají a zhodnocují jednotlivé algoritmy, popsané v předchozí kapitole. Kapitola obsahuje velké množství simulací pro nejrůznější nastavení systému a vlastních spojení.

V páté kapitole jsou prezentovány algoritmy, které jsou rozšířením algoritmů z kapitoly 3. Algoritmy jsou doplněny o predikci pohybu UEs, o predikci provozu v síti a také o automatickou regulaci některých parametrů.

Šestá kapitola obsahuje výsledky simulací, které srovnávají a zhodnocují jednotlivé algoritmy, popsané v předchozí kapitole. Kapitola obsahuje také simulace navrženého algoritmu AC-FP15.

Sedmá kapitola obsahuje závěrečné shrnutí, týkající se převážně simulačních výsledků.

Za klíčové výsledky dizertační práce lze považovat vytvoření modelu UMTS pro simulaci řízení přístupu (RRM funkcí) do sítě a navržení algoritmu AC-FP15. Vytvořený simulační program umožňuje simulovat a zkoumat vlastnosti některých RRM algoritmů a dále umožňuje sledovat vybrané parametry v síti. Jádro programu lze využít pro simulace libovolné celulární sítě. Navržený algoritmus AC-FP15 dosahuje, ve srovnání s (některými vybranými) ostatními algoritmy, nízkých hodnot  $p_D$  a srovnatelných hodnot  $p_B$ . Zároveň dosahuje obdobný (nebo vyšší) počet dokončených spojení v buňce, obdobné hodnoty činitele zatížení, počet spojení v buňce apod.

Problematika řízení přístupu do sítě (funkcí pro správu rádiových prostředků) je značně rozsáhlá. Další práce v této oblasti by mohla být zaměřena na rozšíření vytvořeného modelu i na rozšíření jednotlivých algoritmů pro řízení přístupu do sítě. Model by mohl být doplněn a rozšířen např. o sektorizaci buněk, uvažování většího počtu různých tříd spojení apod. Model by mohl být také rozšířen o buňky různého typu



(mikrobuňky, buňky deštníkového typu) a řízení přístupu by následně mohlo být rozšířeno o výběr servisní buňky, případně o výběr mezi technologiemi (např. GSM, UMTS apod.). Významným rozšířením by bylo doplnění mapování kanálů a jiných procedur, např. pro HSPA+. Jednotlivé algoritmy pro řízení přístupu by mohly být také rozšířeny a mohla by být zkoumána např. jejich činnost pro chybné měření (vyhodnocení) některých systémových parametrů (zatížení sítě apod.).

Výsledky dizertační práce byly publikovány na několika odborných konferencích a v impaktovaném časopise. Mezi klíčové publikace patří 4 příspěvky na mezinárodních konferencích ([44], [47], [50], [54]) a 2 články v impaktovaném časopise ([55] a [56]).

Problematika zkoumaná v rámci této dizertační práce je součástí výzkumného úkolu řešeného v rámci spolupráce se společností T-Mobile Czech Republic a.s. Dále byla tato problematika řešena v rámci doktorského grantového projektu GA ČR 102/08/H027, s názvem Pokročilé metody, struktury a komponenty elektronické bezdrátové komunikace, výzkumného záměru MŠMT České republiky MSM 0021630513, Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací (ELKOM) a grantového projektu GA ČR 102/07/1295, Modely mobilních sítí a jejich částí.

---

## Literatura

- [1] AGUSTI, R.; SALLEN, O.; PEREZ, J.; GORIA, P.; MANGANI, N.; VAILLANT, A. *First report on the evaluation of RRM algorithms by simulation* [online]. 2002, [cit. 2008-11-24]. Dostupný z WWW: <http://www.arrows-ist.upc.es/>.
- [2] SOLDANI, D. *QoS Management in UMTS Terrestrial Radio Access FDD Networks*. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology, Helsinki University of technology, October, 2005. ISBN 951-22-7834-0.
- [3] BAROLLI, L.; DURRESI, A.; XHAFA, F.; KOYAMA, A. A Fuzzy-Based Handover System for Wireless Cellular Networks: A Case Study for Handover Enforcement. *Network-Based information Systems*. Springer, Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, vol. 5186/2008, p. 212–222. ISBN 978-3-540-85692-4.
- [4] JAYASURIYA, A. Handover Channel Allocation Based on Mobility Prediction. *Advanced Wired and Wireless Networks*. Springer, Heidelberg, Multimedia Systems and Applications, vol. 26, p. 147–169. ISBN 978-0-387-22781-8.
- [5] CIASCETTI, G.; CORSINI, L.; DETTI, P.; GIAMBENE, G. Packet Scheduling in Third Generation Mobile Systems with UTRA-TDD Air Interface. *Annals of Operation Research*. Springer Netherlands. March. 2007, vol. 150, no. 1, p. 93–114. ISSN 1572-9338.
- [6] FANTACCI, R.; GIAMBENE, G.; PETITI, F. Scheduling Algorithms for Packet Oriented MAC Protocols in Wireless Multimedia Systems. *Wireless Personal Communication*. Springer Netherlands. Feb. 2003, vol. 24, no. 3, p. 363–388. ISSN 1572-834X.
- [7] SHEN, Y.; CHANG, CH.; HSIEH, Y. A Channel Effect Prediction-Based Power Control Scheme Using PRNN/ERLS for Uplinks in DS-CDMA Cellular Mobile Systems. In *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2006, vol. 5, no. 1.
- [8] BACCELLI, F.; BLASZCZYNSZYN, B.; KARRAY, M. Up- and Downlink Admission/Congestion Control and Maximal Load in Large Homogeneous CDMA Networks. *Mobile Networks and Applications*. Springer Netherlands. Dec. 2004, vol. 9, no. 6, p. 605–617. ISSN 1572-8153.
- [9] KARAKOC, M.; KAVAK, A. Stochastic Optimization Algorithm Based Dynamic Resource Assignment for 3G Systems. *Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking*. Springer, Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, vol. 4712/2007, p. 223–234. ISBN 978-3-540-74832-8.
- [10] CHANG, B.; CHEN, M.; HWANG, R.; CHUANG, CH. Markov-Based OVSF Code Assignment Scheme and Call Admission Control for Wideband CDMA Communication System. *Wireless Personal Communication*. Springer Netherlands. Sept. 2005, vol. 34, no. 4, p. 373–394. ISSN 1572-834X.
- [11] ERLEBACH, T.; JACOB, R.; MIHALÁK, M.; NUNKESSER, M.; SZABÓ, G.; WIDMAYER, P. An Algorithmic View on OVSF Code Assignment. In *Proceedings of the 21<sup>st</sup> Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science 2004*. Springer, Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, vol. 2996/2004, p. 270–281. ISBN 978-3-540-21236-2.
- [12] 3GPP, Technical Specification 25.922, *Radio Resources Management Strategies*, v. 7.1.0, March 2007.
- [13] 3GPP, Technical Specification 25.331, *Radio Resource Control (RRC)*; Protocol Specifications, v. 8.5.0, February 2009.
- [14] ROMERO, J.; SALLEN, O.; AGUSTÍ, R.; DÍAZ-GUERRA, M. *Radio Resources Management Strategies in UMTS*. John Wiley & Sons, 2005. 345 p. ISBN 978-0-470-02277-1.

