ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Дисертационният труд е свързан с разработване на метод за оценка качеството на обслужване на пасивни оптични транспортни системи от ново поколение. Чрез разработване на математически модели са изследвани характеристики на качеството на обслужване в гигабитови пасивни оптични мрежи (Gigabit-capable Passive Optical Networks - GPON), Гигабит-Етернет пасивни оптични мрежи (Gigabit Ethernet Passive Optical Network - GEPON) и пасивни оптични мрежи (Passive Optical Networks – PON) използващи технология за мултиплексиране по дължина на вълната (Wavelength Division Multiplexing -WDM) известни като WDM PON.

АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Днес в центъра на вниманието на специалистите и телекомуникационните компании стои изграждането на мрежи, които позволяват предоставяне на иновативни широколентови услуги като интелигентни енергийни мрежи, телемедицина, интерактивно обучение, облачни изчисления, телевизия с висока резолюция и др. със съответно качество на обслужване. Обезпечаването на тези услуги съгласно Европейската и националната стратегии за развитието на широколентовия достъп до 2020 г. не може да бъде достигнато без модернизация на фиксираната абонатна мрежа чрез използване на ново поколение технологии и построяване на мрежова инфраструктура от нов тип, базираща се на оптична свързаност. Важна част от тази мрежова инфраструктура се явява широколентовата мрежа за достъп от ново поколение NGA. Тъй като на този етап на технологично и пазарно развитие, нито сателитните, нито мобилните мрежови технологии са способни да осигурят предоставянето на свръх високоскоростни симетрични широколентови услуги, мрежите за фиксиран Интернет достъп с висока скорост са в процес на изграждане. Тези мрежи се определят като мрежи за достъп от следващо поколение (NGA) и се изграждат по технологията FTTx, като PON технологията се очертава като ключова технология за мрежите за достъп.

ПРОБЛЕМ

В условията на бурното развитие на мрежовите технологии и в съответствие с концепцията на мрежите от следващо поколение (Next Generation Network – NGN), пасивните оптични транспортни системи трябва да обезпечат предоставянето на неограничен набор от услуги със зададени характеристики на качеството на обслужване. Въпреки че PON технологията се счита за ключова технология и атрактивно решение, колективното използване на преносния ресурс в мрежата поражда проблеми свързани с ефективността, нарастването на капацитета и гарантирането на качеството на обслужване в мрежата. Въпреки голямото предимството на PON, като

ефективно и евтино решение, пасивното решение я прави неефективно мрежово решение по отношение на мрежовата производителност и закъсненията в мрежата. **Осигуряването на колективно заемане на преносния капацитет, като същевременно се гарантират характеристиките на качеството на обслужване, състоящи се в закъснение и загуба на пакети и широчина на честотната лента, е основен проблем при планирането, изграждането и обслужването на пасивните оптични мрежи.**

Изследваният проблем е продиктуван от основната задача, която стои пред телекомуникационните оператори днес за адекватен избор на технология при изграждане и модернизация на мрежите за достъп. Поради факта, че изборът на оптичната технология определя функционалността и сложността на телекомуникационните възли, което от своя страна влияе на качеството на обслужване при обмен на информация между терминалите на клиентите на мрежата, създаването на метод за оценка и избор на технология при зададени параметри би подпомогнало проектирането на новите мрежи за достъп.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Цел на дисертационния труд е разработване на метод за оценка качеството на обслужване на пасивни оптични транспорти системи от ново поколение, чрез изследване характеристиките на качеството на обслужване в широколентови мрежи за достъп

Решаването на поставената цел предполага решаване на следните задачи:

- Анализ на технологиите приложими за построяване на мрежи за достъп от ново поколение в типичната за България конфигурация на абонатната мрежа;
- Обосноваване ключовата роля на PON технологията за изграждане на мрежи за достъп от ново поколение;
- Изследване на методи за моделиране на качеството на обслужване в оптични мрежи за достъп от ново поколение;
- Анализ на параметрите за оценка на качеството на обслужване в пакетни телекомуникационни мрежи;
- Синтезиране на аналитичен модел на пасивна оптична мрежа, който да позволява сравнителен анализ на трите вида технологии GPON, GEPON, WPON;
- Изследване на синтезирания мрежови модел с използване методите на теорията на масовото обслужване;

- Изследване на сегменти на мрежа за достъп от ново поколение с цел анализ на характеристиките на качеството на обслужване за различни видове трафик;
- Разработване на метод за оценка на качеството на обслужване в оптична мрежа за достъп от ново поколение.

ОБЕКТ И ПРЕДМЕТ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Обект на изследване в дисертационния труд са пасивните оптични мрежи за достъп от следващо поколение. Фокусът е върху характеристиките на качеството на обслужване на PON технологии: 10GPON, GEPON и WDM PON.

Предмет на изследване са технологии за изграждане на пасивни оптични мрежи за достъп от следващо поколение, методи за оценка на показателите на качеството на обслужване в оптични мрежи за достъп от следващо поколение и методи за математическо моделиране на процесите в пасивни оптични мрежи за достъп от следващо поколение

МЕТОДИ НА ИЗСЛЕДВАНЕ

За изследване на характеристиките на качеството на обслужване се използват методи за математическо моделиране на процесите в мрежата, които се основават на теорията на масовото обслужване, като за оценка на показателите се прилага подходът за оценка на качеството на обслужване в пакетните мрежи, изложен в препоръките на стандартизиращите органи.

МЯСТО НА ИЗСЛЕДВАНЕ

Изследването е проведено в ТУ Варна, катедра „Комуникационна техника и технологии“, лаборатория по“ Телекомуникационни мрежи и Оптични преносни системи“ със съдействието на специалисти и оборудване на Виваком.

НАУЧНА НОВОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

- Синтезиран е метод за математическо моделиране на процеси в широколентова мрежа за достъп.
- Синтезиран е аналитичен модел на сегмент от оптична мрежа за достъп от ново поколение с използване методите на теорията на масовото обслужване, който позволява прогнозиране на показателите на качеството на обслужване за различни класове трафик.

ПРАКТИЧЕСКА ЦЕННОСТ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

- Предложен е метод за оценка на мрежовата ефективност в сегмент от пасивна оптична мрежа за достъп.
- Предложени са и са изследвани варианти за увеличаване капацитета на изградена пасивна оптична мрежа.
- Получени са резултати от числено изследване на сегмент от PON мрежа изграден на базата на 10GPON, GEPON и WDM PON технологии.
- Разработен е метод за оценка на показателите на качеството на обслужване в широколентова мрежа за достъп използваща PON технологии.

АПРОБАЦИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

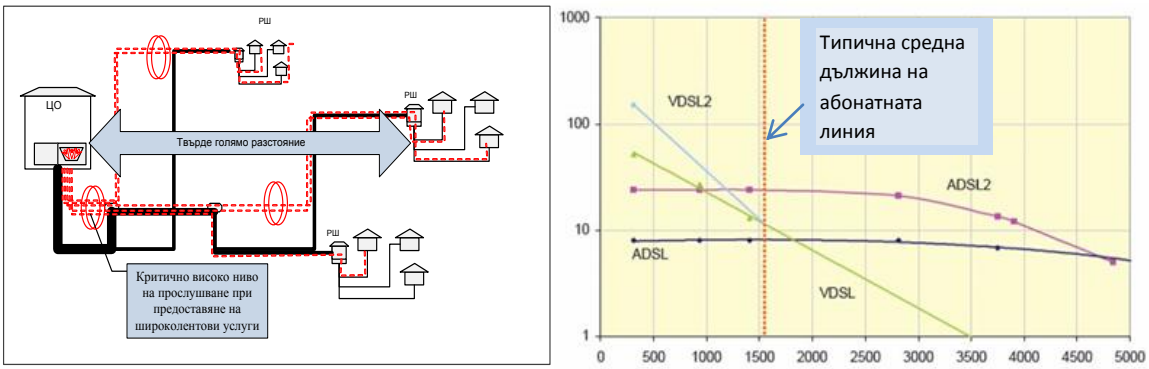
Основните резултати в дисертационния труд са представени и обсъдени на две международни IEEE конференции в чужбина – ICEST 2013 в Македония и OPTIM 2014 в Румъния, на две международни конференции в България – UNITEX 2013 Габрово и IF 2011 Варна и на работен семинар "Innovations in ICT Sector and Embedded Systems & Industrial Informatics" организиран от ICT Cluster, България. Статията представена на OPTIM 2014 е включена в бази данни на IEEE Xplore.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основните резултати от Изследванията в дисертационния труд са публикувани в 9 статии и доклади. Две публикации са на международни конференции в чужбина – ICEST 2013 в Македония и OPTIM 2014 в Румъния, две са на международни конференции в България - UNITEX 2013 Габрово и IF 2011 Варна, като публикацията на UNITEX е самостоятелна. Една от статиите е публикувана в списание “Известия“ на съюза на учените Варна. Една от публикациите е на международен конгрес на ТУ Варна 2012, една е в сборник научни доклади „Принос за развитие на технологичен предприемачески дух и насоченост на инженерните изследвания към развитие на икономика , базирана на знание и иновации”, Варна 2014, една в годишника на Департамент ”Телекомуникации” на НБУ и една от статиите е публикувана в сборник трудове на БАН.

ГЛАВА 1: ОПТИЧНИ МРЕЖИ ЗА ДОСТЪП ОТ СЛЕДВАЩО ПОКОЛЕНИЕ

В първа глава са показани ограниченията за прилагане на xDSL технологията в характерната за България конфигурация на абонатната мрежа.



Фиг.1.2 Ограничение за прилагането на VDSL в типична за България конфигурация на абонатна мрежа

На базата на сравнителен анализ, за моделиране са избрани технологиите 10GPON, GEPON и WDM PON, които отговарят на изискванията на съвременните приложения за големина на честотната лента. Анализирана е структурната им организация и са описани особеностите и проблемите, които тя поражда. Таблица 1.1 показва, че сегашните широколентови мрежи изградени на базата на технология „Цифрови Абонатни Линии“ (x Digital Subscriber Line - xDSL) не са в състояние да предложат необходимите свръх високи скорости, заложени като целеви стойности в новите програмни документи на ЕС. Технологията за многоскоростна цифрова абонатна линия VDSL позволява достигане на 100 Mbps скорост, но на разстояние до 500 метра. Ограничения за прилагането на VDSL технологията в типичната за България конфигурация на абонатна мрежа се явяват твърде голямото разстояние между мрежовите възли и абонатите, както и критично високото ниво на прослушване при предлагане на широколентови услуги по съществуващите медни кабели (фиг. 1.2).

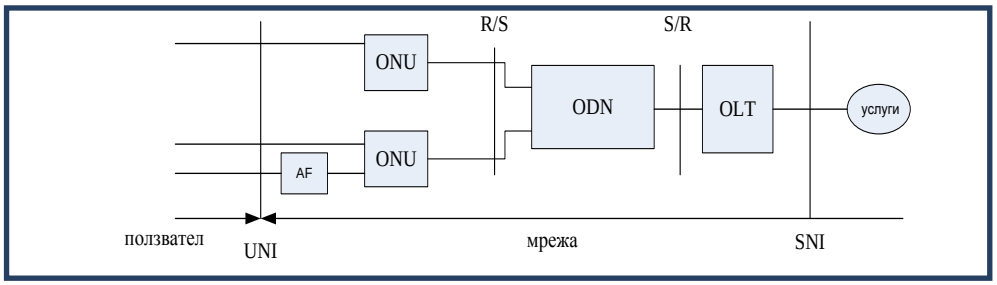
„На този етап на технологично и пазарно развитие, нито сателитните, нито мобилните мрежови технологии са способни да осигурят предоставянето на свръх високоскоростни симетрични широколентови услуги. Пазарно ориентираните надграждания или фиксиран Интернет достъп с по-висока скорост са в процес на изграждане. Като цяло тези мрежи се определят, като мрежи за достъп от следващо поколение (NGA) и се изграждат по технологията FTTx“ (Национална стратегия за развитие на широколентовия достъп в Република България 2012 - 2015 г.).

Обоснована е ключовата роля на PON технологията за изграждане на мрежите за достъп от следващо поколение.

Таблица 1.1 Технологии за предоставяне на фиксиран достъп:

ПРЕПОРЪКА	ТЕХНОЛОГИЯ	СКОРОСТ към абоната	СКОРОСТ от абоната	ОДОБРЕН
		Mbps	Mbps	година
ANSI T1.413-1998 Issue 2	ADSL	8	1.0	1998
ITU-T G.992.1	ADSL (G.DMT)	12	1.3	1999-07
ITU-T G.992.1 Annex A	ADSL over POTS	12	1.3	2001
ITU-T G.992.1 Annex B	ADSL over ISDN	12	1.8	2005
ITU-T G.992.2	ADSL Lite (G.Lite)	1.5	0.5	1999-07
ITU-T G.992.3 Annex J	ADSL2	12	3.5	2005
ITU-T G.992.3 Annex L	RE-ADSL2	5	0.8	2005
ITU-T G.992.4	splitterless ADSL2	1.5	0.5	2002-07
ITU-T G.992.5	ADSL2+	24	1.3	2003-05
ITU-T G.992.5 Annex M	ADSL2+M	24	3.3	2008
ITU-T G.993.2	VDSL 2	100	100	2006
ITU-T G.993	BPON	622	155	2003
ITU-T G.984.1	GPON	2400	1200	2004
ITU-T G.984.1	GPON	2400	2400	2004
ITU-T G.985	EPON	100	100	2004
ITU-T G.986	EPON	1 000	1 000	2010
ITU-T G. 987.2	XG PON 1	10 000	2 500	2010
ITU-T G. 987.2	XG PON 2	10 000	10 000	2010
ITU-T G. 989.1	NG PON 2	40 000		2013

