

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 647

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Martin Koutný

**Modelování přístupových metod
datové komunikace
po silnoprůdých vedeních**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

Ing. Martin Koutný

**MODELOVÁNÍ PŘÍSTUPOVÝCH METOD DATOVÉ
KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÝCH VEDENÍCH**

MODELING OF MEDIUM ACCESS METHODS
OF POWER LINE COMMUNICATION

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Teleinformatika
Školitel: doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Oponenti: doc. Ing. Miloš Orgoň, Ph.D.
doc. Ing. Ladislav Pospíchal, CSc.

Datum obhajoby: 22.12.2011

KLICOVA SLOVA

CSMA/CA, HomePlug, PLC, přístupová vrstva, backoff algoritmus, modelování

KEYWORDS

CSMA/CA, HomePlug, PLC, medium access layer, backoff algorithm

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT
VUT v Brně, Technická 10, Brno, 616 00

© Martin Koutný, 2012

ISBN 978-80-214-4440-9

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	Cíle disertace	5
2	Přehled současného stavu - přístupová vrstva	7
2.1	Protokoly přístupové vrstvy	7
2.1.1	Vývoj v oblasti přístupových protokolů pro technologii PLC	7
2.2	Přístupová metoda CSMA	9
2.3	Backoff algoritmy - distribuční koordinační funkce	9
2.3.1	Uniformní náhodné rozdělení	9
2.3.2	Normální, Gaussovo, rozdělení	9
2.3.3	Exponenciální náhodné rozdělení	9
2.3.4	Weibullovo náhodné rozdělení	10
2.3.5	Vnitřní zaokrouhlovací funkce	10
3	Analýza systému HomePlug 1.0	11
3.1	Princip odesílání dat v technologii PLC	11
3.2	Rámec fyzické vrstvy HomePlug	11
3.3	Rámce MAC vrstvy HomePlug	12
3.4	Back-off algoritmus (BF)	12
3.4.1	Proměnné vstupující do BF algoritmu	12
3.5	Analýza a simulace CSMA/CA algoritmu	13
3.5.1	Účinnost algoritmu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b a HomePlug	14
3.5.2	Analýza velikosti okna CSMA/CA algoritmu	15
4	Optimalizace distribuční funkce	16
4.1	Úprava vnitřních funkcí backoff algoritmu	16
4.1.1	Optimalizace generátoru náhodných hodnot	16
4.2	Výsledky optimalizovaných metod	16
4.2.1	Propustnost algoritmu	17
4.2.2	Průměrný počet kolizí	18
4.2.3	Průměrná velikost doby čekání	18
4.3	Zhodnocení dosažených výsledků	18
5	Modelování přístupové vrstvy	20
5.1	Simulační model	20
5.2	Analytický model	20
5.2.1	Dvoudimenzionální model HomePlug	20
5.2.2	Třídimezcionální model HomePlug	21
5.3	Aproximační model technologie HomePlug	21
5.3.1	Odvození pravděpodobnosti kolize	21
5.3.2	Stanovení aproximačního modelu	21
5.4	Shrnutí modelování přístupové vrstvy	24
	Závěr	26
	Literatura	27

1 CÍLE DISERTACE

Myšlenka využití stávajících elektrických rozvodů pro datový provoz byla znovu oživena v devadesátých letech dvacátého století. Od té doby bylo realizováno několik pilotních projektů, které vyústily v komerční standardy převodníků rozšířeného Ethernetu do silnoproudé sítě [13]. Další větší nasazení tohoto druhu komunikace se očekává s nástupem sítí SmartGrid [2]

Z analýzy stávajícího stavu v oblasti PLC vyplývá, že komerční řešení se ve většině případů nechala inspirovat bezdrátovými a ethernetovými technologiemi, ačkoli prostředí je trochu odlišné. Je patrné, že oblast přístupové vrstvy není tolik probádaná, jak tomu je např. u bezdrátových řešení. Je to jeden z důvodů, proč se tato práce zaměřuje právě na technologii PLC a její přístupovou vrstvu. Přístupová vrstva v sítích PLC se totiž ve značné míře opírá o řešení, která jsou sice známá, avšak byla realizována v době, kdy počítačové sítě byly využívány v mnohem menší míře.

Problematika PLC komunikace je rozsáhlá. Jedny z nejznámějších problémů této technologie jsou obecné rušení podružných služeb, které se v daném pásmu provozují (rádio, televize atp) [5], a efektivní využití sdíleného média. Tato práce se zaměřuje na problematiku efektivního využití společného média a s tím spojenou přístupovou vrstvou.

Cíle disertační práce byly proto stanoveny následovně:

- *Rozbor stávajícího prostředí, v kterém PLC komunikace probíhá.*
Bude proveden rozbor stávajícího prostředí, v kterém se datová komunikace po silnoproudém vedení vyskytuje. Bude poukázáno na nejčastější problémy, s kterými se PLC komunikace potýká.
- *Přehled současného stavu - analýza stávajících protokolů přístupové vrstvy širokopásmové technologie.*
S ohledem na zaměření práce, se práce bude zabývat minulými i současnými trendy v oblasti protokolů přístupové vrstvy. Podrobně bude provedena klasifikace a analýza protokolů, metod a přístupů, které jsou využívány v širokopásmové PLC komunikaci.
- *Analýza stávajících protokolů přístupové vrstvy úzkopásmové technologie.*
Pro doplnění komplexnosti práce, se bude práce zabývat rovněž minulými i současnými trendy v oblasti protokolů přístupové vrstvy, které jsou využívány v oblasti úzkopásmové PLC komunikace.
- *Analýza a simulace vnitřních funkcí backoff algoritmů u metody CSMA/CA.*
Podrobně bude provedena analýza a simulace vnitřních funkcí backoff algoritmů. Poté bude provedeno jejich vzájemné porovnání.
- *Analýza a simulace přístupové metody CSMA/CA zastoupené v technologii HomePlug.*
S ohledem na kapitolu průzkumu přístupových metod, bude podrobně analyzována technologie HomePlug, která je v současné době nejrozšířenější v oblasti poskytování širokopásmových služeb v PLC. Algoritmus této metody bude porovnán s bezdrátovou technologií IEEE 802.11b, z kterého vychází.
- *Optimalizace přístupové metody v technologii HomePlug.*
Technologie HomePlug do vnitřních funkcí přístupové metody nevnáší závislost na zatížení sítě. Doposud publikované modely a optimalizace této metody se vydaly spíše směrem optimalizace velikosti okna. Práce bude navazovat na tyto publikace a představí jiný směr optimalizace pomocí distribučních funkcí, do kterých bude vnesena závislost na zatížení sítě.
- *Nový model technologie HomePlug.*

Současné analytické modely jsou realizovány na bázi Markovových modelů. Bude představen nový aproximační model systému HomePlug, jehož výsledky a budou porovnány s technologií HomePlug. Za tímto účelem bude realizováno simulační ověření.

V závěru práce bude provedeno zhodnocení a vysloven závěr využití modelu popř. možných optimalizací algoritmu přístupové metody pro komunikaci v PLC. Nedílnou součástí závěru práce bude zhodnocení předpokládaných přínosů práce.

Řada dílčích výsledků již byla publikována na mezinárodních konferencích a časopisech v průběhu doktorského studia autora. Na část z těchto publikací je v práci průběžně odkazováno.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PŘÍSTUPOVÁ VRSTVA

Přístupová metoda komunikačních technologií je složena z přístupových metod a protokolů. Nedílnou součástí práce je proto hlubší analýza těchto metod a analýza stávajících protokolů přístupové vrstvy.

2.1 Protokoly přístupové vrstvy

Protokoly přístupové vrstvy jsou algoritmy pro mnohonásobný přístup k médiu. Jejich úkolem je především efektivním způsobem zajistit bezproblémový a bezkolizní oboustranný přenos dat na společném médiu, které je využíváno více zdroji. MAC protokoly jsou děleny standardně do dvou základních skupin [15].

- Protokoly s pevně daným přístupem.
- Protokoly s dynamickým přístupem.
 - Protokoly soutěživé.
 - Protokoly s rozhodováním.

2.1.1 Vývoj v oblasti přístupových protokolů pro technologii PLC

Pro úplnost je přiložen základní seznam přístupů, které byly testovány, autorizovány nebo které jsou využity v současných přístupech v industriálním nebo domácím prostředí.

Oblast vývoje MAC protokolů pro silnoproudá vedení je zachycena na Obr. 2.1. V tomto časovém diagramu je zaznamenána většina přístupových protokolů, které byly vyvinuty pro oblast PLC. Mnoho autorů a vývojových týmů je ovlivněno především protokoly pro bezdrátové sítě, ze kterých většina nově vyvinutých protokolů vychází [24]. Je to dáno především modulačními technikami, které jsou v PLC obdobné jako v bezdrátových technologiích. Důkazem tohoto faktu je i komparativní studie autorů Lin a spol [18], kteří se zaměřili právě na oblast bezdrátových sítí a datové komunikace PLC.

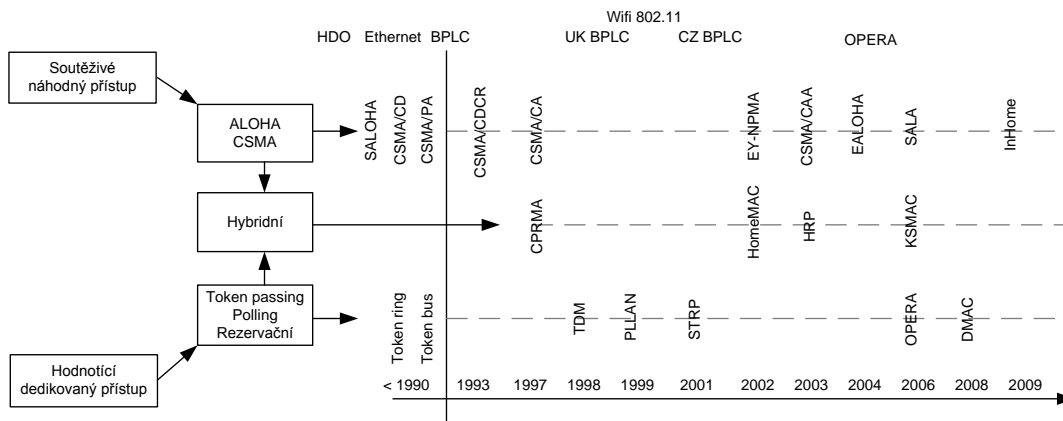
Přelomovým rokem pro oblast zájmu PLC byl rok 2000. V tomto roce začala Evropská unie danou technologii důrazněji prosazovat a výzkum a vývoj se částečně přesunul z oblasti bezdrátových systémů do oblasti silnoproudých vedení. Příkladem může být projekt REPLI [25], který byl již ukončen. Další projekty, které byly a jsou realizovány: OPERA [21] a PRIME Alliance [23]. Ty vznikly za účelem standardizace širokopásmové komunikace a nových přístupů v úzkopásmové technologii.