- 
- [15] HOSSAIN, F.; SOHAB, A. *Mathematical modelling of call admission control in WCDMA networks*. Master's thesis. Blekinge Institute of Technology, 2007. 58 s.
- [16] NAWROCKI, M.; DOHLER, M.; AGHVANI, A. *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-470-01567-5.
- [17] MALARKKAN, S.; RAVICHANDRAN, V. Performance Analysis of Call Admission Control in WCDMA Systems with Adaptive Multi Class Traffic Based on Fuzzy Logic. In *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. Nov. 2006, vol. 6, no. 11.
- [18] CHANG, CH.; KUO, L.; CHEN, Y.; SCHEN, S. Neural Fuzzy Call Admission and Rate Controller for WCDMA Cellular Systems Providing Multirate Services. In *Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing*. Canada, p. 383–388. ISBN 1-59593-306-9.
- [19] ELAYOUBI, S.; CHAHED, T. Admission Control in the Downlink of WCDMA/UMTS. *Wireless Systems and Mobility in Next Generation Internet*. Springer, Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3427/2005, p. 136–151. ISBN 978-3-540-25329-7.
- [20] LEVINE, D.; AKYILDIZ, I.; NAGHSHINEH, M. A Resource Estimation and Call Admission Algorithm for Wireless Multimedia Networks Using the Shadow Cluster Concept. In *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 1997, vol. 5, no. 1.
- [21] PATACHALANAND, R.; SANDRASEGARAN, K. *Simulation of Call Admission Control in Multi-Traffics WCDMA System* [online]. University of technology Sydney, [cit. 2008-4-5]. Dostupný z WWW: <http://epress.lib.uts.edu.au>.
- [22] CAPONE, A.; REDANA, S.  $\Gamma$ E: A Novel Call Admission Control Scheme for W-CDMA Systems. *Wireless Personal Communication*. Springer Netherlands. Oct. 2006, vol. 39, no. 1, p. 81–97. ISSN 1572-834X.
- [23] MALARKKAN, S.; RAVICHANDRAN, V. Performance Analysis of Call Admission Control in WCDMA Systems with Adaptive Multi Class Traffic Based on Fuzzy Logic. In *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. Nov. 2006, vol. 6, no. 11.
- [24] LIU, D.; ZHANG, Y.; HU, S. Call Admission Policies Based on Calculated Power Control Setpoints in SIR-Based Power-Controlled DS-CDMA Cellular Networks. *Wireless Networks*. Springer Netherlands. July 2004, vol. 10, no. 4, p. 473–483. ISSN 1572-8196.
- [25] LO, J.; BRITO, A.; CORREIA, L.; CORREIA A. Simulation of Call Admission Control, Load Control, Handover and Power Control Algorithms for Enhanced UMTS [online]. *SEACORN Project*, [cit. 2009-2-3]. Dostupný z WWW: <http://seacorn.ptinovacao.pt/>.
- [26] KHOJA, J.; AL-SHALASH, M.; PRABHU, V. Dynamic System Simulator for the Modelling of CDMA Systems. In *Proceedings of the International Mobility and Wireless Access Workshop*. 2002, p. 50–58. ISBN 0-7695-1843-5.
- [27] SHEN, S.; CHANG, C.; HUANG, C.; BI, Q. Intelligent Call Admission Control for Wideband CDMA Cellular Systems. In *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Sept. 2004, vol. 3, no. 5.
- [28] CHANG, C.; KUO, L.; CHEN, Y.; SHEN, S. Neural Fuzzy Call Admission and Rate Controller for WCDMA Cellular Systems Providing Multirate Services. In *Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, Vancouver*. 2006. ISBN 1-59593-306-9.
- [29] YENER, A.; ROSE, C. Genetic Algorithms Applied to Cellular Call Admission Problem: Local Policies. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Feb. 1997, vol. 46, p. 72–79.
- [30] KARABUDAK, D.; HUNG, C.; BING, B. A Call Admission Control Scheme Using Genetic Algorithms. In *Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing*, 2004. ISBN 1-58113-812-1.
- [31] GILHOUSEN, K.S.; JACOBS, I.M.; PADOVANI, R.; VITERBI, A.J.; WEAVER, L.A.; WHEATLEY, C.E. On the Capacity of a Cellular CDMA Systems. In *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. May. 1991, vol. 40, no. 2, p. 303–112.
-