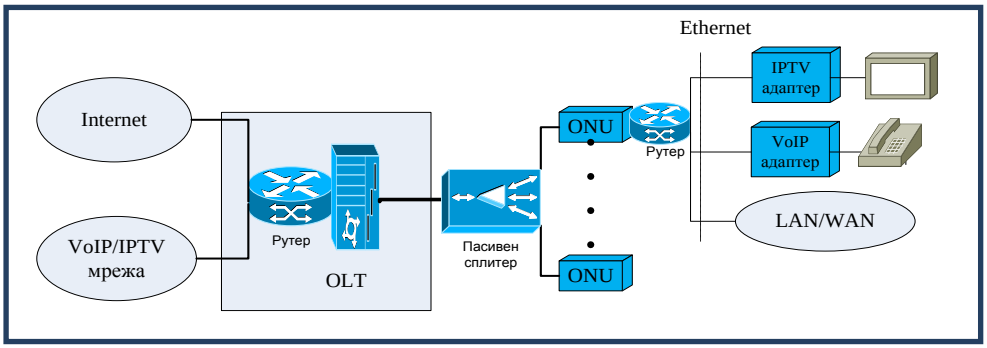
Като „мрежа за достъп” в дисертационния труд е разгледан участък от телекомуникационна мрежа, който свързва крайните потребители с доставчиците на услуги. Съгласно ITU T Rec. Y. 101 това са субектите като кабели, преносни съоръжения и др. между интерфейсните точки на възела предоставящ услугите (Service Node Interface - SNI) и интерфейса на ползвателя с мрежата (User-Network Interfaces - UNIs), които обезпечават преносните възможности за предоставяне на телекомуникационни услуги.



Фиг. 1.5 Обобщена схема на физическата конфигурация на оптична мрежа за достъп

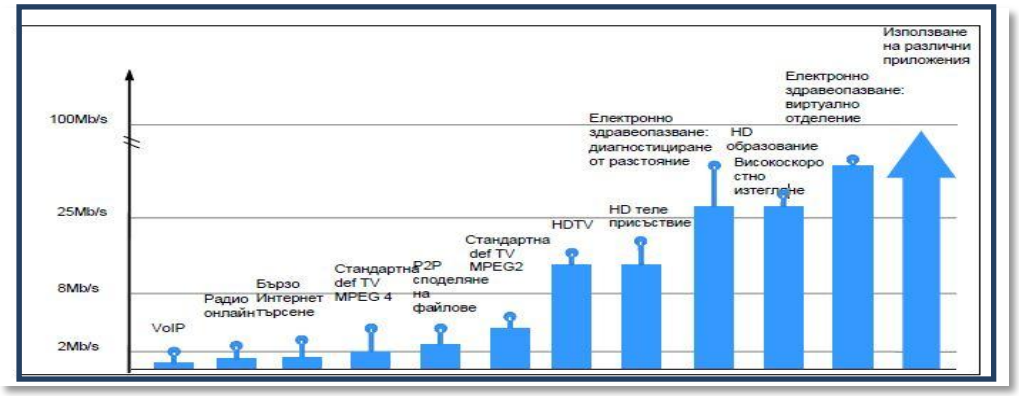
Елементи на оптичната мрежа се явяват:

- Оптичната разпределителна мрежа (Optical Distribution Network - ODN), която осигурява предаването на информацията от оптичния линиен терминал (Optical Line Terminal – OLT) към оптичните мрежови устройства (Optical Network Unit – ONU) разположени при потребителите и обратното. ODN се дефинира като мрежа между отправни точки S и R, където, S е точка от оптичното влакно точно след OLT или ONU и представлява точка на оптична свързаност, а R е точка от оптичното влакно точно преди ONU/OLT и представлява точка на оптична свързаност. В зависимост от физическата реализация на ODN точките S и R могат да бъдат разположени на едно и също влакно, (т.е. те съвпадат) или на отделни влакна.
- OLT - Мрежови елемент, който взаимодейства с възлите предоставящи услугите и с PON. Към едно OLT могат да бъдат включени няколко ODN;
- ONU - Оптично мрежово устройство, което формира абонатния интерфейс в мрежата за достъп.
- AF – Функция за адаптиране (Adaptation Function), за пренос по медни чифтове по DSL.



Фиг. 1.6 Концептуален модел на PON мрежа

Анализирани са видовете телекомуникационни услуги и са обобщени основните изисквания към пропускателната способност и QoS.



Фиг. 1.1 Необходими скорости на широколентов достъп на бъдещите приложения

Таблица 1.5 Изисквания към QoS параметрите на IPTV трафични потоци

Показател	SDTV		HDTV	
	MPEG 2	MPEG 4	MPEG 2	MPEG 4
Скорост на видео потока	2.5 Mbps	1.75 Mbps	15 Mbps	10 Mbps
Допустимо закъснение на пакетите	$\leq 200\ ms$			
Вариация на закъснението	$\leq 50\ ms$			
Коефициент на загуби	1.9 x10^{-6}	3.3 x10^{-6}	4.87 x10^{-8}	7.31 x10^{-8}
Сумарно време за превключване на канала	$\leq 1\ s$			
Коефициент на грешки	1 x10^{-6}			
QoS клас	Клас 6, клас7			

Таблица 1.6 Изисквания към QoS параметрите на VoD трафични потоци

Показател	SDTV	
	MPEG 2	MPEG 4
Скорост на видео потока	3.18 Mbps	2.1 Mbps
Допустимо закъснение на пакетите	$\leq 200\ ms$	
Вариация на закъснението	$\leq 50\ ms$	
Средна стойност на коефициента на загуби	2.3 x10^{-6}	3.3 x10^{-6}
Коефициент на грешки	1 x10^{-6}	
QoS клас	Клас 6, клас7	

Таблица 1.7 Изисквания към QoS параметрите на VoIP трафика

Показатели			
Вид на Кодека	G.711	G.723	G.729
Степен на удовлетвореност на ползвателите	Най-висока	Висока	
Скорост на потока, Kbps	64	5.3	8
Допустимо закъснение на пакетите	$\leq 100\ ms$	$\leq 150\ ms$	
Вариация на закъснението	$\leq 10\ ms$	$\leq 50\ ms$	
Коефициента на загуби на пакети	1 x10^{-3}	2.5 x10^{-3}	
QoS клас	Клас 0	Клас1	

Отчитайки особеността, че по-голямата част от съвременните терминални устройства имат стандартизиран физически интерфейс Ethernet 100 BaseT или 1000 BaseT, при разглеждането на структурно-функционалния модел на мрежата се приема, че всички терминални устройства взаимодействат с мрежата за достъп чрез електрически физически Ethernet интерфейси.