Soutěživé protokoly

Po provedení důkladné analýzy [14] lze konstatovat, že standardní soutěživý způsob přístupu více uživatelů na společné médium není zpravidla schopen dobře využít danou síťovou zátěž. Přímá implementace těchto protokolů není příliš vhodná, zejména pro obtížnou realizaci zabezpečení kvality služeb [19].

Protokoly s dedikovaným přístupem

Z analýzy plyne, že vývoj v této oblasti je stále ve středu zájmu výzkumných týmů. Protokoly s dedikovaným přístupem dokáží elegantněji zajistit kvalitu služeb [1], která je rovněž očekávána



Obr. 2.1: Časový diagram vývoje přístupových protokolů pro technologii PLC.

od technologie PLC. Řešením by mohly být protokoly hybridní, které se snaží z obou oblastí vytěžit maximum.

Protokoly s hybridním přístupem

Snahou hybridních protokolů je zajistit unikátní vlastnosti náhodného a dedikovaného přístupu a integrovat je v jeden ucelený mechanismus. Oblast výzkumu a vývoje v této kategorii, je v porovnání s předešlými protokoly, relativně nová. První výzkumy ukazují, že výsledky realizovaných hybridních přístupů mohou zajistit adekvátní zajištění kvality služeb, které je v této oblasti vyžadováno.

Protokoly využívané v praxi - závěr

Z plošné analýzy protokolů vyplývá, že snahou standardizačních organizací, je zajistit dlouhodobě perspektivní protokoly, které budou robustní, jednoduše integrovatelné a budou zajišťovat kvalitu služeb v síti. Některé standardizované protokoly pro oblast powerline sítí z jiných států jsou postaveny na bázi hybridních mechanismů, které tyto vlastnosti nabízí. To může značit, že právě tato kategorie je řešením pro integraci moderních služeb do PLC. Důkazem toho je i Evropské konsorcium Opera, jehož první výsledky v oblasti přístupové vrstvy směřují do okruhu hybridních protokolů.

Řada standardizačních organizací se také opírá o vyzkoušená, ověřená a známá řešení, která fungují desítky let i v jiných technologiích. Jedná se především o algoritmus CSMA/CD a CSMA/CA, který jsou podpořeny normami CENELEC, ANSI a ISO.

Řada průmyslových řešení však přináší vlastní realizace, které nevycházejí ze standardů a snaží se tak zajistit koexistenci vlastních produktů [20].

Výjimku z výčtu řešení tvoří organizace OPERA a Prime, které se snaží díky široké podpoře a většímu konsorciu prosadit vlastní řešení, realizované na bázi stávajících standardů.

V Kap. 2.1 byly shrnuty přístupové metody pro širokopásmovou a úzkopásmovou PLC komunikaci. Rekapitulací těchto údajů je možné konstatovat, že v komerčním řešení širokopásmových realizací převažují algoritmy s náhodným přístupem. V této analýze se do jisté míry může tato práce opřít o technickou zprávu aliance Opera [20]. Jedná se především o klony algoritmu CSMA. S ohledem na tyto výsledky, bude podrobně analyzována přístupová metoda CSMA v technologii HomePlug.

2.2 Přístupová metoda CSMA

Za účelem optimalizace a simulace přístupové metody pro PLC bude podrobně analyzována komerčně nejrozšířenější technologie přístupu v silnoproudých sítích, technologie HomePlug. Ta využívá přístupovou metodu CSMA/CA. Proto jsou zde shrnuty základní informace o CSMA.

Mnoho MAC protokolů pro PLC bylo odvozeno z bezdrátových LAN sítí a ze sítí Ethernet. Protokoly postavené na bázi CSMA před vysláním naslouchají medium. V případě, že je médium volné, buď zahájí komunikaci nebo vyčkají náhodný časový interval a začnou vysílat svá data. Podle způsobu správy kolizí jsou protokoly standardně rozlišovány na:

- protokoly s detekcí kolize (Collision Detection),
- protokoly s předcházení kolize (Collision Avoidance),
- protokoly s bitovou arbitrází (Bitwise Arbitration),
- protokoly s prevencí kolizí (Prevent Collision).

V oblasti datových komunikací po silnoproudém vedení jsou využívány především první dva způsoby. Z tohoto důvodu budou uvažovány pouze tyto dva způsoby CSMA přístupu.

Další, obecnější, rozdělení CSMA protokolu je na *nepersistentní* a *persistentní*. V nejrozšířenějším komerčním řešení širokopásmové komunikace Homeplug 1.0 a AV [10, 12] je použita nepersistentní varianta CSMA/CA.

2.3 Backoff algoritmy - distribuční koordinační funkce

V předcházející kapitole byly stručně shrnuty základní přístupové metody, používané v moderních komunikačních systémech. S přístupovými algoritmy značně souvisí přístupový mechanismus, backoff algoritmus, který funkcionálně doplňuje metodiky přístupu. Backoff algoritmus udává ve většině případů čas přístupu na společně využívané médium. Výjimku tvoří časově oddělené kanály s explicitně definovaným přístupem.

2.3.1 Uniformní náhodné rozdělení

Uniformní náhodné rozdělení je využito ve většině komunikačních systémů, pro náhodný přístup ke společně využívanému médiu. Náhodná veličina X má uniformní rozložení právě tehdy, když je hustota pravděpodobnosti určena vztahem

2.3.2 Normální, Gaussovo, rozdělení

Gaussovo, označováno také obecně normální rozdělení, má zvonovitý tvar. V technologiích pro generování hodnot backoff algoritmu je rovněž obsaženo, ale spíše se vyskytuje pro generování náhodných veličin na fyzické vrstvě.

2.3.3 Exponenciální náhodné rozdělení

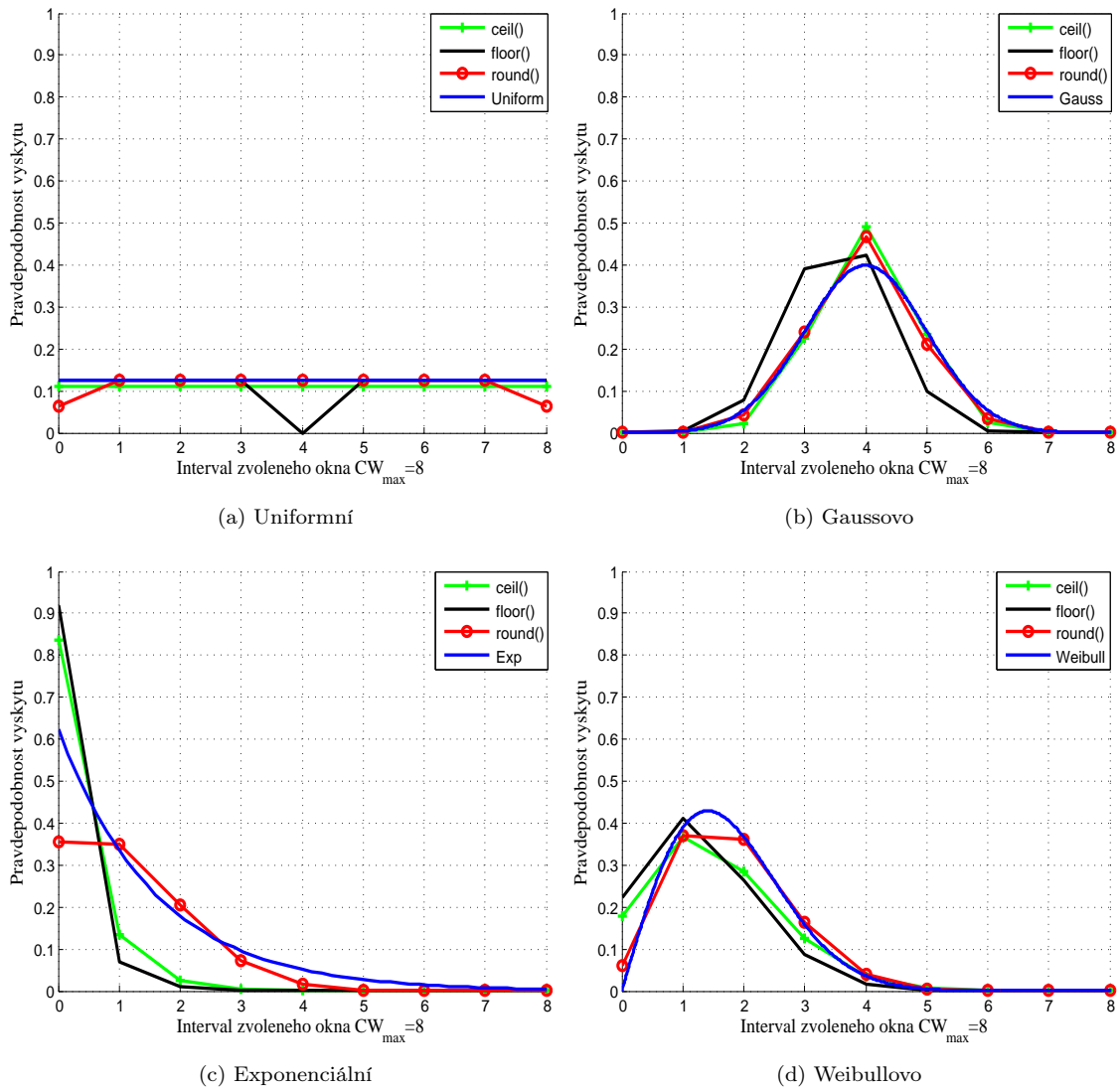
Exponenciální rozdělení pravděpodobnosti je vhodné pro časové intervaly s dobou dobíhání náhodného jevu. Představuje délku intervalu mezi dvěma jevy, např. doba čekání na obsluhu.

2.3.4 Weibullovo náhodné rozdělení

Weibullovo rozdělení je řazeno spíše do druhotných náhodných rozdělení. Prioritní rozdělení, která jsou využívány ve větší míře, jsou uvedeny výše. Weibullovo rozdělení je spíše využíváno v mechanice při únavě materiálu, zde je však zmiňováno z důvodu jeho variability.