- 
- [32] LEMPIAINEN, J.; MANNINEN, M. *Radio Interface System Planning for GSM/GPRS/UMTS*. Kluwer Academic Publisher, 2001. ISBN 0-7923-7516-5.
- [33] VASSILIOU, V.; ANTONIOU, J.; HADJIPOLLAS, G.; PITSILLIDES, A. A Simulation Tool to Evaluate Radio Resource Management Algorithms for Enhanced UMTS. In *Modeling and Optimization in Mobile, Ad-Hoc and Wireless Networks, International Symposium on*. IEEE Computer Society, April 2006, vol. 0, p. 396–403. ISBN 0-7695-2267-X.
- [34] RACHIDI, T.; BENKIRANE, M.; BOUZEKRI, H. QoS Provisioning in WCDMA 3G Networks using Mobility Prediction. *Innovative Algorithms and Techniques in Automation, Industrial Electronics and Telecommunications*. Springer Netherlands. Sept. 2007, p. 453–458. ISBN 978-1-4020-6266-7.
- [35] BAIK, S.; BALA, J.; HADJARIAN, A.; PACHOWICZ, P. Genetic Evolution Approach for Target Movement Prediction. In *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Heidelberg, vol. 3037/2004, p. 678–681. ISBN 978-3-540-22115-9.
- [36] NGUYEN, M.N.; SHI, D.; QUEK, C.; NG, G.S. Traffic Prediction Using Ying-Yang Fuzzy Cerebellar Model Articulation Controller. In *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition – Volume 03*. IEEE Computer Society, August 2006, p. 258–261. ISBN: 0-7695-2521-0.
- [37] CHAN, Y.H.; RANDHAWA, T.; HARDY, S. Traffic Prediction Based Access Control Using Different Video Traffic Models in 3G CDMA High Speed Data Networks. In *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*. Association for Computing Machinery, 2006, p. 227–232. ISBN: 1-59593-306-9.
- [38] ETSI, ETSI Technical Report 125 993, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), Typical examples of Radio Access Bearers (RABs) and Radio Bearers (RBs) supported by Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) (3GPP TR 25.993 version 9.0.0 Release 9)*; Protocol Specifications, v. 9.0.0, February 2010.
- [39] WACKER, A.; et al. *NPSW Matlab Implementation of Static Radio Network Planning Tool for WCDMA*. Program a dokumentace. Verze 5.0.0, 2001.
- [40] SOLDANI, D.; LI, M.; CUNY, R. *QoS and QoE Management in UMTS Cellular Systems*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-470-01639-6.
- [41] RIBEIRO, A.I.J.; STORCK, C.R.; DUARTE-FIGUEIREDO, F. CAC-RD: an UMTS Call Admission Control. In *Telecommunication Systems*. Springer Netherlands. Feb. 2010. ISSN 1572-9451.
- [42] AYYAPPAN, K.; KUMAR, R. Service Utilization Based Call Admission Control (CAC) Scheme for WCDMA Network. In *International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)*. June 2010, vol. 1, no. 2, p. 66–70. ISSN 2079-2557.
- [43] CHU, K.-C.; WANG, C.-S.; LIN, F.Y.-S. An Admission Control-based Benefit Optimization Model for Mobile Communications: the Effect of a Decision Time Budget. In *Journal of network and systems management*. Dec. 2009, p. 169–189. ISSN 1573-7705.

**Vlastní publikace:**

- [44] KEJÍK, P.; HANUS, S. Fuzzy Logic Based Call Admission Control in UMTS System. In *CD: Proceedings of the 2009 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic System Technology*. Aalborg, Denmark: 2009. s. 375–378. ISBN: 978-1-4244-4067- 2.
- [45] KEJÍK, P.; HANUS, S. Analýza prostředků pro řízení přístupu do CDMA sítí. In *Pokročilé metody, struktury a komponenty elektronické bezdrátové komunikace: Sborník semináře o řešení doktorského projektu Grantové agentury České republiky č. 102/08/H027 v roce 2008*. 2008. s. 36–39. ISBN 978-80-214-3753-1.
- [46] KEJÍK, P.; HANUS, S. Řízení přístupu do sítí UMTS. In *Sborník příspěvků konference Zvůle 2008*. 2008. s. 91–94. ISBN 978-80-214-3709-8.

- 
- [47] KEJÍK, P.; HANUS, S. Radio resources management in CDMA systems. In *Proceedings of the seventeenth International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2008 (ISSN 1581-4572)*. Portorož, Slovenia: Slovenia Section IEEE, Ljubljana University: 2008. s. 261–264.
- [48] KEJÍK, P.; HANUS, S. Packet Scheduling in UMTS. In *Proceedings of the 18th International Conference Radioelektronika 2008*. 2008. s. 93–96. ISBN 978-1-4244-2087-2.
- [49] KEJÍK, P.; HANUS, S. Radio Resources Strategies in UMTS, Packet Scheduling. In *Proceedings of the 14th Conference STUDENT EEICT 2008*. 2008. s. 32–36. ISBN 978-80-214-3616-9.
- [50] KEJÍK, P.; HANUS, S. The Application of Fuzzy Logic for Admission Control in UMTS System. In *Proceedings of the 19th International Conference Radioelektronika 2009*. 2009. s. 203–206. ISBN 978-1-4244-3536-4.
- [51] KEJÍK, P.; HANUS, S. Simulation of Radio Resources Management in UMTS System. In *Proceedings of the 15th Conference STUDENT EEICT 2009*. 2009. s. 254–258. ISBN 978-80-214-3870-5.
- [52] KEJÍK, P.; HANUS, S. Použití genetických algoritmů pro řízení přístupu v systému UMTS. In *Sborník příspěvků konference KRÁLÍKY 2009*. Brno: 2009. s. 133–136. ISBN: 978-80-214-3938-2.
- [53] KEJÍK, P.; HANUS, S. Metody pro řízení přístupu do CDMA sítí. In *Pokročilé metody, struktury a komponenty elektronické bezdrátové komunikace: Sborník semináře o řešení doktorského projektu Grantové agentury České republiky č. 102/08/H027 v roce 2009*. Brno: 2009. s. 36–39. ISBN: 978-80-214-4017-3.
- [54] KEJÍK, P.; HANUS, S. Fuzzy Logic Based Call Admission Control with User Movement Prediction for UMTS System. In *Proceedings of 20th International Conference Radioelektronika 2010*. 2010. s. 67–70. ISBN: 978-1-4244-6319-0.
- [55] KEJÍK, P.; HANUS, S. Comparison of Fuzzy Logic and Genetic Algorithm Based Admission Control Strategies for UMTS System. *Radioengineering*. 2010, roč. 19, č. 1, s. 6–10. ISSN: 1210-2512.
- [56] KEJÍK, P.; HANUS, S. Admission Control Techniques for UMTS System. *Radioengineering*. 2010, roč. 19, č. 3, s. 397–402. ISSN: 1210-2512.
- [57] KEJÍK, P.; HANUS, S. Simulator for radio resources management functions in CDMA systems. *Simulation Modelling Practice and Theory* (v recenzním řízení od 1. 6. 2010).
- [58] KEJÍK, P.; HANUS, S. Auto-tuning of admission control parameters in CDMA systems. *Telecommunication Systems* (v recenzním řízení od 29. 6. 2010).
- [59] KEJÍK, P.; HANUS, S. Advanced Fuzzy Logic Based Admission Control for UMTS System. *Radioengineering* (v recenzním řízení od 18. 8. 2010).
-