На базата на задълбочен литературен анализ е дефиниран основния проблем в оптичните пасивни абонатни мрежи, свързан с колективното използване на преносната среда и гарантиране качеството на обслужване.

ГЛАВА 2: ИЗСЛЕДВАНЕ НА МЕТОДИ ЗА МОДЕЛИРАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ОБСЛУЖВАНЕ В ОПТИЧНИ МРЕЖИ ЗА ДОСТЪП ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ

Във втора глава са анализирани методи за математическо моделиране на параметри за оценка на качеството на обслужване в пакетни телекомуникационни мрежи с използване на теорията на масовото обслужване. Характеристиките на QoS, които описват изискванията на мрежовите услуги са разгледани по отношение на натоварването на мрежата което се характеризира със средна интензивност на постъпване на пакетите, размер на пакетите и време за обслужване на пакетите във възела, мрежовата надеждност изразена чрез закъснението в мрежата и нивото на загуби на пакети и мрежовата ефективност изразена чрез пропускателната способност на мрежата.

За оценка на QoS са избрани основните параметри, които оказват влияние на качеството на обслужване в пакетните мрежи: - средно време на закъснение на предаването на пакетите - PTD, отклонение на закъснението на предаването на пакетите - PDV, коефициент на загубите на пакети – PLR и коефициент на грешките при предаване на пакета - PER. Закъснението в мрежата T_d е разгледано като сума от компоненти, които зависят от начина на предаване на пакетите през възлите и мрежовите канали (закъснение при предаването – t_{tr}; закъснение от престой (обработката на пакетите) във възлите – t_{proc}; закъснение от чакане в опашките – t_q,;закъснение от разпространението на сигнала – t_{pr}.

$$T_d = t_{tr} + t_{proc} + t_q + t_{pr}, \qquad (2.1)$$

където, $t_{tr} = \frac{E}{V} = \frac{8n}{V}$, $t_{proc} + t_q = \sum_{k=1}^{N} u_k$, а $t_{pr} = \tau_c L$, като, L е сумарната продължителност на целия хипотетичен еталонен път в км, $\tau_c \approx 5\,\mu\frac{s}{km}$, а u_kе средното закъснение (време за чакане) във възлите в k-тия сегмент.

Сумарното мрежово закъснение в хипотетичен път, преминаващ през N мрежови сегмента е представено като:

$$T_d = \frac{8n}{V} + \tau_c L + \sum_{k=1}^{N} u_k. \qquad (2.2)$$

Отклоненията в закъсненията PDV са изразени чрез:

$PDV = PTD_{upper} - PTD_{min}$, където PTD_{upper} е квантил 0,999 на функцията на разпределение на закъснението за изследвания сегмент от мрежата, а PTD_{min} е минималната стойност на функцията на разпределение на закъснението за изследвания сегмент от мрежата.

Тъй като влошаването на качеството на обслужване в телекомуникационните мрежи и следователно и в мрежите за достъп от ново поколение, се предизвиква от закъсненията на пакетите,

предизвикани от чакане на опашки в буферите на мрежовите устройства, при моделиране, е предложено мрежата за достъп да бъде представена, като съвкупност от системи за масово обслужване. от вида M/G/1 и G/G/1.

Определени са структурните параметри на системата, които включват количеството на обслужващите устройства K и количеството k и капацитет на буферите $\mathrm{E_j}$ $(\mathrm{j} = \overline{1, \mathrm{k})}$; параметрите на натоварването на системата, които включват избор на закон на разпределение $\mathrm{A_i}(\tau)$ на интервалите от време между постъпващите в системата заявки от клас i= (1,H) , и първите два момента на разпределението, които се задават във вид на интензивност λ_i и коефициент на вариация $\mathrm{v_{ai}}$ на интервалите между постъпващите в системата заявки и избор на закон за разпределение на продължителността на обслужване $B_i(\tau)$ на заявките от клас i= (1,H), и първите два момента на разпределението, които се задават във вид на средната продължителност на обслужването b_i, интензивност на обслужването $\mu_i = \frac{1}{b_i}$ и коефициент на вариация v_ai; функционалните параметри, които включват дисциплината на обслужване, представляваща последователността на постъпване и обработка на заявките в системата. Избрано е правилото „най ниска цена”, тоест колкото по малък е номерът на класа, толкова по-голям е приоритетът. Избран е режимът на функциониране на системата – стационарен.

За моделиране на трафика е предложено използване на модели на потоци, притежаващи свойство на себеподобие и е избрано ограничено разпределение на Парето за моделирането им. Изборът на това разпределение се определя от факта, че позволява, без да се променя формата на опашката на разпределението, да се зададе максимална стойност на случайната величина, което обезпечава крайна стойност на коефициента на вариация.

Това разпределение се характеризира с три параметъра L, k и α. и за него са изведени следните зависимости за математическото очакване E[X], Дисперсията D[X] и квадратичния коефициент на вариация v^2.

$$\mathrm{E[X]} = \frac{\alpha(\mathrm{kL^\alpha - Lk^\alpha})}{(\alpha-1)(\mathrm{L^\alpha - k^\alpha})}, \alpha \neq 1, \tag{2.3}$$

$$D[X] = \frac{\alpha}{(\alpha-2)}\left(\frac{k^2L^\alpha - k^\alpha L^2}{(L^\alpha - k^\alpha)}\right), \tag{2.4}$$

$$v^2 = \frac{(\alpha-1)^2}{\alpha(\alpha-2)}\frac{(\mathrm{L^\alpha - k^\alpha})(\mathrm{k^2L^\alpha - k^\alpha L^2})}{(\mathrm{kL^\alpha - Lk^\alpha})^2}, \ \alpha \neq 2, \tag{2.5}$$

където k е долният предел на случайната величина, а L е горният предел на случайната величина, а $L \geq x \geq k$.