2.3.5 Vnitřní zaokrouhlovací funkce

V systémech s náhodnými procesy se využívají diskrétní nebo spojité distribuční rozdělení. Hodnoty těchto rozdělení bývají zaokrouhlována. Je více druhů zaokrouhlovacích funkcí. Výsledky pro různá distribuční rozdělení jsou zobrazeny na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Vlastnosti zaokrouhlovacích funkcí na různé druhy distribučního rozložení

3 ANALÝZA SYSTÉMU HOMEPLUG 1.0

K modelování přístupové vrstvy technologie HomePlug je zapotřebí podrobná analýza. Proto jsou v této kapitole shrnuty základní parametry této technologie. Přístupová metoda v HomePlug je odvozena od schématu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b [16]. Zachovává si princip *collision avoidance* - předcházení kolizí, avšak přistupuje k této realizaci jiným backoff algoritmem. Zároveň s tímto algoritmem, jsou detailněji popsány kvantitativní hodnoty systému.

3.1 Princip odesílání dat v technologii PLC

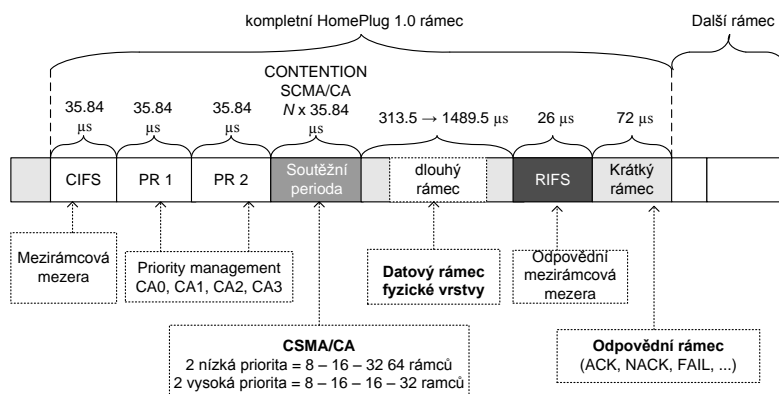
Aby bylo možné odeslat data z vyšších vrstev síťového modelu, musí být tato data, tak jako u jiných technologií, začleněna do nižších vrstev. K datovému bloku z vyšších vrstev jsou v MAC vrstvě přidány nutné hlavičky a identifikátory nezbytné pro komunikaci s protistranou na odpovídající vrstvě síťového modelu.

K datům z vyšší vrstvy je přidána hlavička MAC vrstvy a tvoří tak *MPDU* rámec. Tento rámec je po zapracování zapouzdřen do *PPDU* rámce fyzické vrstvy, ke kterému je také přidána hlavička. V tomto případě se jedná o hlavičky fyzické vrstvy.

3.2 Rámec fyzické vrstvy HomePlug

Kompletní rámec fyzické vrstvy může být vyjádřen v časové oblasti složením ze dvou základních struktur. Jedná se o fixní složku odpovídající hlavičce a variabilní složku, která představuje data. Při odeslání rámce na fyzické vrstvě je nutné připočítat k datové složce rovněž i dobu trvání backoff algoritmu k zajištění předcházení kolizím.

Časové vyjádření rámce fyzické vrstvy je doplněno konkrétnějším časovým vyjádřením jednotlivých subsložek fyzické vrstvy, které se podílí na celkovém časovém zpoždění (viz. Obr. 3.1).



Obr. 3.1: Definice rámců fyzické vrstvy v HomePlug [7].

Fixní složky rámce fyzické vrstvy

V následující podkapitole budou podrobněji popsány fixní složky, které vstupují do rámce fyzické vrstvy. Jedná se o složky, které se vztahují k fyzické vrstvě. Nebudou zde tedy popsány datové struktury nadvrstev. Ty zmiňuje následující kapitola MAC vrstvy. Základní fixní složky fyzické

vrstvy jsou hlavní mezirámcová mezera (CIFS), složky pro prioritní management (PR0 a PR1), mezirámcová mezera pro odeslání potvrzení (RIFS), potvrzení (ACK, NACK).

Variabilní složky rámce fyzické vrstvy.

V následující podkapitole budou popsány variabilní složky, které vstupují do rámce fyzické vrstvy. Jedná se o složky, které se vztahují k fyzické vrstvě. Nebudou zde tedy popsány datové struktury nadvrstev, o kterých je zmíněno v části MAC vrstvy. Základní fixní složky fyzické vrstvy jsou:

- soutěžní doba - doba čekání stanice k zahájení vysílání,
- datová složka dlouhého rámce.

3.3 Rámce MAC vrstvy HomePlug

Existují dva druhy rámců, které jsou definovány v MAC vrstvě technologie HomePlug. Dlouhý rámec, který je využíván pro odesílání dat a krátký rámec, který je využíván pro potvrzování dat. Další podkapitoly tyto rámce více analyzují a přibližují.

Dlouhý rámec

Dlouhý rámec je složen z návěští, řízení rámce, řízení segmentu, MAC adresy cíle, MAC adresy zdroje, data, výplň, kontrolní součet, EFG [11].

Krátký rámec

Tento rámec slouží jako odpovědní zpráva odesílateli a obsahuje status doručení. Krátký rámec je složen z návěští a řídicího rámce. Obě odpovídají popisu zmiňovaném v předchozí kapitole. Rozdíl je v naplnění polí. Typ řídicího rámce je nastaven na potvrzování (ACK, NACK).

3.4 Back-off algoritmus (BF)

BF algoritmus slouží k zajištění bezproblémového přístupu na společně využívané médium. Hlavní funkcí tohoto algoritmu v technologii HomePlug je zajistit, aby rámec, který uzel vyšle, byl bez problému přijat a potvrzen. Za tímto účelem jsou v systému zavedeny mechanismy pro snižování kolizí.

3.4.1 Proměnné vstupující do BF algoritmu

Ke snížení pravděpodobnosti kolize je v BF algoritmu technologie HomePlug zavedena řada proměnných. Hodnoty těchto proměnných pak určují chování přístupu uzlu ke společně využívanému médium. Mezi základní parametry BF algoritmu patří:

- BPC - Backoff Procedure Event Counter - počítadlo procedur přístupu.
- BC - the Backoff Counter - počítadlo počtu timeslotů - pokusů poslechu média.
- DC - the Deferral Counter - penalizační počítadlo v případě zaneprázdněného média.
- CW - the Contention Window - velikost okna - počet timeslotů v dané proceduře.

Každá stanice při začátku vysílání inicializuje hodnotu $BPC = 0$ a zvolí náhodné číslo BC z intervalu $BC = \langle 0, CW_{MAX} \rangle$, kde CW je velikost okna. Hodnota počítadla DC je zvolena

v závislosti na hodnotě BPC a stavu média podle Tab. 3.1. Při každé reinicializaci procedurního počítadla jsou hodnoty počítadel BC resp. DC rovněž obnoveny.

Tab. 3.1: The backoff procedure values of HomePlug system.

BPC	Priorities CA3, CA2		Priorities CA3, CA2	
0	DC = 0	CW(W_0) = 8	DC = 0	CW(W_0) = 8
1	DC = 1	CW(W_1) = 16	DC = 1	CW(W_1) = 16
2	DC = 3	CW(W_2) = 16	DC = 3	CW(W_2) = 32
3+	DC = 15	CW($W_{3...}$) = 32	DC = 15	CW($W_{3...}$) = 64

Způsob vysílání rámce v HomePlugu pomocí výše zmiňovaných počítadel, lze popsat na pseudokódu daného algoritmu.

Po inicializaci hodnoty počítadel BC a DC je BPC inkrementováno o jedna. Tímto způsobem je stanice zvolena základní soutěžní perioda, při které detekuje médium. Detekce média probíhá vždy po timeslotech, které jsou standardem definovány $ts = 34, 84 \mu s$.

- Pokud v daném časovém slotu BF procedury se médium jeví jako nečinné a počítadlo BC není rovno nule, BC je dekrementováno o jedničku, zatímco DC a BPC jsou definovány.
- Pokud je BC rovno nule, stanice začne vysílat. Pokud je médium v daném časovém okamžiku obsazené, hodnoty BC a DC jsou dekrementovány o jedničku.
- Pokud hodnota počítadla $DC < 0$, BPC je inkrementováno na vyšší úroveň dle definované tabulky a obě hodnoty BC a DC jsou reinicializovány. V tomto případě je BC voleno znovu náhodně v definovaném intervalu $< 0, CW_{i-1} >$ kde i je odpovídající počet soutěžních kol.

Princip metody je rozsáhlejší a vstupují do něj další proměnné. Ty však v navrženém modelu pozbývají význam.

3.5 Analýza a simulace CSMA/CA algoritmu

Technologie HomePlug je často srovnáván s bezdrátovou technologií IEEE 802.11b. Je to především z toho důvodu, že fyzická vrstva je do jisté míry u obou technologií stejná. Obě technologie pro šíření signálu využívají podobné modulační techniky a mechanismy. Na společně využívaném médiu není možné detekovat kolizi jak je tomu např. u Ethernetu. Kolize na tomto médiu je detekována při nepřijetí potvrzovacího paketu, nebo v případě, že médium je po odeslání paketu zaneprázdněno jinou stanicí.

Obě technologie využívají metodu CSMA/CA proti předcházení kolizím. Princip této metody byl v dostatečné míře probrán v předešlé kapitole.

K porovnání algoritmů byl realizován model diskrétního simulátoru v prostředí Matlab s následující mírou abstrakce:

- v síti je n stanic se stejnou prioritou,
- všechny stanice mají v počátku komunikace stejné výchozí podmínky,
- po odeslání rámce má stanice okamžitě ve frontě rámec další,
- detekce kolize je realizována bezprostředně poté, co stanice vygeneruje svůj čas k odeslání,
- přenosový kanál je považován za ideální a fyzická vrstva není aplikována.