## Seznam zkratek

2G	druhá generace ( <i>second Generation</i> )
3G	třetí generace ( <i>third Generation</i> )
3GPP	( <i>3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project</i> )
4G	čtvrtá generace ( <i>fourth generation</i> )
AC	řízení přístupu ( <i>Admission Control</i> )
AC-F	algoritmus pro AC, využívající fuzzy logiku
AC-FP	algoritmus pro AC, využívající fuzzy logiku a predikci
AC-G	algoritmus pro AC, využívající genetické algoritmy
AC-L	algoritmus pro AC, využívající výpočet činitele zatížení
CC	řízení zahlcení ( <i>Congestion Control</i> )
CDMA	přístupová metoda s kódovým dělením ( <i>Code Division Multiple Access</i> )
CCH	společný kanál ( <i>Common Channel</i> )
CIR	odstup nosná/interference ( <i>Carrier to Interference Ratio</i> )
CM	správa ortogonálních kódů ( <i>Code Management</i> )
FDMA	přístupová metoda s frekvenčním dělením ( <i>Frequency Division Multiple Access</i> )
GSM	globální systém pro mobilní komunikace ( <i>Global System for Mobile communications</i> )
HC	řízení handoverů ( <i>Handover Control</i> )
HSDPA	( <i>High Speed Downlink Packet Access</i> )
HSPA+	( <i>Evolved High Speed Packet Access</i> )
IMT-2000	mezinárodní standard pro mobilní komunikace ( <i>International Mobile Telecommunications in the year 2000</i> )
LOS	přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem ( <i>Line Of Sight</i> )
LTE	( <i>Long Term Evolution</i> )
MAC	( <i>Medium Access Control layer</i> )
OFDM	ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením ( <i>Orthogonal Frequency Division Multiplex</i> )
OFDMA	přístupová metoda využívající ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením ( <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> )
OVSF	ortogonální kódy s proměnným činitelem rozprostírání ( <i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i> )

PC	řízení výkonu ( <i>Power Control</i> )
PS	řízení paketového provozu ( <i>Packet Scheduling</i> )
QoE	subjektivní kvalita služeb ( <i>Quality of user Experience</i> )
QoS	kvalita služeb ( <i>Quality of Service</i> )
RRM	správa přidělování rádiových prostředků ( <i>Radio Resources Management</i> )
SC-FDMA	frekvenčně dělený vícenásobný přístup na jedné nosné ( <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> )
SIR	odstup signál/interference ( <i>Signal to Interference Ratio</i> )
TDMA	přístupová metoda s časovým dělením ( <i>Time Division Multiple Access</i> )
UE	uživatelské mobilní zařízení ( <i>User Equipment</i> )
UMTS	universální mobilní telekomunikační systém ( <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> )
WCDMA	širokopásmová CDMA ( <i>Wideband CDMA</i> )
WiMAX	( <i>Worldwide interoperability for Microwave Access</i> )
WLAN	bezdrátová lokální síť ( <i>Wireless Local Area Network</i> )

## Seznam symbolů

$\alpha$	faktor ortogonality
$\eta_{ul-A}$	průměrný činitel zatížení pro uplink v okolních šesti buňkách
$\eta_{ul-avg}$	průměrný činitel zatížení pro uplink
$\eta_{ul-thr}$	prahová hodnota činitele zatížení pro uplink
$\eta_{ul}$	činitel zatížení pro uplink
$\eta_{dl}$	činitel zatížení pro downlink
$\Delta\eta_{ul}$	nárůst činitele zatížení pro uplink
$\mu$	funkce pro zpracování vstupních proměnných (fuzzy logika)
$c$	rychlost světla
$\mathbf{C}_{-u(d)}$	vektor přijímaných výkonů
$CIR (C/I)$	poměr mezi výkonovou úrovní nosné a úrovní interferencí
$d$	vzdálenost mezi UE a Node B
$E_b/N_0$	poměr energie připadající na jeden bit a spektrální výkonové hustoty šumu
$f$	kmitočet
$F_{C-thr}$	konstanta pro změnu prahů při autoregulaci
$F_{F1}, F_{F2}, F_c$	hodnoty fit funkcí (genetické algoritmy)
$F_{thr-VN}$	práh pro nová hlasová spojení pro AC algoritmy
$F_{thr-DN}$	práh pro nová datová spojení pro AC algoritmy
$F_{thr-VO}$	práh pro stávající hlasová spojení pro AC algoritmy
$F_{thr-DO}$	práh pro stávající datová spojení pro AC algoritmy
$\Delta F_{thr}$	proměnná pro automatickou regulaci $F_{thr}$
$\mathbf{I}$	jednotková matice
$I_{AS}$	intenzita příchozích spojení
$I_{total}$	aktuální celková úroveň interferencí v buňce
$\Delta I$	nárůst interferencí
$j_I$	poměr interferencí mezi okolními a sledovanou buňkou
$K$	počet uživatelů v buňce
$L$	útlum rádiového kanálu
$\mathbf{M}$	vazební matice