Предложени са приближения за изчисляване на средното време за чакане и вариацията на времето на чакане. В научната литература при моделиране на процесите в абонатните мрежи за достъп авторите използват модели на системи от вида M/G/1 и M/D/1, където средното време на чакане се изчислява чрез формулата на Полачек-Хинчин:

$$w = \frac{\lambda b^2(1+v_b^2)}{2(1-\rho)}. \tag{2.6}$$

В дисертацията се предлага използване на модел G/G/1, като за изчисляване на средното време на чакане и вариацията на времето на чакане се предлага използване на приближения изведени от Волванг Крамер и Манфред Ленгенбах-Белц (Wolfgang Kramer and Manfred Lagenbach-Belz):

$$\widetilde{w} \approx \frac{\rho b(v_a^2+v_b^2)}{2(1-\rho)} f(v_a),\ \rho = \lambda b < 1,$$

$$f(v_a) = \begin{cases} exp\left[-\frac{2(1-\rho)(1-v_a^2)^2}{3\rho(v_a^2+v_b^2)}\right], v_a < 1 \\ exp\left[-(1-\rho)\frac{v_a^2-1}{(v_a^2+4v_b^2)}\right], v_a \geq 1 \end{cases}, \tag{2.7}$$

$$\mathrm{v}_c^2 \approx \mathrm{v}_a^2 + 2\rho^2\mathrm{v}_b^2 - 2\rho(1-\rho)\frac{\widetilde{\mathrm{w}}}{\mathrm{b}}. \tag{2.8}$$

Дисперсията на закъснението е представена чрез:

$$\sigma^2 = \frac{\lambda^2(\sigma_a^2+\sigma_b^2)}{4(1-\rho)^2} + \sigma_b^2, \tag{2.9}$$

където σ_a е средно квадратичното отклонение на интервала във входния поток, а σ_b е средно квадратичното отклонение на интервала на обслужване, като $\sigma = \sqrt{\mathrm{D}} = \mathrm{vM}$.

За системи с относителен приоритет, средното време на чакане на заявките от клас k е представено чрез :

$$\mathrm{w_k} = \frac{\sum_{i=1}^{H}\lambda_i b_i^2(1+v_{bi}^2)}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)},\ (k = 1,2,3,\dots H) \tag{2.10}$$

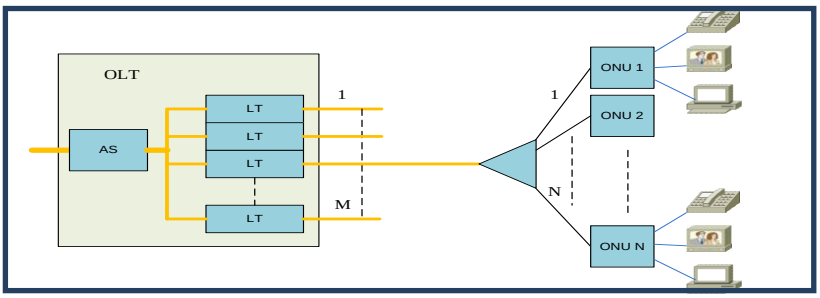
където $R_{k-1} = \sum_{i=1}^{k-1}\rho_i$, $R_k = \sum_{i=1}^{k}\rho_i = \sum_{i=1}^{k}\lambda_i b_i$, $k = (1,\dots H)$, а $\mathrm{b_i}$ е средно време на обслужване на заявките от клас i; $\mathrm{v_i}$ е коефициент на вариация на времето на обслужване на заявките от клас i, R_{k-1} и R_k са сумарните натоварвания създавани от заявките, които притежават приоритет не по нисък от (k-1) и k съответствено, като $R_0 = 0$.

За изчисляване на вероятността за препълване на буферите и съответно за загуби, при ограничен обем на буферите n е предложена за използване следната зависимост:

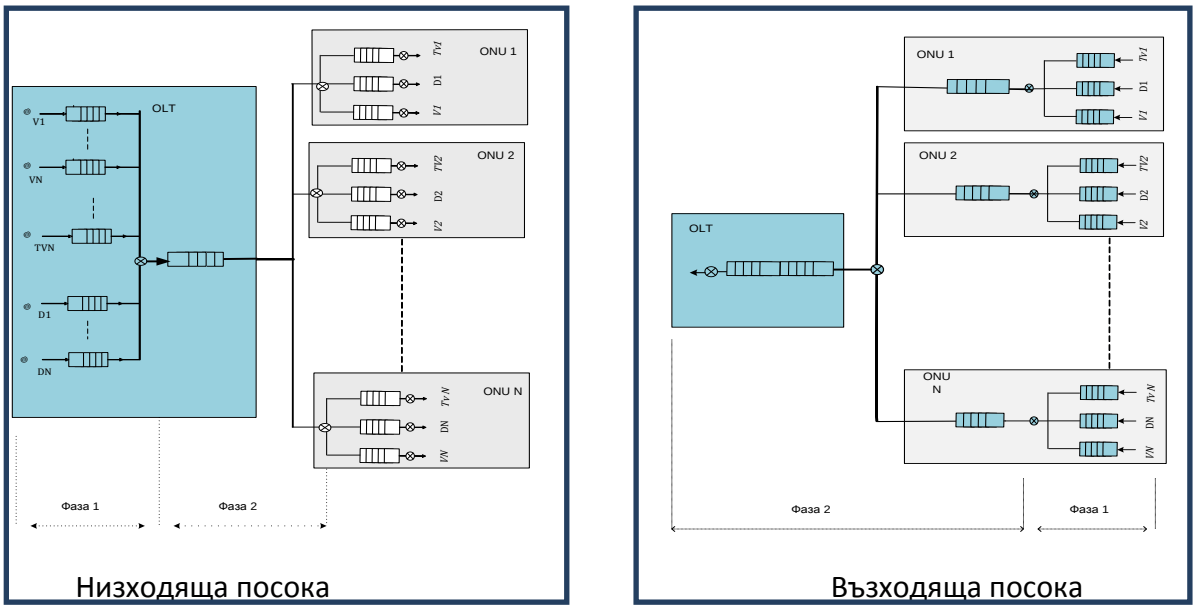
$$\mathrm{P_{loss}} = \frac{1-\rho}{1-\rho^{(w+1)F(v)}}\rho^{wF(v)}, \text{ където, } F(v) = \frac{2}{{V_a}^2+{V_b}^2}. \tag{2.11}$$

ГЛАВА 3: МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ОПТИЧНА МРЕЖА ЗА ДОСТЪП ОТ НОВО ПОКОЛЕНИЕ

В трета глава са синтезирани двуфазни аналитични модели на сегмент от NG PON мрежа за достъп (3.2), изобразяващ структурно-функционалната и организация (фиг.3.1), позволяващи анализ и изследване на PON технологии.



Фиг. 3.1 Физическа структура на NG PON мрежа



Фиг. 3.2 Аналитичен модел на сегмент от NG PON мрежа

Основна задача при синтезираните модели (фиг. 3.2) е да бъдат изчислени средното закъснение на пакетите PTD (T_d), отклоненията в закъсненията на предаването на пакетите - PDV за VoIP и IPTV трафик и коефициентът на загубите на пакетите - PLR (P_l) за DoIP в двете посоки низходяща и възходяща за сегмент от NG-PON мрежа.