3.5.1 Účinnost algoritmu CSMA/CA technologie IEEE 802.11b a HomePlug

Účinnost algoritmu je vyjádřena poměrem úspěšně odeslaných rámců k celkovému počtu rámců podle

$$\eta = \frac{F_S * T_{FRA}}{F_S * T_S + F_C * T_C + F_I * T_I}, \quad (3.1)$$

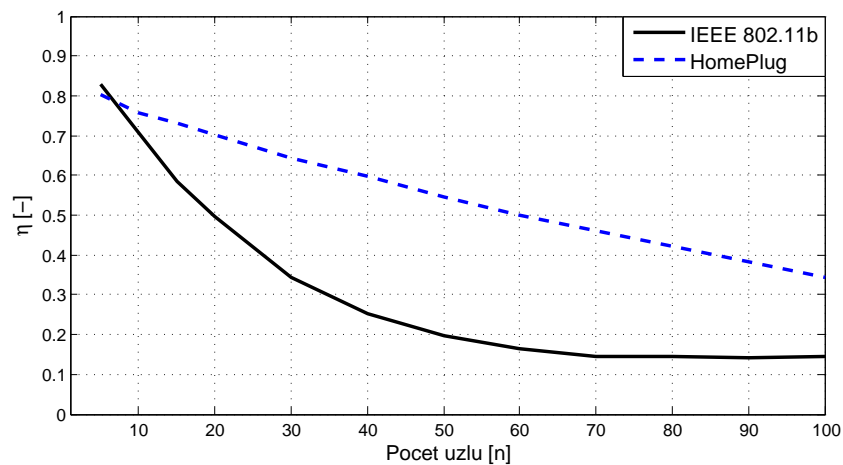
kde F_S je celkový počet úspěšně odeslaných rámců, T_{FRA} je čas nutný pro odeslání jednoho rámce, který je daný přenosovou rychlostí technologie a maximální velikostí paketu na MAC vrstvě. T_S je čas nutný pro úspěšné odeslání a zpracování jednoho rámce, F_C je celkový počet kolidujících rámců, T_C je čas nutný pro zjištění kolize, F_I je celkový počet rámců čekající ve frontě a T_I je čas jednoho timeslotu. Pro technologii IEEE 802.11b byly použity tyto z Tab. 3.2. Pro technologií HomePlug byly použity tyto z Tab. 3.3.

Tab. 3.2: Časové parametry technologie IEEE 802.11b pro analýzu backoff algoritmu.

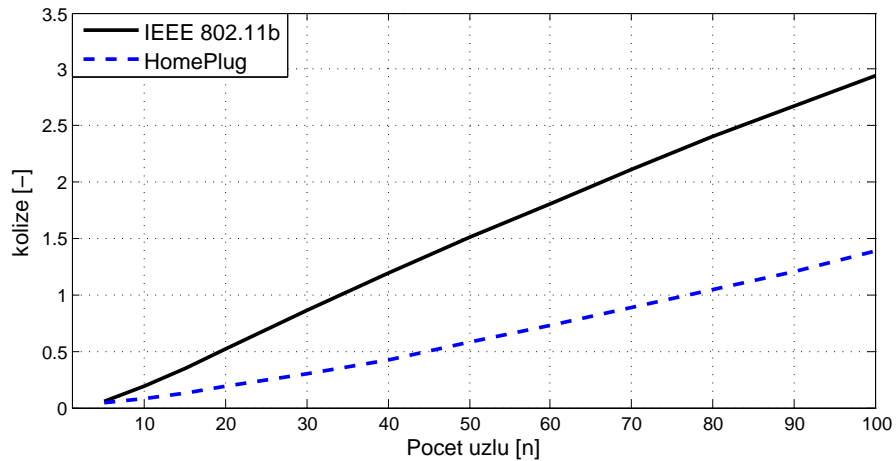
T_{FRA} [TSlot]	T_{ACK} [TSlot]	$SIFS$ [TSlot]	$DIFS$ [TSlot]	TS [TSlot]	TC [TSlot]	TI [TSlot]	$TSlot$ [μs]
165	3	0.5	2.5	171	164.5	1	20

Tab. 3.3: Časové parametry technologie HomePlug pro numerickou analýzu backoff algoritmu.

T_{FRA} [TSlot]	$PR_{0,1}$ [TSlot]	T_{ACK} [TSlot]	$RIFS$ [TSlot]	$CIFS$ [TSlot]	TS [TSlot]	TC [TSlot]	TI [TSlot]	$TSlot$ [μs]
40	1	2	1	1	46	44	1	35.84



Obr. 3.2: Účinnost MAC algoritmu v HomePlug a IEEE 802.11b.

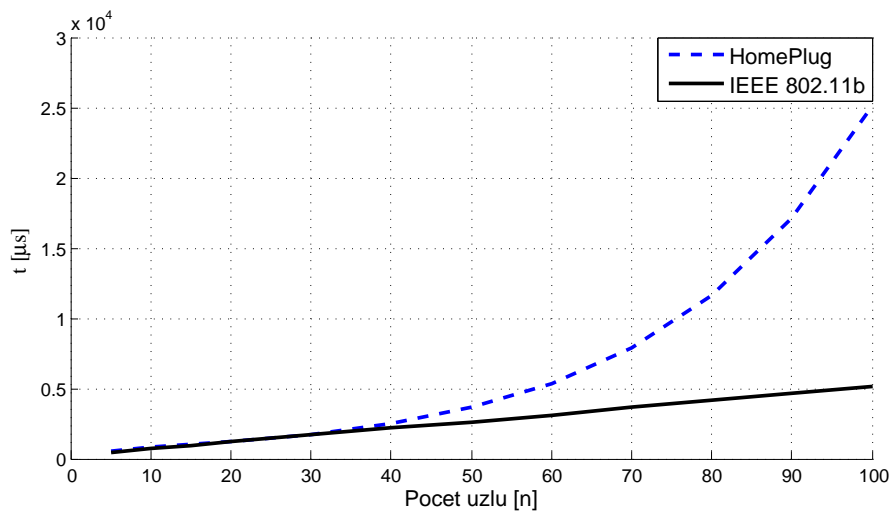


Obr. 3.3: Průměrný počet kolizních stavů v síti v závislosti na počtu uzlů.

Podle předpokladu se s počtem stanic propustnost algoritmu snižuje. Toto chování je způsobeno zvyšujícím se počtem kolizí, které se vzrůstajícím počtem uzlů v síti nastávají s vyšší pravděpodobností Obr. 3.3.

3.5.2 Analýza velikosti okna CSMA/CA algoritmu

Velikost soutěžícího okna backoff algoritmu je u metody CSMA/CA dynamicky upravována v závislosti na aktuálních podmínkách provozu na společně využívaném médiu. Výsledky naznačují, že velikosti okna obou technologií se liší pouze v charakteru jeho narůstání.



Obr. 3.4: Porovnání velikosti okna algoritmu HomePlug a IEEE 802.11b

Obě technologie mají téměř stejný časový průběh. Větší rozdíl nastává při cca 50ti uzlech, kdy se HomePlug začne značně odlišovat od IEEE 802.11b. Z výsledků plyne, že technologie HomePlug se snaží předcházet kolizím na úkor prodloužení časového limitu, zatímco technologie IEEE 802.11b do sítě vnáší větší rizikovitost kolize Obr. 3.3.

4 OPTIMALIZACE DISTRIBUČNÍ FUNKCE

Jedním z doposud publikovaných výsledků optimalizace přístupové metody technologie HomePlug byla provedena autory Tripathi a spol. v [26]. Výsledkem práce je dvoudimenzionální Markovův model pro analýzu časového okna backoff algoritmu.

Snahou této disertační práce je provést optimalizaci přístupové metody jiným způsobem. Ten bude v následující kapitole představen.

4.1 Úprava vnitřních funkcí backoff algoritmu

Jeden z hlavních nedostatků distribuční funkce v technologii HomePlug je rovnoměrné chování algoritmu při zvyšování zátěže. Simulací a analýzou generování BC parametru bylo zjištěno, že uniformní distribuce do značné míry brání efektivnímu využití přiděleného pásma pro generování hodnot parametru. Pro malý počet uzlů není tak zapotřebí stejná šířka pásma jako pro větší počet uzlů. Tuto metodu se proto snaží tato práce více rozpracovat s využitím jiných distribučních funkcí.

4.1.1 Optimalizace generátoru náhodných hodnot

HomePlug využívá pro generování náhodných čísel backoff okna uniformní distribuční rozdělení. Z předchozí analýzy plyne, že síť po ustálení pozvolna saturuje. Při zvyšování zátěže se projeví uniformní rozdělení pozvolným klesáním propustnosti algoritmu. Toto logické chování systému je dáno postupným zaplňováním distribuční funkce. Nedostatek současného algoritmu je rychlý saturační nárůst maximální velikosti okna.

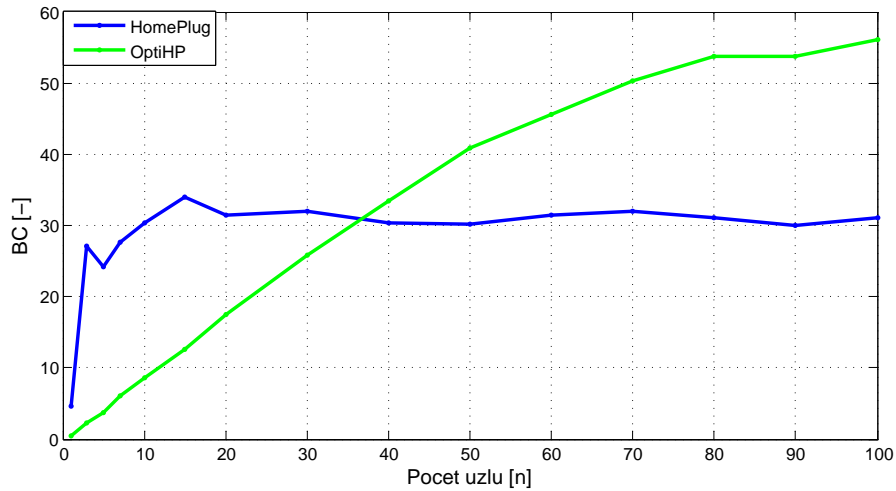
Pro optimalizaci algoritmu byla do přístupové metody vnesena závislost, která se toto chování funkce snaží aproximovat. Optimalizace vychází z předpokladu, že při zvyšujícím se počtu uzlů v síti dochází k saturaci, která se v určitém bodě zastaví (ustálený stav systému).

HomePlug má maximální velikost okna nastaven dle specifikace na $CW_{max} = 64$. Předcházení kolize je zde realizováno nejen náhodnou velikostí časového okna, ale i postupným detekováním linky a úpravou velikosti tohoto okna. Analýza prokázala, že od určité zátěže síť dosahuje maximální velikosti intervalu okna. Toho bylo využito pro realizaci aproximačního modelu. Mírné navýšování okna do maximálního ustáleného stavu parametru BC (do 15ti uzlů) je dáno algoritmem predikce kolize. Od tohoto počtu však systém využívá čtvrtý řád procedurálních čítačů (viz. Tab. 3.1).

Pro rovnoměrnější ustálení generování BC parametru, byla využita Weibullova distribuce. Rozptyl generování byl nastaven na median současného algoritmu. Ten se s počtem uzlů zvětšoval a posouval k maximální hodnotě okna. Tímto zůstaly základní parametry přístupové metody nezměněny. Obr. 4.1 ukazuje postupné zvyšování BC parametru.