---

$N$	počet uživatelů (spojení)
$N_{AP-P}$	počet fiktivních spojení v buňce
$N_{F-SC-avg}$	průměrný počet úspěšně dokončených spojení
$N_{FV-SC-avg}$	průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení
$N_{FD-SC-avg}$	průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení
$N_N$	počet UEs v blízkém okolí aktuální buňky
$N_{nu-P}$	predikovaný počet UEs v buňce
$N_{N-A}$	počet UEs v blízkém okolí aktuální buňky, kteří se k dané buňce přibližují
$N_{n\_v}$	počet nových přijatých hlasových spojení
$N_{o\_v}$	počet stávajících ponechaných hlasových spojení
$N_{n\_d}$	počet nových přijatých datových spojení
$N_{o\_d}$	počet stávajících ponechaných datových spojení
$\mathbf{N}_{noise-u}$	matice šumových úrovní na přijímací straně
$N_{sim}$	počet opakování simulace pro průměrování hodnot
$N_{SC}$	počet spojení v buňce
$N_{SC-avg}$	průměrný počet spojení v buňce
$p_B$	pravděpodobnost odmítnutí spojení
$p_D$	pravděpodobnost přerušení spojení
$p_{D-thr}$	prahová hodnota pravděpodobnosti přerušení spojení
$P^{CCH}$	celkový výkon signálů, vysílaných na CCH kanálech
$P_{im-d}$	výkon signálu, který vysílá $i$ -tý Node B k $m$ -tému UE
$P_{m-u}$	výkon signálu, kterým vysílá $m$ -tý UE
$P_n$	výkon šumového signálu
$P_s$	výkon užitečného signálu
$R, R_{bit}$	přenosová rychlost
$R_{avg}$	průměrná přenosová rychlost v buňce
$SP_{max}$	maximální rychlost pohybu UE v systému
$t$	čas
$T_{sim}$	délka simulace
$T_{iter}$	délka simulačního kroku
$v_f$	faktor definující aktivitu spojení
$w$	váhovací koeficient
$W$	chipová rychlost (3,84 Mchip/s)

---

## Seznam obrázků

<b>Obr. 2.1</b>	<i>Model systému se znázorněnými trajektoriemi pohybu několika uživatelů.....</i>	12
<b>Obr. 2.2</b>	<i>Rozložení UEs v systému .....</i>	12
<b>Obr. 2.3</b>	<i>Model systému se znázorněnými trajektoriemi pohybu několika uživatelů – 37 buněk.....</i>	13
<b>Obr. 2.4</b>	<i>Blokové schéma vytvořeného modelu .....</i>	14
<b>Obr. 2.5</b>	<i>Blokové schéma mechanismu pro řízení přístupu.....</i>	15
<b>Obr. 2.6</b>	<i>Průměrný činitel zatížení <math>\eta_{ul-avg}</math> v buňce.....</i>	18
<b>Obr. 2.7</b>	<i>Průměrný počet spojení v buňce.....</i>	18
<b>Obr. 2.8</b>	<i>Ověření řízení přístupu a ošetření interferencí.....</i>	19
<b>Obr. 3.1</b>	<i>Blokové schéma fuzzy AC .....</i>	22
<b>Obr. 3.2</b>	<i>Funkce pro zpracování vstupních proměnných <math>\eta_{ul}</math> a SP .....</i>	23
<b>Obr. 3.3</b>	<i>Funkce pro zpracování vstupních proměnných <math>\eta_{ul-A}</math>, <math>N_N</math> a <math>N_{N-A}</math>.....</i>	23
<b>Obr. 3.4</b>	<i>Blokové schéma genetických AC algoritmů.....</i>	25
<b>Obr. 4.1</b>	<i>Srovnání algoritmů AC-L a AC-F1, 1. set rozhodovacích prahů.....</i>	29
<b>Obr. 4.2</b>	<i>Srovnání algoritmů AC-L a AC-F1, 2. set rozhodovacích prahů.....</i>	29
<b>Obr. 4.3</b>	<i>Velikost činitelů zatížení <math>\eta_{ul}</math> v 7 centrálních buňkách pro AC-L.....</i>	30
<b>Obr. 4.4</b>	<i>Velikost činitelů zatížení <math>\eta_{ul}</math> v 7 centrálních buňkách pro AC-F1.....</i>	30
<b>Obr. 4.5</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce.....</i>	30
<b>Obr. 4.6</b>	<i>Srovnání průměrné přenosové rychlosti v buňce.....</i>	30
<b>Obr. 4.7</b>	<i>Vliv řízení zahlčení sítě na hlasová spojení, průměrovací okno s délkou 30 sekund.....</i>	31
<b>Obr. 4.8</b>	<i>Vliv řízení zahlčení sítě na datová spojení, průměrovací okno s délkou 30 sekund.....</i>	31
<b>Obr. 4.9</b>	<i>Vliv řízení zahlčení sítě na hlasová spojení, průměrovací okno s délkou 20 sekund.....</i>	31
<b>Obr. 4.10</b>	<i>Vliv řízení zahlčení sítě na datová spojení, průměrovací okno s délkou 20 sekund.....</i>	31
<b>Obr. 4.11</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení .....</i>	32
<b>Obr. 4.12</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení.....</i>	32
<b>Obr. 4.13</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení.....</i>	33
<b>Obr. 4.14</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení.....</i>	33
<b>Obr. 4.15</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy.....</i>	33
<b>Obr. 4.16</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce .....</i>	33
<b>Obr. 4.17</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce .....</i>	33
<b>Obr. 4.18</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce.....</i>	33
<b>Obr. 4.19</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení .....</i>	34
<b>Obr. 4.20</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení.....</i>	34
<b>Obr. 4.21</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení.....</i>	34
<b>Obr. 4.22</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení.....</i>	34
<b>Obr. 4.23</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce .....</i>	34
<b>Obr. 4.24</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce .....</i>	35
<b>Obr. 4.25</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce.....</i>	35
<b>Obr. 4.26</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení, <math>SP_{max} = 100</math> km/h.....</i>	35
<b>Obr. 4.27</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení, <math>SP_{max} = 100</math> km/h.....</i>	35
<b>Obr. 4.28</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení, <math>\eta_{thr} = 0,7</math>.....</i>	36
<b>Obr. 4.29</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení, <math>\eta_{thr} = 0,7</math>.....</i>	36
<b>Obr. 4.30</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení.....</i>	36
<b>Obr. 4.31</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení.....</i>	36
<b>Obr. 4.32</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy.....</i>	37
<b>Obr. 4.33</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce .....</i>	37
<b>Obr. 4.34</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce .....</i>	37
<b>Obr. 4.35</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce.....</i>	37
<b>Obr. 4.36</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – převaha hlasových spojení.....</i>	38
<b>Obr. 4.37</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – převaha datových spojení.....</i>	38
<b>Obr. 4.38</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – převaha hlasových spojení.....</i>	38
<b>Obr. 4.39</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – převaha datových spojení.....</i>	38