Обобщени са общите черти на 10GPON, GEPON и WDM PON технологиите, характеризиращи процесите на пренос на Етернет рамки през сегментите в мрежата състоящи се в следното: технологиите са синхронни и включват режими на инициализация и синхронизация; реализират широколентово предаване на информацията в низходяща посока и безконфликтно предаване във възходяща посока; при предаване

на Етернет рамките се извършва модифициране на рамката, чрез добавяне на служебна информация; обемът на предавания сигнализационен трафик е пренебрежимо малък в сравнение с полезния трафик;използват приоритетно обслужване. При използване на WDM PON технология, сегментът от мрежата при предаването на Етернет рамките, е разгледан като високоскоростен Етернет комутатор, към които са свързани ONU-та по логически прозрачни оптични канали, реализирани върху определени дължини на вълната. При изложените факти, при определени допускания, за трите вида технологии са построени общи аналитични модели за изследване, в който всяка от технологиите се характеризира със своите параметри. При създаването на моделите и провеждането на изследването са направени определени допускания и предположения състоящи се в следното: системата се намира в установен режим; всички буфери са с неограничен капацитет; в низходяща посока за фаза 1, продължителността на интервалите между постъпването на заявките във входните трафични потоци се описва чрез ограничено разпределение на Парето; във възходяща посока се предава Поасонов поток; на всяко обслужване постъпва по една заявка; дисциплината на обслужване във всички системи за масово обслужване е FIFO (First coming first outgoing - първи пристигнал първи обслужен или обслужване по реда на пристигане); във възходяща посока пропускателната способност на мрежата е разделена по равно между абонатите и всяко ONU за един цикъл на достъп предава по една рамка. Като основни източници на закъснения в мрежата са определени: закъсненията на пакетите от обработка в буферите на AS устройството; закъсненията на пакетите от обработка в буферите на LT устройствата; закъсненията на пакетите от обработка в буферите на ONU устройствата; закъсненията от разпространението на сигналите в линията; закъснения от предаването на сигналите в линията. Моделите се изследват отделно за всяка посока и за всяка фаза

Изследвана е мрежа за достъп състояща се от NG OLT устройство, което интегрира функциите на агрегиращ модул и “adge“ рутер състоящо се от Агрегиращ комутатор (Aggregation switch - AS) изпълняващ агрегиращи функции и модули за достъп (LT). Агрегиращият модул маршрутизира трафика на интернет доставчиците, трафика на опорната многофункционална мрежа, на мрежата за достъп, завършва абонатните виртуални LAN (Virtual Local Area Networks - VLAN), профилира низходящите потоци с цел изключване на претоварването в устройствата на мрежата за

достъп и поддържа необходимото качество на обслужване. Устройството е свързано с модулите за достъп чрез високоскоростни 10G Етернет оптични канали. В OLT са включени M на брой модули за достъп, свързани към M на брой сегменти PON, всеки от които обединява N на брой абоната. Всеки сегмент се състои от N+1 на брой линии, свързани към пасивен сплитер. N на брой линии завършват в N на брой крайни устройства ONU, разположени при абоната, към които е включено клиентското оборудване, състоящо се от телевизионни IP устройства, IP терминали, персонални компютри, безжични рутери, IP телефони и др. Абонатният трафик се предава през сегмента във възходяща и низходяща посока. В участъка AS-LT се използва стандартен стек от протоколи, ориентирани към предаването на три вида трафик през IP мрежата –Глас, Данни и Видео. С цел осигуряване на качеството на обслужване, в буферите на AS устройството се създава отделна опашка за всеки абонат и за всеки вид трафичен поток, като за IPTV предаването се създава една обща опашка за всички абонати.

За фаза 1 в низходяща посока се приема, че интервалите от време между постъпващите в сегментите заявки, тоест началото на Етернет рамките се подчиняват на ограничено разпределение на Парето. Продължителността на обслужване също се подчинява на същото разпределение. Приема се, че L_a представлява максималното време между пристигането на две съседни Етернет рамки, а k_a е минималното (две съседни Етернет рамки с минимална продължителност).

Изследва се трафичния поток, който постъпва на входа на OLT устройството. С цел осигуряване на качеството на обслужване, в AS този поток се разпределя на отделни потоци за всеки абонат и за всеки клас. Всеки *j* клас трафичен поток, се характеризира с минимална дължина на рамките n_{minji} и максимална скорост V_{maxji}. Минималният интервал на предаване се представя по следния начин:

$$\mathrm{k_{ij=}\frac{n_{minji}}{V_{maxji}}}\ ,\ \ \mathrm{j} = (0,1,2,3),\ \mathrm{i} = (0,1,2,\ldots \mathrm{N}) \qquad (3.1)$$

а интензивността на входните потоци :

$$\lambda_{\mathrm{ji}} = \mathrm{M}_{\mathrm{aji}}^{-1},\ \ \mathrm{j} = (1,2,3);\ \ \mathrm{i} = (1,2,..\mathrm{N}), \qquad (3.2)$$

където λ_{ji} е средната интензивност на i–тия поток от клас j, а M_{ji} е математическото очакване (средната стойност) на интервала на постъпване на заявките за i–тия входен поток от клас j , което се определя съгласно (2.3). Коефициентът на натоварване на система за масово обслужване за клас на заявките *j* се определя съгласно:):

$$\rho_{jn} = \frac{\lambda_{jn}}{\mu_{jn}}, \quad j = (1,2,3); \; n = (1,2,..N) \tag{3.3}$$

Където, $\mu_{bjn} = M_{bjn}^{-1}$,$j = (1,2,3)$, $n = (1,2,..N)$, а μ_{bji} е математическото очакване на интервала на обслужване.

Коефициентът на вариация се изчислява на база (2.8):

$$v_{cj}{}^2 \approx v_{aj}^2 + \rho_j{}^2(v_{bj}^2 - v_{aj}^2), \tag{3.8}$$

където за v_{aj} и v_{bj} съгласно (2.5) се извежда:

$$v_{aj}{}^2 = \frac{(\alpha-1)^2}{\alpha(\alpha-2)} \frac{(L_{aj}{}^{\sigma} - k_{aj}{}^{\alpha})(k_{aj}{}^2 L_{aj}{}^{\alpha} - k_{aj}{}^{\alpha} L_{aj}{}^2)}{(k_{aj} L_{aj}{}^{\alpha} - L_{aj} k_{aj}{}^{\alpha})^2} \tag{3.9}$$

$$v_{bj}{}^2 = \frac{(\alpha-1)^2}{\alpha(\alpha-2)} \frac{(L_{bj}{}^{\sigma} - k_{bj}{}^{\alpha})(k_{bj}{}^2 L_{bj}{}^{\alpha} - k_{bj}{}^{\alpha} L_{bj}{}^2)}{(k_{bj} L_{bj}{}^{\alpha} - L_{bj} k_{bj}{}^{\alpha})^2} \tag{3.10}$$