4.2 Výsledky optimalizovaných metod

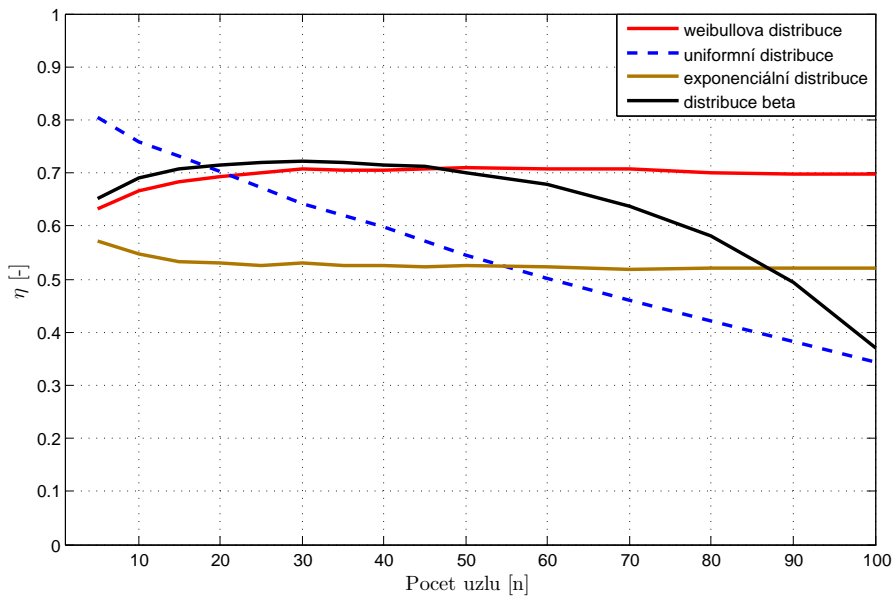
Následující kapitola shrnuje výsledky optimalizované metody. Výsledky naznačují, že závislost zatížení sítě na generování parametrů přístupové metody je jedna z možností jak také předcházet snížené propustností. Využíváním adaptivních algoritmů je síti umožněno se dynamičtěji přizpůsobovat. Dílčí výsledky těchto výzkumů byly publikovány v [3]. Testování probíhalo numerickou analýzou.



Obr. 4.1: Rovnoměrná distribuce BC parametru.

4.2.1 Propustnost algoritmu

Předmětem výzkumu bylo zvýšení propustnosti algoritmu v závislosti na použití jiných distribučních algoritmů. Uniformní rozdělení, které je ve většině technologií využito, by se mělo chovat podle předpokladů nejspřavedlivěji. Dílčí výsledky však ukazují, že v případě nelinearity systému tomu tak není. Rovněž se ukázalo, že zvýšení propustnosti neznamená vždy zlepšení chování systému.



Obr. 4.2: Optimalizace propustnosti algoritmu v HomePlug.

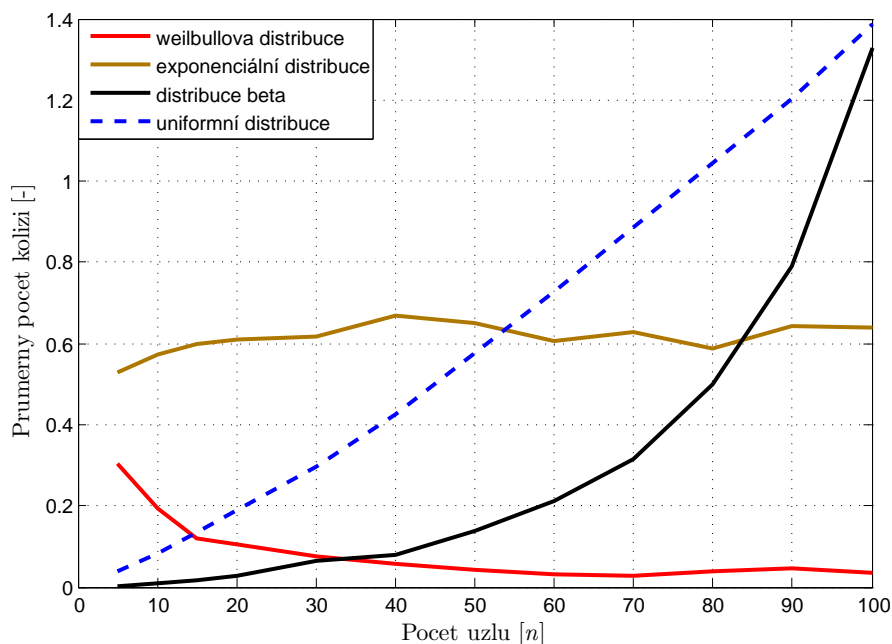
Některé ideální výsledky byly způsobeny dlouhou čekací dobou okna. To znamená, že sice bylo v systému méně kolizních stavů, avšak uzly měly mnohem větší interval, z kterého generovaly své BC parametry.

Výsledky potvrzují, že zlepšené chování algoritmu HomePlug se projevuje po dosažení hranice

cca 20ti uzlů. Před tímto hraničním bodem dosahuje uniformní distribuce lepších výsledků.

4.2.2 Průměrný počet kolizí

Předmětem této kapitoly bylo sledování počtu kolizí, které systému značně snižují propustnost. Zde se některé distribuce projeví značně překvapivě. Aby bylo porovnání objektivní, podmínky distribučních funkcí zůstaly nezměněny.



Obr. 4.3: Optimalizace kolizí algoritmu v HomePlug.

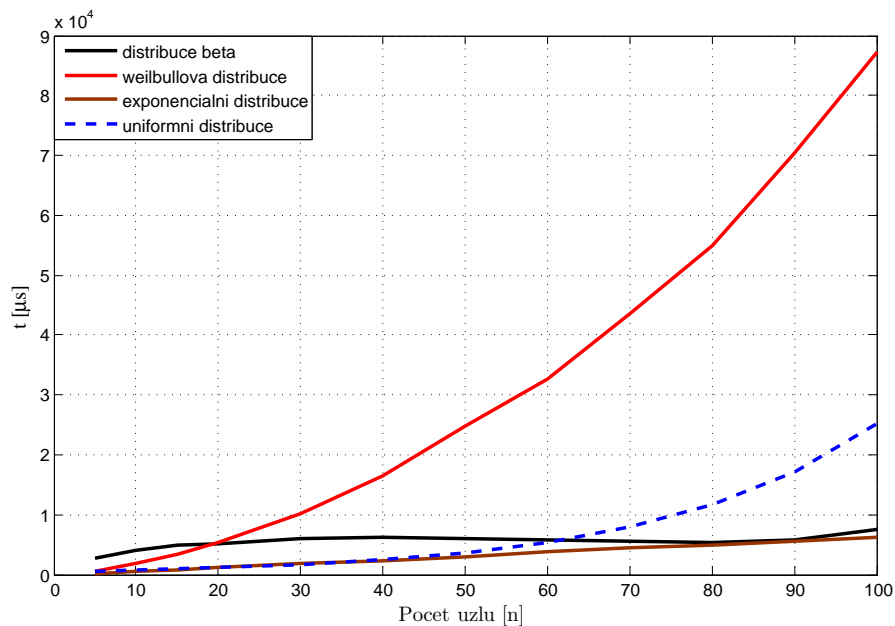
Z dílčích výsledků nejnižšího počtu kolizí dosahovala Weibullová distribuce. U této distribuce se dokonce počet kolizních stavů snižoval. Bylo to dáno podmínkami, které byly této distribuci dány. Pro nízký počet uzlů v systému byla distribuční funkce relativně úzká. S vyšším počtem uzlů se toto pole rozšiřovalo a tím se snižovala i pravděpodobnost dvou stejně vygenerovaných parametrů BC .

4.2.3 Průměrná velikost doby čekání

Celková průměrná velikost doby čekání na uzel je jedním z objektivních parametrů jak porovnat backoff algoritmus. Výsledky ukazují, že nejdelších časů dosahovala Weibullová distribuce. Tím se do značné míry objasňuje ideální propustnost, se kterou bylo v analýze dosaženo.

4.3 Zhodnocení dosažených výsledků

S ohledem na kapitolu o vnitřních funkcích backoff algoritmu byl proveden výzkum těchto funkcí a jejich vliv na technologii HomePlug [3]. Podrobná simulační analýza prokázala, že procedura ochrany proti kolizím s využitím uniformní distribuce je sice dostatečná pro nízký počet uzlů, ale ztrácí již při větším počtu uzlů.



Obr. 4.4: Optimalizace průměrné doby čekání algoritmu v HomePlug.

Z výsledků je patrné, že zaokrouhlovací funkce i distribuční algoritmy výrazně ovlivňují chování backoff algoritmu. V normě technologie HomePlug se však o těchto funkcích nijak nehovoří.

Hlavní výhoda optimalizace spočívá v odstranění zmiňovaného nedostatku. Analýza těchto algoritmů je časově náročná, proto je možné, že optimalizace má ještě své nenalezené rezervy. Průběžné výsledky jsou uvedeny v příloze této práce.

5 MODELOVÁNÍ PŘÍSTUPOVÉ VRSTVY

Za účelem bližší analýzy a optimalizace backoff algoritmu, je zapotřebí přístupovou vrstvu simulovat - namodelovat. K analýze vrstvy je možné přistoupit různými způsoby.

Budou představeny dva Markovovy modely, které byly pro technologii HomePlug publikovány. Oba modely vycházejí z analýzy distribuční funkce v IEEE 802.11b, kterou jako první publikoval Bianchy v [6]. Oba modely jsou numericky ověřeny.

V následujících kapitolách se práce zaměřuje na hlubší analýzu HomePlugu a porovnává jej s bezdrátovou technologií. Je představena analýza plovoucího okna obou technologií a analýza základního parametru backoff počítačů, parametr BC . V neposlední řadě je porovnán optimalizovaný backoff algoritmus HomePlug. Všechny analýzy jsou provedeny v saturačních podmínkách bez aproximace s mírou abstrakce, která je definována. Saturační podmínky mohou být vhodnou alternativou na náhled algoritmů.

Pro analýzu sítě v saturačních podmínkách, je zapotřebí stanovit základní míru abstrakce modelu:

- v síti existuje n uzlů připravených k vysílání rámce,
- všechny stanice vysílají data se stejnou prioritou,
- každá stanice obdrží rámec okamžitě po odvysílání rámce,
- kolizní stav je detekován v případě, že v daný moment mají některé stanice stejnou hodnotu čítače BC , jejíž započítání bylo ve stejný okamžik.