<b>Obr. 4.40</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení</i> .....	39
<b>Obr. 4.41</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení</i> .....	39
<b>Obr. 4.42</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha hlasových spojení</i> .....	39
<b>Obr. 4.43</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha datových spojení</i> .....	39
<b>Obr. 4.44</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha hlasových spojení</i> .....	39
<b>Obr. 4.45</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha datových spojení</i> .....	39
<b>Obr. 4.46</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí – převaha hlasových spojení</i> .....	40
<b>Obr. 4.47</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí – převaha datových spojení</i> .....	40
<b>Obr. 4.48</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha hlasových spojení</i> .....	40
<b>Obr. 4.49</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha datových spojení</i> .....	40
<b>Obr. 4.50</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha hlasových spojení</i> ..	40
<b>Obr. 4.51</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha datových spojení</i> ....	40
<b>Obr. 4.52</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha hlasových spojení</i> ....	41
<b>Obr. 4.53</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha datových spojení</i> .....	41
<b>Obr. 4.54</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	42
<b>Obr. 4.55</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	42
<b>Obr. 4.56</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	42
<b>Obr. 4.57</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	42
<b>Obr. 4.58</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	43
<b>Obr. 4.59</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	43
<b>Obr. 4.60</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	43
<b>Obr. 4.61</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	43
<b>Obr. 4.62</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> ..	43
<b>Obr. 4.63</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> ....	43
<b>Obr. 4.64</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	44
<b>Obr. 4.65</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	44
<b>Obr. 4.66</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – bez použití <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	44
<b>Obr. 4.67</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – s použitím <math>\Delta F_{thr}</math></i> .....	44
<b>Obr. 4.68</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení (<math>R_{bit1} = 12,2</math> kb/s)</i> .....	45
<b>Obr. 4.69</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro videohovory (<math>R_{bit2} = 64,0</math> kb/s)</i> .....	45
<b>Obr. 4.70</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení (<math>R_{bit3} = 32,0</math> kb/s)</i> .....	46
<b>Obr. 4.71</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení (<math>R_{bit4} = 128,0</math> kb/s)</i> .....	46
<b>Obr. 4.72</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení</i> .....	46
<b>Obr. 4.73</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce</i> .....	46
<b>Obr. 4.74</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce</i> .....	46
<b>Obr. 4.75</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce</i> .....	47
<b>Obr. 4.76</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených videohovorů v buňce</i> .....	47
<b>Obr. 4.77</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce (<math>R_{bit3} = 32,0</math> kb/s)</i> .....	47
<b>Obr. 4.78</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce (<math>R_{bit4} = 128,0</math> kb/s)</i> .....	47
<b>Obr. 4.79</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro hlasová spojení</i> .....	48
<b>Obr. 4.80</b>	<i>Srovnání několika fuzzy algoritmů pro datová spojení</i> .....	48
<b>Obr. 4.81</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení</i> .....	48
<b>Obr. 4.82</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení</i> .....	48
<b>Obr. 4.83</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy</i> .....	48
<b>Obr. 4.84</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce</i> .....	48
<b>Obr. 4.85</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce</i> .....	49
<b>Obr. 4.86</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce</i> .....	49
<b>Obr. 4.87</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení</i> .....	49
<b>Obr. 4.88</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení</i> .....	49
<b>Obr. 4.89</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení</i> .....	50
<b>Obr. 4.90</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení</i> .....	50
<b>Obr. 4.91</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy</i> .....	50
<b>Obr. 4.92</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce</i> .....	50
<b>Obr. 4.93</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce</i> .....	51
<b>Obr. 4.94</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce</i> .....	51
<b>Obr. 4.95</b>	<i>Průběh činitelů zatížení <math>\eta_{ul}</math> pro AC-L</i> .....	51
<b>Obr. 4.96</b>	<i>Průběh činitelů zatížení <math>\eta_{ul}</math> pro AC-FI</i> .....	51
<b>Obr. 4.97</b>	<i>Průběh činitelů zatížení <math>\eta_{ul}</math> pro AC-GI</i> .....	51