Дисперсията на закъснението се описва на база (2.9) където:

$$\sigma_j^2 = \frac{\lambda^2(\sigma_{ja}^2 + \sigma_{jb}^2)}{4(1-\rho_j)^2} + \sigma_{bj}^2, \tag{3.11}$$

$$\sigma_{aj}^2 = \frac{\alpha}{(\alpha-2)} \left(\frac{k_{aj}{}^2 L_{aj}{}^{\alpha} - k_{aj}{}^{\alpha} L_{aj}{}^2}{(L_{aj}{}^{\alpha} - k_{aj}{}^{\alpha})} \right), \tag{3.12}$$

$$\sigma_{bj}^2 = \frac{\alpha}{(\alpha-2)} \left(\frac{k_{bj}{}^2 L_{bj}{}^{\alpha} - k_{bj}{}^{\alpha} L_{bj}{}^2}{(L_{bj}{}^{\alpha} - k_{bj}{}^{\alpha})} \right), \tag{3.13}$$

Вероятността за препълване на буферите и съответно за загуба на заявките PLR за DoIP трафичните потоци се изчислява на база (2.10).

Приема се, че във фаза 2 в низходяща посока действа обединен поток със сумарна интензивност:

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^{N} (\lambda_{Vi} + \lambda_{Di}) + \Lambda_{TV} \tag{3.14}$$

Приема се, че този поток е прост поток, тъй като се образува от обединяването на голямо число потоци.

Във фаза 2, освен закъснението от обработка в LT, се отчита и времето за разпространение на оптичния сигнал в канала, и закъснението от предаването, което е функция на скоростта в канала между OLT и ONU :

$$\overline{T_d} = \overline{t_{proc}} + \overline{t_{tr}} + \overline{t_{pr}} \tag{3.15}$$

Средното време за чакане в опашка и средното закъснение на пакетите PTD се изчислява съгласно (2.2) и (2.6):

$$\overline{T_d} = \frac{\bar{E}}{V_n} + \tau_c L + \frac{\rho\left(\frac{\sigma^2}{\bar{E}} + \bar{E}\right)}{2V_n(1-\rho)}, \tag{3.16}$$

където $\overline{E}$ е средната големина на пакетите. За средна големина на пакетите се приема 653 байта, измерени в реална мрежа.

Сумарната средна интензивност на IPTV потока във фаза 2 се представя като:

$$\Delta_{TV} = n\lambda_{tv} + N_{VoD}\lambda_{VoD} \tag{3.17}$$

където Δ_{TV} е сумарната интензивност на потока, n е числото на TV каналите, N е броя на абонатите в мрежата абонирани за услугата VoD, λ_{tv} е средната интензивност на един TV канал, λ_{VoD} е интензивността на VoD потока.

PTD за всеки клас поток е представен на база (2.2)и (2.9).

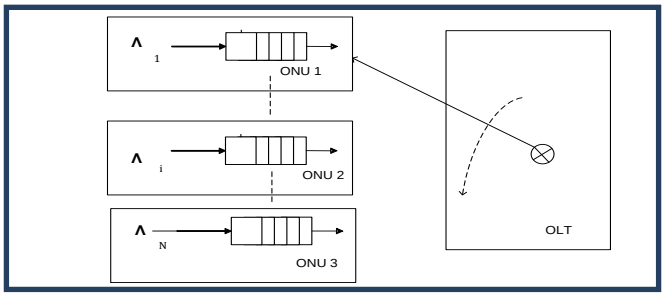
$$PTD = b_j + \tau_c L + \frac{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j b_j^2 (1+v_{bj}^2)}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}, \ ..(k = 1,2,3), \qquad (3.18)$$

където, $R_{k-1} = \sum_{j=1j}^{k-1} \rho_j$, $\quad R_k = \sum_{j=1}^{k} \rho_j = \sum_{j=1}^{k} \lambda_j b_j$.

Обслужването във възходяща посока се моделира също в две фази. Във Фаза 1 се обслужват трите вида трафик, които постъпват от абоната в ONU устройството, а във Фаза 2 се обслужва сумарния трафик от всички ONU-та и се транспортира до OLT. Закъсненията във фаза 1 се изчисляват като средното време на закъснение на пакетите от обработка u_k, за система M/G/1 с нееднороден поток от заявки и с три класа относителни приоритети на обслужване. Закъсненията на пакетите от клас к се определят чрез:

$$w_к = \frac{\sum_{j=1}^{3} \frac{\rho_j}{V_j} (1+v_{bj}^2)}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}. \qquad (3.19)$$

Във фаза 2 на възходяща посока, когато N на брой ONU си поделят общ канал на принципа на TDMA (фиг. 3.3), заемането на времевия канал от ONU устройството се управлява от протокол за достъп, съгласно който OLT позволява на ONU да предава, чрез обмен на специално съобщения. Разгледани са две схеми: централизирани и избирателни.



Фиг. 3.3 Модел на TDMA схема, в оптична мрежа за достъп

Прави се допускането, че всички N станции имат еднакви характеристики на трафичните потоци, като средното време на закъснение на пакетите от обработка u_k се представя за централизирана схема:

$$u_k = b + \frac{N\Lambda(\sigma^2+b^2)}{2(1-N\Lambda b)} + \frac{\overline{t_{cycle}}}{2}(1 + \Lambda b), \qquad (3.20)$$

и за избирателна:

$$u_k = b + \frac{N\Lambda(\sigma^2+b^2)}{2(1-N\Lambda b)} + \frac{\overline{t_{cycle}}}{2}(1 - \Lambda b). \qquad (3.21)$$

Във фаза 2 на възходяща посока средното време на обслужване на заявката от тип j за един абонат се изчислява:

$$\overline{b_{2_{jUP}}} = \overline{t_{a_i}} + \overline{t_{pr_j}} + \overline{t_{tr_j}}, \qquad (3.22)$$

където: $\overline{t_{a_i}}$ е средната стойност на интервала за достъп на *i*-тия абонат за заявките от клас *j*, $\overline{t_{trj}}$ е средната стойност на времето за предаване на заявките от клас *j*, а $\overline{t_{pr_j}}$ е средната стойност на времето за обработка в първата фаза на възходящата посока за заявките от клас *j*.

$$\overline{t_{a_i}} = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta l\, \tau + \sum_{i=1}^{N-1} \overline{t_{tr_i}}, \Delta l = l_{max} - l_i, \qquad (3.23)$$

където l_{max} е максималната дължина на абонатната линия в сегмента PON, а l_i е дължината на линията на i-тия абонат. При числените изследвания се използва усреднена стойност на този параметър.