5.1 Simulační model

Jedním ze způsobů ověření je simulační analýza, která abstrahuje reálné podmínky, které do modelu vstupují. Tyto podmínky jsou pomocí matematických funkcí nahrazovány. Tento způsob analýzy je založen na využití jednoho ze simulačních nástrojů. Mezi nejznámější patří Opnet Modeler [22] nebo Network Simulator 2 [8]. Žádný z těchto nejrozšířenějších nástrojů však neobsahuje knihovnu pro technologii PLC.

5.2 Analytický model

Další ze způsobů je analytický model sítě. Jedním ze způsobů analytického vyjádření chování sítě jsou Markovovy modely, které např. matematicky popisují chování jednotlivých uzlů sítě s definovanou mírou abstrakce. Jsou představeny dva modely, které byly publikovány. Tyto modely abstrahují nepotřebné vrstvy vstupující do jednoho problému a zaměřují se na konkrétní část. Dále je představen aproximační model, který oba modely do značné míry zjednodušuje. Všechny tři modely jsou numerickou analýzou ověřeny. Práce ukazuje, že aproximační model podává rovněž dobré výsledky. Další analýzy pak budou prováděny s danou mírou abstrakce pro všechny tři modely.

5.2.1 Dvoudimenzionální model HomePlug

Ve způsobu představeném v [9] je využit dvourozměrný Markovův model, který bere v úvahu především hodnoty časovačů DC a BC . Toto zjednodušení je nezávislé na hodnotě procedurálního čítače BPC , který je inkrementován v případě obsazeného média, kdy hodnota penalizačního čítače $DC < 0$.

5.2.2 Třídídimenzionální model HomePlug

Druhou analytickou metodou publikovanou pro MAC vrstvu technologie HomePlug je tří-dimenzionální Markovův model autorů Jung a spol. [17]. Na rozdíl od dvoudimenzionálního modelu autoři zavádí do modelu i hodnotu proměnné BPC, která určuje de facto dobu obsazenosti média. Složitost modelu tak značně narůstá. Grafické znázornění je obdobné jako u dvoudimenzionálního modelu s tím, že jsou doplněny ještě další vrstvy čítače BPC.

Tímto způsobem by mělo být dosaženo přesnějších výsledků. Simulace však potvrzuje, že výsledky se téměř shodují.

5.3 Aproximační model technologie HomePlug

S ohledem na dvoudimenzionální model lze předpokládat, že HomePlug relativně rychle dosáhne nejvyššího stupně procedurálního počítadla. Za tohoto předpokladu je možné aproximovat předešlé tři procedurální počítadla obdobným způsobem jako to provedli autoři v [9].

V tomto případě do modelu vstupuje hlavní proměnná $BC_{max} = 64$ [4].

5.3.1 Odvození pravděpodobnosti kolize

Nechť je v systému dáno n uzlů. Každý z nich si zvolí svůj parametr vysílání jako jednotku času t_n se stejnou uniformní pravděpodobností

$$p_n = \frac{1}{BC_{max}} \quad (5.1)$$

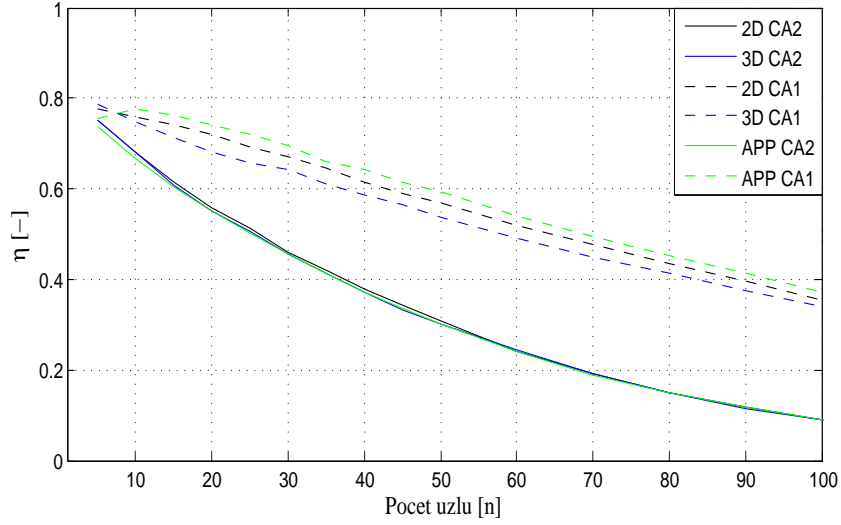
Z pohledu modelu dojde vždy k dekrementaci čítače okna. Proto pravděpodobnost, že stav tohoto počítadla bude dekrementován je v tomto modelu rovno jedné. Jestliže stav počítadla bude rovna nule, dojde k pokusu o odvysílání rámcu. Tento pokus je roven jedné, neboť kolize se v systému identifikuje v době, kdy dojde k pokusu o odeslání. Pravděpodobnost, že stanice při dosažení $BC = 0$ se nepokusí rámcem odvysílat je mírou abstrakce zanedbána. Jedná se o poruchové stavy, které jsou v modelovém případě zanedbány.

5.3.2 Stanovení aproximačního modelu

Stanovením předcházejících kolizních pravděpodobností je systém kalkulován na základě aktuálních podmínek. Můžeme tak stanovit s jakou pravděpodobností za daných podmínek v systému stanice odvysílá svůj paket. Není zde zahrnuta rekurze systému, proto je tento model značně jednodušší a výpočetně méně náročný než předcházející modely.

Pro stanovení okna systému byl použit maximální časový interval systému HomePlug $BC_{max}=64$. Ve stanoveném modelu systému byla aproximována procedura detekce média v průběhu časového okna. K tomu bylo přistoupeno na základě numerické simulace systému HomePlug Obr. 5.1. Ověřením 2D, 3D a zamýšlenou aproximací bylo zjištěno, že tato procedura na propustnost sítě nemá znamenitý vliv.

Pro ověření modelů, byl realizován 2D, 3D a aproximační diskretní simulátor, který všechny tři zmiňované přístupy porovnává. V realizaci 3D modelu proto vstupovaly do backoff algoritmu všechny parametry HomePlug. Ve 2D modelu byl parametr $BPC = 4$. Proto do simulace vstupovala pouze poslední dvojice parametru DC a BC . V aproximačním modelu byl využit pouze parametr BC a jeho maximální možná hodnota dle specifikace $BC = 64$.



Obr. 5.1: Porovnání jednotlivých modelových přístupů.

Všechny tři modely se po dostatečném počtu iterací dostaly do ustáleného stavu, při kterém vykazovaly rovnocenné průběhy.

Pro stanovení modelu byla vybrána metoda rekurzivního dopočtu pravděpodobností kolize. Analytický model rekurzivně stanoví množství volného pásma sítě s předem stanovenými podmínkami. Za tímto účelem bylo zapotřebí stanovit pravděpodobnosti výskytu kolize n -tic v n uzlovém systému.

Definice pravděpodobností pro $n=5$

Hodnoty parametrů uzlů jsou generovány z náhodného intervalu $x_i = \langle 0, 63 \rangle$ pomocí uniformního rozložení. Je uvedeno odvození pravděpodobnostních matic pro pět uzlů.

Pro stanovení pravděpodobností bude použita následující konvence. Uzly, které budou mít vygenerovanou hodnotu stejného BC budou označeny NC_i , kde i je počet kolidujících dvojic resp. trojic. Počet uzlů, které budou mít vygenerovanou hodnotu odlišného BC a nebudou v kolizi s žádným jiným, bude označen NS . Proto pravděpodobnost p_i , že padnou následující možnosti, je:

- $NC_1 = 5$ a $NS = 0$:

$$p_1 = \frac{BC_{max}}{BC_{max}^n}, \quad (5.2)$$

- $NC_1 = 4$ a $NS = 1$:

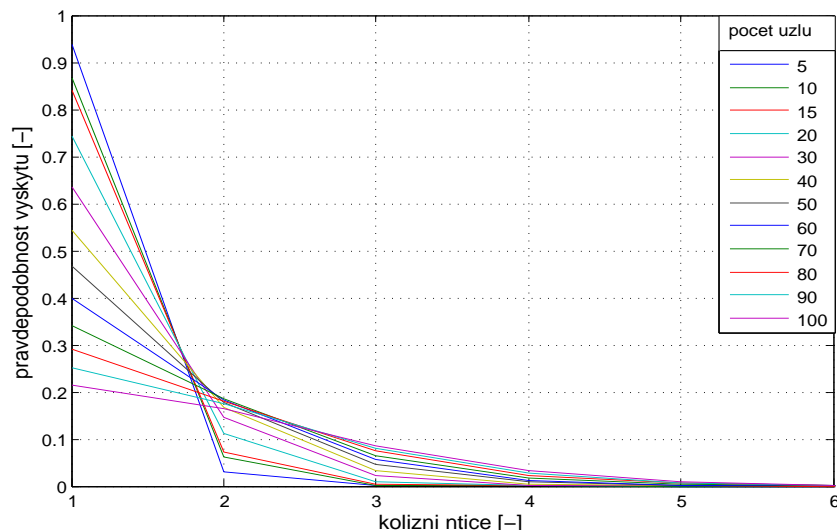
$$p_2 = \binom{n}{NS} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (5.3)$$

- $NC_1 = 3$ a $NS = 2$:

$$p_3 = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max-i}}{BC_{max}^n}, \quad (5.4)$$

- $NC_1 = 3, NC_2 = 2$ a $NS = 0$:

$$p_4 = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{BC_{max} \cdot BC_{max-1}}{BC_{max}^n}, \quad (5.5)$$



Obr. 5.2: Pravděpodobnost výskytu kolizních ntic technologie HomePlug pro prioritní režim CA1.

- $NC_1 = 2$ a $NS = 3$:

$$p_5 = \binom{n}{NC_1} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{n-NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (5.6)$$

- $NC_1 = 2$, $NC_2 = 2$ a $NS = 1$:

$$p_6 = \frac{1}{2} \binom{n}{NC_2} \binom{n - NC_1}{NC} \cdot \frac{\prod_{i=0}^{NC_1+NC_2} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (5.7)$$

- $NC = 0$ a $NS = 5$:

$$p_7 = \frac{\prod_{i=0}^{NS} BC_{max} - i}{BC_{max}^n}, \quad (5.8)$$

kde

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1. \quad (5.9)$$

Na základě vyčíslení těchto pravděpodobností je možné vyčíslit, s jakou pravděpodobností se v systému objeví n -tice stejných hodnot. Odvozování všech kombinací pro větší počet uzlů je realizováno obdobným způsobem. Při větším počtu uzlů je počet kombinací stavů, které mohou nastat, vysoký a odvození všech variant je časově náročné. Proto byl realizován simulační skript, který vyhodnocuje počet všech stavů jednotlivých kombinací. Obr.5.2 ukazuje grafické znázornění pravděpodobnosti výskytu kolizních n -tic pro prioritní režim CA1.