<b>Obr. 4.98</b>	<i>Průběh činitelů zatížení <math>\eta_{ul}</math> pro AC-G2</i> .....	51
<b>Obr. 4.99</b>	<i>Počet spojení v buňce pro AC-L</i> .....	52
<b>Obr. 4.100</b>	<i>Počet spojení v buňce pro AC-F1</i> .....	52
<b>Obr. 4.101</b>	<i>Počet spojení v buňce pro AC-G1</i> .....	52
<b>Obr. 4.102</b>	<i>Počet spojení v buňce pro AC-G2</i> .....	52
<b>Obr. 5.1</b>	<i>Princip predikce polohy UEs</i> .....	55
<b>Obr. 5.2</b>	<i>Princip řízení přístupu pro AC-FP4</i> .....	56
<b>Obr. 5.3</b>	<i>Princip automatické regulace AC algoritmů</i> .....	59
<b>Obr. 5.4</b>	<i>Vliv změny prahové hodnoty <math>\eta_{ul-thr}</math></i> .....	59
<b>Obr. 5.5</b>	<i>Princip automatické regulace <math>p_D</math></i> .....	60
<b>Obr. 6.1</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení</i> .....	62
<b>Obr. 6.2</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení</i> .....	62
<b>Obr. 6.3</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení</i> .....	63
<b>Obr. 6.4</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení</i> .....	63
<b>Obr. 6.5</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy</i> .....	63
<b>Obr. 6.6</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce</i> .....	63
<b>Obr. 6.7</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce</i> .....	64
<b>Obr. 6.8</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce</i> .....	64
<b>Obr. 6.9</b>	<i>Vliv doby odhadu <math>\tau</math> na přesnost odhadu polohy UEs</i> .....	64
<b>Obr. 6.10</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení</i> .....	65
<b>Obr. 6.11</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení</i> .....	65
<b>Obr. 6.12</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení</i> .....	65
<b>Obr. 6.13</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení</i> .....	65
<b>Obr. 6.14</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy</i> .....	65
<b>Obr. 6.15</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce</i> .....	65
<b>Obr. 6.16</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce</i> .....	66
<b>Obr. 6.17</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce</i> .....	66
<b>Obr. 6.18</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení</i> .....	67
<b>Obr. 6.19</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení</i> .....	67
<b>Obr. 6.20</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení</i> .....	67
<b>Obr. 6.21</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení</i> .....	67
<b>Obr. 6.22</b>	<i>Srovnání průměrných přenosových rychlostí pro jednotlivé algoritmy</i> .....	67
<b>Obr. 6.23</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce</i> .....	67
<b>Obr. 6.24</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce</i> .....	68
<b>Obr. 6.25</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce</i> .....	68
<b>Obr. 6.26</b>	<i>Srovnání algoritmů pro hlasová spojení – převaha hlasových spojení</i> .....	69
<b>Obr. 6.27</b>	<i>Srovnání algoritmů pro hlasová spojení – převaha datových spojení</i> .....	69
<b>Obr. 6.28</b>	<i>Srovnání algoritmů pro datová spojení – převaha hlasových spojení</i> .....	69
<b>Obr. 6.29</b>	<i>Srovnání algoritmů pro datová spojení – převaha datových spojení</i> .....	69
<b>Obr. 6.30</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha hlasových spojení</i> .....	69
<b>Obr. 6.31</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení – převaha datových spojení</i> .....	69
<b>Obr. 6.32</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha hlasových spojení</i> .....	70
<b>Obr. 6.33</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – převaha datových spojení</i> .....	70
<b>Obr. 6.34</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha hlasových spojení</i> .....	70
<b>Obr. 6.35</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených spojení v buňce – převaha datových spojení</i> .....	70
<b>Obr. 6.36</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha hlasových spojení</i> ..	70
<b>Obr. 6.37</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení – převaha datových spojení</i> .....	70
<b>Obr. 6.38</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha hlasových spojení</i> .....	71
<b>Obr. 6.39</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení – převaha datových spojení</i> .....	71
<b>Obr. 6.40</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení – s regulací <math>p_D</math></i> .....	72
<b>Obr. 6.41</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení – bez regulace <math>p_D</math></i> .....	72
<b>Obr. 6.42</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení – s regulací <math>p_D</math></i> .....	72
<b>Obr. 6.43</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení – bez regulace <math>p_D</math></i> .....	72
<b>Obr. 6.44</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení v buňce – s regulací <math>p_D</math></i> .....	73
<b>Obr. 6.45</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení v buňce – bez regulace <math>p_D</math></i> .....	73
<b>Obr. 6.46</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – s regulací <math>p_D</math></i> .....	73
<b>Obr. 6.47</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce – bez regulace <math>p_D</math></i> .....	73
<b>Obr. 6.48</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – s regulací <math>p_D</math></i> .....	73
<b>Obr. 6.49</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce – bez regulace <math>p_D</math></i> .....	73

---

<b>Obr. 6.50</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – s regulací <math>p_D</math>.....</i>	74
<b>Obr. 6.51</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce – bez regulace <math>p_D</math>.....</i>	74
<b>Obr. 6.52</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – s regulací <math>p_D</math>.....</i>	74
<b>Obr. 6.53</b>	<i>Průměrný počet úspěšně dokončených datových spojení v buňce – bez regulace <math>p_D</math>.....</i>	74
<b>Obr. 6.54</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-L_{R1}</math> .....</i>	74
<b>Obr. 6.55</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-F1_{R1}</math> .....</i>	74
<b>Obr. 6.56</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-F2_{R1}</math> .....</i>	75
<b>Obr. 6.57</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-F3_{R1}</math> .....</i>	75
<b>Obr. 6.58</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení, <math>\beta = 3</math> .....</i>	76
<b>Obr. 6.59</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro hlasová spojení, <math>\beta = 4</math> .....</i>	76
<b>Obr. 6.60</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení, <math>\beta = 3</math> .....</i>	76
<b>Obr. 6.61</b>	<i>Srovnání několika algoritmů pro datová spojení, <math>\beta = 4</math> .....</i>	76
<b>Obr. 6.62</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení, <math>\beta = 3</math> .....</i>	77
<b>Obr. 6.63</b>	<i>Srovnání průměrných činitelů zatížení, <math>\beta = 4</math> .....</i>	77
<b>Obr. 6.64</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce, <math>\beta = 3</math> .....</i>	77
<b>Obr. 6.65</b>	<i>Srovnání průměrného počtu spojení v buňce, <math>\beta = 4</math> .....</i>	77
<b>Obr. 6.66</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce, <math>\beta = 3</math> .....</i>	77
<b>Obr. 6.67</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených spojení v buňce, <math>\beta = 4</math> .....</i>	77
<b>Obr. 6.68</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce, <math>\beta = 3</math>.....</i>	78
<b>Obr. 6.69</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených hlasových spojení v buňce, <math>\beta = 4</math>.....</i>	78
<b>Obr. 6.70</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce, <math>\beta = 3</math> .....</i>	78
<b>Obr. 6.71</b>	<i>Srovnání průměrného počtu úspěšně dokončených datových spojení v buňce, <math>\beta = 4</math> .....</i>	78
<b>Obr. 6.72</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-L_{R2}</math>, <math>\beta = 3</math>.....</i>	78
<b>Obr. 6.73</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-F1_{R2}</math>, <math>\beta = 3</math> .....</i>	78
<b>Obr. 6.74</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-F2_{R2}</math>, <math>\beta = 3</math> .....</i>	79
<b>Obr. 6.75</b>	<i>Vývoj proměnných pro automatickou regulaci prahů pro <math>AC-F3_{R2}</math>, <math>\beta = 3</math> .....</i>	79

---

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1.1 RRM funkce a jejich činnost z časového pohledu pro UMTS, [14]</i> .....	6
<i>Tab. 1.2 Třídy QoS, [40]</i> .....	6
<i>Tab. 2.1 Význam a používané hodnoty některých proměnných</i> .....	17
<i>Tab. 2.2 Velikost vysílaných výkonů a C/I v systému</i> .....	18
<i>Tab. 3.1 Fuzzy pravidla pro AC-F1</i> .....	23
<i>Tab. 3.2 Fuzzy pravidla pro AC-F2 až AC-F4, první část</i> .....	24
<i>Tab. 3.3 Fuzzy pravidla pro AC-F2 až AC-F4, druhá část</i> .....	24
<i>Tab. 4.1 Hraniční body funkcí pro zpracování vstupních proměnných</i> .....	28
<i>Tab. 4.2 Váhovací koeficienty pro 4. vrstvu</i> .....	28
<i>Tab. 5.1 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, první část</i> .....	57
<i>Tab. 5.2 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, druhá část</i> .....	57
<i>Tab. 5.3 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, třetí část</i> .....	58
<i>Tab. 5.4 Fuzzy pravidla pro AC-FP15, čtvrtá část</i> .....	58

## Seznam příloh

Příloha č. 1: Disk CD

Příloha č. 2: Seznam a funkce přiložených souborů

## **Příloha 1: Disk CD**

### **Obsah CD:**

- Dizertační práce
- Programy a výsledky provedených simulací
- Vytvořený model systému UMTS



## Příloha 2: Seznam a funkce přiložených souborů

Níže je uveden soupis souborů vytvořeného modelu systému UMTS.

<b>Hlavní funkce</b>	
<b>cdma_main.m</b>	<b>Hlavní funkce, zajišťující běh celého programu.</b>
<b>cdma_sys_param.m</b>	<b>Nastavení základních parametrů simulace, simulovaných algoritmů, parametrů spojení, ...</b>
cdma_NodeBs.m	Definování pozic Node Bs a hranic buněk.
cdma_Tg_poisson.m	Generování nových spojení podle Poissonova rozložení.
cdma_UEs_proc.m	Úprava stávajících spojení (změna polohy UEs, délky hovoru...), generování a přidání nových spojení, volání AC algoritmů (pomocí cdma_AC_alg_sel.m), přidání/odmítnutí, ponechání/odebrání spojení.
cdma_UEs_proc_GA.m	Upravený cdma_UE_proc.m pro genetické algoritmy.
cdma_AC_alg_sel.m	Volání konkrétního AC algoritmu.
<b>RRM funkce</b>	
cdma_AC_L.m	Algoritmus AC-L (kapitola 3.1).
cdma_AC_F1.m	Algoritmus AC-F1 (kapitola 3.2.1).
cdma_AC_F2.m	Algoritmus AC-F2 (kapitola 3.2.2).
cdma_AC_F3.m	Algoritmus AC-F3 (kapitola 3.2.3).
cdma_AC_F4.m	Algoritmus AC-F4 (kapitola 3.2.4).
cdma_AC_FP3.m	Algoritmus AC-FP3 (kapitola 5.1.3).
cdma_AC_FP15.m	Algoritmus AC-FP15 (kapitola 5.3).
cdma_AC_G2.m	Algoritmus AC-G2 (kapitola 3.3.2).
cdma_AC_F1_Rx.m	Algoritmus AC-F1 <sub>R1</sub> a AC-F1 <sub>R2</sub> (kapitola 5.4.1 a 5.4.2).
cdma_power_c_d.m	Výpočet vysílaných výkonů pro downlink.
cdma_power_c_u.m	Výpočet vysílaných výkonů pro uplink.
cdma_power_cch.m	Ověření dostupnosti výkonu, odebírání spojení.
cdma_CIR_UEs.m	Výpočet CIR pro UEs, odebírání spojení.
cdma_CIR_Node_B.m	Výpočet CIR pro Node Bs, odebírání spojení.
cdma_CC.m	Řízení zahlcení sítě.
<b>Pomocné funkce</b>	
cdma_sys_state.m	Výpočet některých systémových parametrů: $\eta_{ul}$ , $\eta_{dl}$ , počty spojení v buňce...
cdma_WI_channel.m	Výpočet ztrát šířením – Walfish-Ikegami model kanálu.
cdma_pos_ver.m	Ověření zda UE leží v systémové oblasti (19 nebo 37 buněk), nalezení servisní Node B pro daný UE, výpočet vzdáleností ke všem Node Bs.
cdma_Save_results.m	Uložení výsledků simulace.
<b>cdma_fig_all.m</b>	<b>Grafické rozhraní pro zobrazení výsledků simulace.</b> Zobrazuje i některé nastavené parametry simulace.
cdma_res_Eval_system.m	Zobrazení buněk, Node Bs, trajektorií UEs a rozložení UEs v systému. Funkce zobrazuje také číslování buněk. Buňky 20–37 (případně 38–61) jsou pomocné pro cdma_pos_ver.m.

---

<code>cdma_res_Eval_pB_pD.m</code>	Zobrazení $p_B$ a $p_D$ pro simulované AC (případně také pro CC) algoritmy.
<code>cdma_res_Eval_LF_NS.m</code>	Zobrazení $\eta_{ul}$ , počet spojení v buňce, počet dokončených spojení...
<code>cdma_res_Eval_PC_CIR.m</code>	Zobrazení $p_B$ a $p_D$ pro PC a CIR algoritmy.
<code>cdma_dial.m</code>	Dialogová okna programu, mazání starých výsledků.
<code>cdma_info.m</code>	Informace o některých proměnných.

---