Pravděpodobnost úspěšného odeslání PS je vždy pro $NS = n$.

Pro všechny ostatní případy se systém nachází v kolizním stavu z důvodu vygenerování stejných hodnot parametru BC . Tato pravděpodobnost je dána součtem všech zbývajících pravděpodobností p_{n_i}

$$P_C = \sum_{i=2}^n p_{n_i}. \quad (5.10)$$

Pravděpodobnost, kdy se systém nachází v klidovém stavu je dán opačným jevem k P_C a P_S

$$P_I = 1 - P_C - P_S. \quad (5.11)$$

Na základě těchto výsledků, je možné vyjádřit propustnost jako

$$\eta = \frac{P_S * T_{FRA}}{P_S * T_S + P_C * T_C + P_I * T_I}, \quad (5.12)$$

kde P_S je pravděpodobnost úspěšně odeslaných rámců, T_{FRA} je čas nutný pro odeslání jednoho rámce, který je daný přenosovou rychlostí technologie a maximální velikostí paketu na MAC vrstvě. T_S je čas nutný pro úspěšné odeslání a zpracování jednoho rámce. P_C je pravděpodobnost, že systém bude v kolizi. T_C je čas nutný pro zjištění kolize. P_I je pravděpodobnost, kdy se systém nachází v idle režimu a T_I je čas jednoho timeslotu.

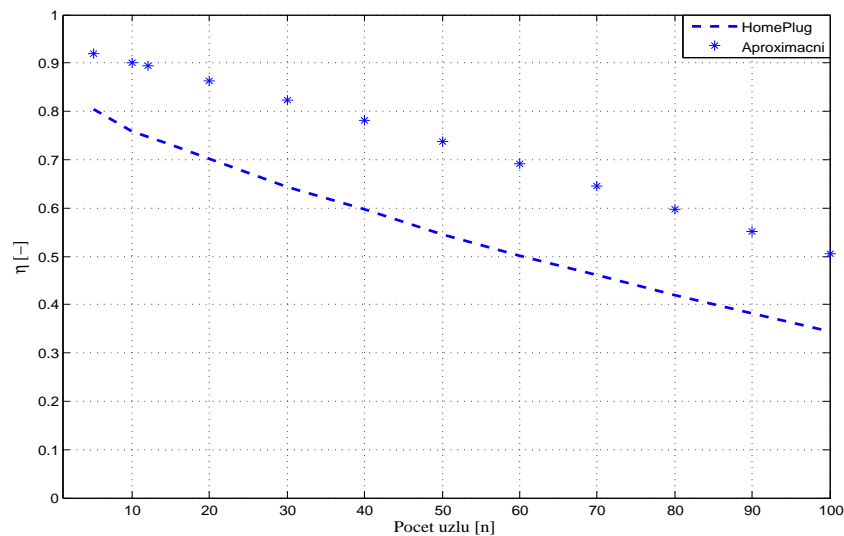
Obr. 5.3 ukazuje výsledky aproximačního analytického modelu pro prioritní režim CA1. Čárkovaný průběh propustnosti jsou simulace standardního systému HomePlug. Za tímto účelem byl použit realizovaný, událostmi řízený, diskrétní simulátor. Tento průběh odpovídá 3D a 2D modelům, které byly publikovány ve [9] resp. ve [17]. Druhý průběh již odpovídá analytickým výsledkům. Z grafu je vidět, že analytické výsledky kopírují průběh klesání propustnosti v celém pásmu. Hodnoty analytických výsledků však vychází +10%. To je pravděpodobně způsobeno aproximací, která byla provedena.

I přesto, že výsledky nevycházejí zcela podle představ, je možné je považovat za využitelné z důvodu výhod, které tato metoda nabízí.

Mezi výhody realizovaného modelu jsou rychlost a menší výpočetní nároky na analýzu. To platí i pro běžnou, událostmi řízenou simulaci, jejíž doba trvání převyšovala dobu výpočtu analytického modelu.

5.4 Shrnutí modelování přístupové vrstvy

Kapitola se zabývá modelováním přístupové vrstvy systému HomePlug. Při řešení aproximačního modelu byly realizovány simulační modely, které potvrzují výsledky a funkčnost již publikovaných



Obr. 5.3: Výsledky analytického modelu pro prioritní režim CA1.

přístupů (2D model [9] a 3D model [17]). Simulace naznačovaly, že získání výsledky obou modelů jsou téměř jednotné. Na základě tohoto, byl stanoven jednodimenzionální saturační simulační model. Tento model ukazuje, že rekurzivní závislost v algoritmu výrazně neovlivňuje výsledky simulací [4].

V tomto ohledu jsou stanoveny hodnoty aproximačního modelu, do kterého vstupuje velikost okna backoff procedury jako základní parametr backoff algoritmu technologie HomePlug. Pro prioritní režim CA1 byla maximální velikost tohoto okna omezena na maximální hodnotu specifikace HomePlug $BC_{max} = 64$. Pro druhý prioritní režim CA2 byla maximální velikost tohoto okna omezena na maximální hodnotu specifikace HomePlug $BC_{max} = 32$.

Jsou stanoveny teoretické předpoklady pravděpodobnostních funkcí do pěti uzlů. Při zvyšujícím počtem uzlů dochází ke zvyšování počtu možných kombinací. Pro takový počet kombinací je pak obtížně specifikovat všechny pravděpodobnostní funkce do požadovaného počtu uzlů (počet uzlů byl pro porovnání stanoven také na 100). K zajištění těchto pravděpodobností do modelu a jeho ověření, byl realizován simulační skript. Na základě simulací byly následně vyhodnoceny hodnoty těchto pravděpodobností numerickou analýzou. Získané hodnoty pravděpodobnostních funkcí jsou pak vstupními parametry do výpočtu propustnosti.

Výsledky modelu naznačují, že v důsledku aproximace dochází k mírnému zkreslení. Charakter průběhu kopíruje průběh standardní propustnosti technologie HomePlug.

ZÁVĚR

Datové přenosy po silnoproudých vedeních jsou jednou z možností poskytování komplexních telekomunikačních služeb. Tato disertační práce se zaměřuje na podrobnou analýzu nejvýraznějšího zástupce v oblasti širokopásmových přenosů po silnoproudých vedeních, technologii HomePlug. Především se práce zaměřuje na přístupovou metodu, která do značné míry ovlivňuje chování síťových technologií.

V navazující části jsou kladeny základní cíle. Jedním z hlavních cílů práce je zjednodušení současných modelů pro technologii a optimalizace distribuční funkce algoritmu HomePlug.

Na stanovené dílčí cíle navazuje podrobná analýza základních norem a řešení v této oblasti, která tak shrnuje současný stav řešení v problematice PLC. V další části současného stavu řešení se práce již zaměřuje na shrnutí základních poznatků z oblasti přístupových metod. Seznamuje se základními algoritmy, které byly vyvinuty pro oblast přístupových sítí.

Na současný stav navazuje podrobná analýza vybrané technologie HomePlug. V této části se práce zaměřuje na analýzu přístupové vrstvy. Je zde především provedena základní analýza přístupového algoritmu. Ten je porovnán s bezdrátovou technologií 802.11b, z které daná přístupová metoda vychází. Z výsledků je patrné, že standard HomePlug se zaměřil na predikci kolize a tím zvýšení propustnosti algoritmu.

Pro potřebu analýzy byly realizovány diskrétní simulační modely v prostředí Matlab. Ty vycházely z již publikovaných možných přístupů modelování. Na základě analýzy vyplynulo, že některé části těchto modelů mohou být do jisté míry aproximovány. To umožnilo některé simulace značně urychlit. Byl realizován aproximační model pro numerickou analýzu. Tento model aproximuje procedurální kola technologie HomePlug tím, že je svazuje pouze do jednoho procedurálního kola.

Aproximační diskrétní numerický model byl využit pro analýzu různých distribučních funkcí. Průběžné výsledky z analýz přístupové metody v technologii HomePlug naznačují, že závislost zatížení sítě na generování parametrů přístupové metody je jedna z možností, jak také předcházet snížení propustnosti při větším počtu uzlů. Při nízkém počtu uzlů jsou tyto rozdíly zanedbatelné. Využíváním adaptivních algoritmů je síti umožněno se dynamičtěji přizpůsobovat.

Poslední kapitolou je realizace zcela nového přístupu k analytickému modelování přístupové vrstvy HomePlug. V této části byl realizován analytický model, který popisuje systém na základě pravděpodobnosti výskytu jednotlivých kolizních stavů. Výsledky modelu se liší od simulačního průběhu cca o +10% v celé šíři. To bylo pravděpodobně způsobeno aproximací rekurzivních funkcí algoritmu. Tento způsob umožní do budoucna rychleji a efektivněji zkoumat jednotlivé distribuční funkce, což doposud bylo se stávajícími Markovými modely časově značně náročné.

Všechny stanovené cíle byly splněny. Práce se předně soustředila na přístupové metody. K dosažení dílčích cílů analýzy a simulace vybrané technologie HomePlug byly realizovány simulační skripty. V rámci práce byla provedena optimalizace distribučních funkcí backoff algoritmu. Výsledky ukazují, že tato cesta optimalizace je vhodná pro větší počet uzlů v síti. Pro ověření stávajících modelů byl realizován událostmi řízený simulátor, jehož dílčí výsledky vedly k návrhu vlastního analytického modelu. Tento model byl analyticky a numericky ověřen. Realizovaný model je jednodušší a umožňuje rychleji a efektivněji zkoumat propustnost backoff algoritmů, ovšem s menší přesností než modely předcházející. Tato skutečnost může pomoci v budoucnu při zkoumání dalších algoritmů nejen v této oblasti. Hlavní přínosy této práce byly průběžně publikovány v tuzemských a zahraničních časopisech a konferencích. Výsledky této práce budou podkladem pro další výzkum v této oblasti.

LITERATURA

Vybrané publikace autora

- [1] KOUTNÝ, M., HOŠEK, J. Simulation of QoS diffserv technology in Opnet Modeler. In *Proceedings of 31th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervezo Kft., August 2008. pp. 1–6. ISBN 978-963-06-5487- 6.
- [2] KOUTNÝ, M., MLÝNEK, P., MIŠUREC, J. Modeling and evaluation of power line for smart grid communication. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, vol. 8, pp. 228–232, IF:0,196. ISSN 0033-2097.
- [3] KOUTNÝ, M., MLÝNEK, P., MRAKAVA, P. Homeplug simulation model for analysis of the rounding functions. In *34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing* 2011. p. 4. ISBN 978-1-4577-1409-2.
- [4] KOUTNY, M., MLYNEK, P., MISUREC, J. Homeplug throughput analysis using numerical models. In *The 13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies* 2011. ISBN 978-80-214-4283-2.
- [5] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Power line cable transfer function for modelling of power line communication systems. *Journal of Electrical Engineering*. 2011, vol. 2, pp. 4, IF: 0.235. ISSN 1335-3632.

Použité zdroje cizích autorů

- [6] BIANCHI, G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*. March 2000, vol. 18, no. 3, pp. 535–547. ISSN 0733-8716.
- [7] CARCELLE, X. *Power Line Communications in Practice*. 1 edition. Artech House, January 2009. 370 p. ISBN 978-1596933354.
- [8] DARPA. *The Network Simulator - ns-2*. <http://isi.edu/nsnam/ns/>.
- [9] DE SIQUEIRA CAMPOS, A. L. P., DE OLIVEIRA, M. R. C., DE ARAUJO LINCOLN MACHADO. Performance analyses of computer network that uses the homeplug 1.0 standard. *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*. September 2007, vol. 5, no. 5, pp. 360–366. ISSN 1548-0992.
- [10] *HomePlug 1.0 Technology White Paper* HomePlug Powerline Alliance, 2001. <http://www.homeplug.org>.
- [11] *HomePlug 1.0.1 Specification* HomePlug Powerline Alliance, 12 2001. <https://www.homeplug.org>.
- [12] *HomePlug AV White Paper* HomePlug Powerline Alliance, 2005. <https://www.homeplug.org>.
- [13] *HomePlug Powerline Alliance* HomePlug Powerline Alliance, 10 2010. <http://www.homeplug.org>.

- [14] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R. Reservation MAC protocols for powerline communications. In *ISPLC2001 - 5 TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER-LINE COMMUNICATIONS AND ITS APPLICATIONS, 4 - 6 APRIL 2001* 2001. ISBN 0-7803-7123-2.
- [15] HRASNICA, H., LEHNERT, R. Powerline communication for access networks – performance study of the MAC layer. In *III international conference on telecommunications bihtel 2000 "Telecommunication networks"- Sarajevo, Bosnia and Herzegovina* 2000. ISBN 3-519-06430-8.
- [16] *802.3ab-1999 - IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Physical Layer Parameters and Specifications for 1000 Mb/s Operation over 4 pair of Category 5 Balanced Copper Cabling, Type 1000BASE-T* IEEE Computer Society, 1999. <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.3ab-1999.html>.
- [17] JUNG, M.-H., CHUNG, M. Y., LEE, T.-J. MAC throughput analysis of HomePlug 1.0. *Communications Letters, IEEE*. February 2005, vol. 9, no. 2, pp. 184 – 186. ISSN 1089-7798.
- [18] LIN, Y.-J. ET AL. A comparative performance study of wireless and power line networks. *Communications Magazine, IEEE*. April 2003, vol. 41, no. 4, pp. 54 – 63. ISSN 0163-6804.
- [19] MING LEI, Z. ET AL. QoS based media access control in a class of networked control systems. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on* September 2007. pp. 2016 –2019. ISBN 978-1-4244-1311-9.
- [20] OPENMETER. *D 2.1 Part 2 Description of current State-Of-The-Art of technology and protocols, Description of State-Of-The-Art PLC based access technology* The OPEN meter Consortium, May 2009. First Draft 2.3, no. No. 226369.
- [21] OPERA. *Open PLC European Research Alliance*. Naposlady navštívěno 27. 7. 2010. <http://www.ist-opera.org/>.
- [22] OPNET. *Opnet - Opnet Modeler*. 2010. <http://www.opnet.com>.
- [23] *Powerline Intelligent Metering Evolution* PRIME Alliance, 2010. <http://www.ist-opera.org/>.
- [24] SUNDARESAN, S. ET AL. Distributed MAC protocols and priority oriented scheduling for a plc access network. *Int. J. Communication Systems*. 2003, vol. 16, no. 5, pp. 475–495. ISSN 1099-1131.
- [25] TREYTL, A., ROBERTS, N., HANCKE, G. Security architecture for power-line metering system. In *Factory Communication Systems, 2004. Proceedings. 2004 IEEE International Workshop on* September 2004. pp. 393 – 396. ISBN 0-7803-8734-1.
- [26] TRIPATHI, K. ET AL. Contention window based parameter selection to improve powerline MAC efficiency for large number of users. In *Power Line Communications and Its Applications, 2006 IEEE International Symposium on* 2006. pp. 189 –193. ISBN 1-4244-0113-5.

Curriculum Vitae

Martin Koutný

OSOBNÍ INFORMACE *Adresa:* Horky 100c, 664 61 Rebešovice
Narozen: 24. ledna 1983, Rýmařov
E-mail: koutnym@feec.vutbr.cz
Jazykové znalosti: Angličtina

VZDĚLÁNÍ **2007–2011: Vysoké učení technické v Brně**
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
• Doktorské studium oboru *Teleinformatika*

2005–2007: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
• Navazující magisterské studium oboru *Telekomunikační a informační technika*

2002–2005: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
• Bakalařské studium oboru *Teleinformatika*

1998–2002: Střední průmyslová škola Bruntál
• Studijní obor: elektronické počítačové systémy

ÚČAST NA PROJEKTECH ***Během studií jsem se podílel na projektech:***

- *TA0103107:* Inteligentní telematický informační systém veřejné dopravy. Řešitel: doc. V. Zeman
- *GA102/09/1846:* Vícetónová modulace realizovaná překryvnou bankou filtrů. Řešitel: Ing. P. Šilhavý
- *FR-TI2/220:* Výzkum modulárního systému pro komunikační technologie a ověření na 2N communication serveru. Řešitel: prof. K. Vrba
- *FT-TA3/011:* Výzkum a vývoj internetové telefonní ústředny. Řešitel: prof. K. Vrba
- *FR-TI1/075:* Aplikovaný výzkum a vývoj systémů dálkového měření kvality dodávky elektrické energie. Řešitel: doc. J. Mišurec
- *FT-TA2/073:* Výzkum a vývoj systému zabezpečené datové komunikace GPRS. Řešitel: prof. K. Vrba
- *1ET110530523:* Aplikovaný výzkum zabezpečené internetové komunikace se vzdálenými koncovými zařízeními v energetice. Řešitel: doc. J. Mišurec
- *MSM21630513:* Elektronické komunikační systémy a technologie nových generací (ELKOM). Řešitelé: prof. Z. Raida, prof. K. Vrba, prof. J. Jan
- *FEKT-S-11-15:* Výzkum elektronických komunikačních systémů. Řešitel: Prof. K. Vrba
- *FEKT-S-10-16:* Výzkum komunikačních systémů a sítí. Řešitel: prof. K. Vrba

- *G1/2753*: Zavedení silné autentizace uživatele do laboratorních cvičení předmětu Kryptografie v informatice. Řešitel: Ing. P. Lambertová
- *F1a/2383*: Inovace laboratorních úloh v kurzech zaměřených na datovou komunikaci. Řešitel: Ing. M. Koutný

ČLENSTVÍ V
PROFESNÍCH
SDRUŽENÍCH

- členství v Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- členství v The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers (IEICE)
- členství v The Institution of Engineering and Technology (IET)

VYŽÁDANÉ
RECENZE

Vyžádané recenze pro vědecké časopisy a konference:

- 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (2)
- 6th International Conference on Teleinformatics (3)
- Elektrorevue - Internetový časopis (3)
- Student Electrical Engineering, Information and Communication Technologies (3)

VÝSLEDKY
V ČÍSLECH

Počet recenzí: 10

h-index podle Web of Science: 2

h-index podle Scopus: 1

Celkový počet publikací včetně pedagogických: 43

- *Počet publikovaných nebo přijatých článků v impaktovaných časopisech: 2*
- *Počet prezentovaných nebo přijatých příspěvků na konferencích: 23*
- *Ostatní odborné časopisy a konference: 18*

Poslední aktualizace: 27. července 2011

ABSTRAKT

Práce se zaměřuje na analýzu, optimalizaci a modelování přístupové vrstvy datové komunikace po silnoproudých vedeních. V první části práce jsou stručně shrnuty základní informace o datovém přenosu po silnoproudých vedeních. V navazující části jsou kladeny cíle disertační práce. Jedním z hlavních cílů práce je zjednodušení současných modelů pro technologii a optimalizace distribuční funkce algoritmu HomePlug. Na stanovené dílčí cíle navazuje podrobná analýza technologie HomePlug, která je rozšířená v oblasti širokopásmového přenosu dat. V této části se práce zaměřuje na analýzu přístupové vrstvy. Pro potřebu analýzy byly realizovány diskrétní simulační modely v prostředí Matlab. Byl realizován aproximační diskrétní numerický model, který byl využit pro analýzu různých distribučních funkcí za účelem optimalizace backoff algoritmu. Výsledky ukazují, že nové optimalizace jsou vhodné spíše pro větší sítě. Poslední kapitolou je realizace nového přístupu k analytickému modelování přístupové vrstvy HomePlug. V této části byl realizován analytický model, který popisuje systém na základě pravděpodobnosti výskytu jednotlivých kolizních stavů. Tento model není tak přesný jako již publikované Markovovy modely, ale je jednodušší na implementaci a rychlejší na výsledky. V závěru jsou shrnuty výsledky těchto analýz.

KLÍČOVÁ SLOVA

CSMA/CA, HomePlug, PLC, přístupová vrstva, backoff algoritmus

ABSTRACT

The dissertation thesis is focused on analysis, modeling and optimization of the medium access layer of power line communication. In the first part of the paper, the thesis briefly summarizes a basic information of power line communication. In the next sections, the objectives of the dissertation are placed. A simplification of current models of HomePlug and a optimization of distribution function in back off procedure are one of the main goals of this work. A detailed analysis of HomePlug technology, which is widespread used in the broadband transmission, follows. The work is focused on analyzing of the MAC layer in this part. The discrete simulation models have been implemented in Matlab. The approximation discrete numerical model has been used for analysis of various distribution functions for HomePlug to optimize backoff algorithm. The new optimizations are suitable for large networks. The new approach of MAC modelling is introduced in last part of this work. The new model is not exact as Markov models but it is faster and easier for implementation. The analytical model describes a system using probabilistic functions.

KEYWORDS

CSMA/CA, HomePlug, PLC, medium access layer, backoff algorithm

KOUTNÝ, Martin *Analýza a modelování přístupové vrstvy v PLC*: doktorská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 31 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jirí Mišurec, CSc.