Във фаза 2 на възходяща посока се прави допускането за прост поток с интензивност Δ_2, която се моделира по следния начин:

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^{N} \Delta_{i2}\,,\ \Delta_{i2} = \lambda_{Di} + \lambda_{VoDi} + \lambda_{VoIPi}, \qquad (3.25)$$

където λ_{Di} е интензивността на трафичния поток от данни, създаден от *i*-тия абонат, λ_{VoDi} - интензивността на заявките за видео, създаден от *i*-тия абонат а, λ_{VoIPi} - интензивността на VoIP трафичния поток създаден от *i*-тия абонат.

При сегмент използващ WDM PON технология, средната стойност на интервала за достъп $\overline{t_{a_i}} = 0$.

Изчисления са направени за избрани параметри на физическия и каналния слой, съгласно следните таблици:

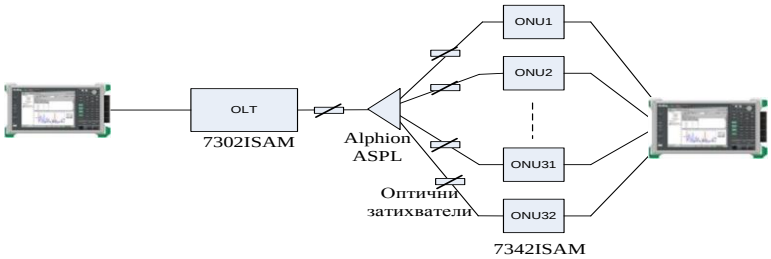
Параметър			VoIP	IPTV	Data
Клас			0	1	2
Макс. скорост на потока	c_{maxHi}	Mbps	5	620	16
Мин. интервал на предаване	k_{aHi}	µs	102.4	1.6	51.2
Макс. интервал на предаване	L_{aHi}	µs	102.4-2000	30-200	32 -20000
Мин. интервал на обслужване	k_{bHi}	µs	75	20	32.4
Макс. интервал на обслужване	L_{bHi}	µs	1200	300	375

Параметър			EPON	GPON	10GEPON	WPON
Групова скорост във възходяща посока	Mbps	Vn	1000	2488	10000	n x 10000
Групова скорост в низходяща посока	Mbps	Vn	1000	10000	10000	n x 10000
Брой абонати	Бр.	N	16	16	16	16
			32	32	32	32
				64	64	64
				128	128	128

В трета глава са предложени и изследвани 5 архитектури за модернизиране на изградена вече пасивна оптична мрежа.

Анализирана е пропускателната способност на канално ниво в съвременни мрежи за абонатен достъп, използващи PON технологии. Предложен е метод за изчисляване на мрежовата ефективност.

Извършени са експериментални измервания на сегмент от 10GPON мрежа. Принципът на измерване е показан на фиг. 3.11.

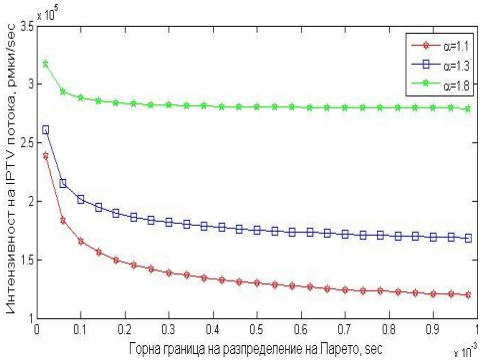


Фиг. 3.11bСхема на измерване

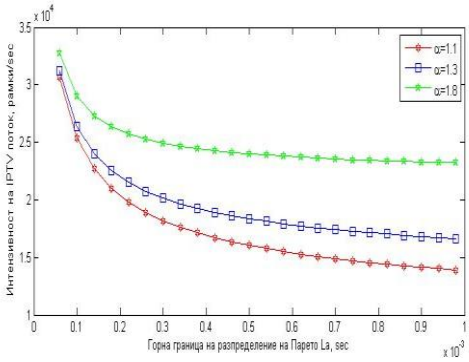
ГЛАВА 4: РЕЗУЛТАТИ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕ НА QOS В NGA МРЕЖА

В тази глава са приведени и анализирани резултатите от моделирането и изследването на пасивна оптична мрежа използваща PON технологии. Моделирането е извършено с помощта на MATLAB софтуер на базата на синтезираните в глава три аналитични двуфазови модели. Разработена е методика за оценка на показателите на качеството на обслужване за три вида трафик на участък от широколентова мрежа за достъп използваща NG PON технологии, която се базира на приведените в по-горните раздели методи за анализ.

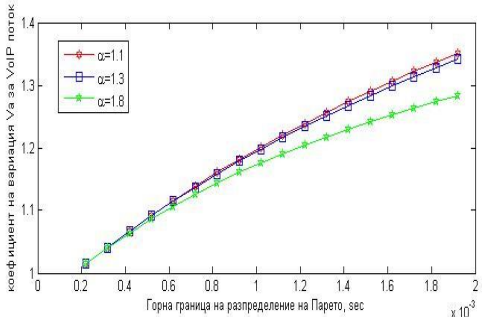
- **Резултати от изследване на Фаза 1 низходяща посока**



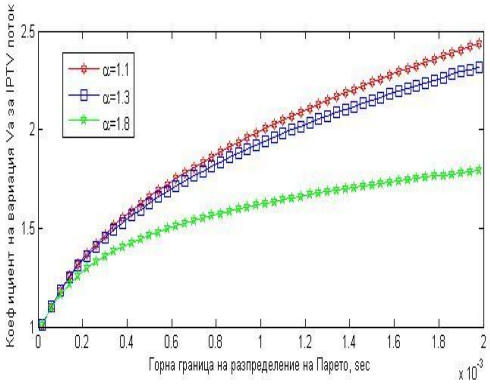
Фиг. 4.1 Интензивност на IPTV поток, като функция от горната граница на разпределението на Парето при $k_a = 1.6\ \mu s$.



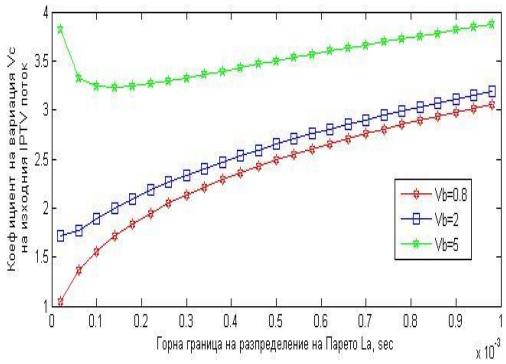
Фиг. 4.2 Интензивност на IPTV поток, като функция от горната граница на разпределението на Парето при $k_a = 20\ \mu s$.



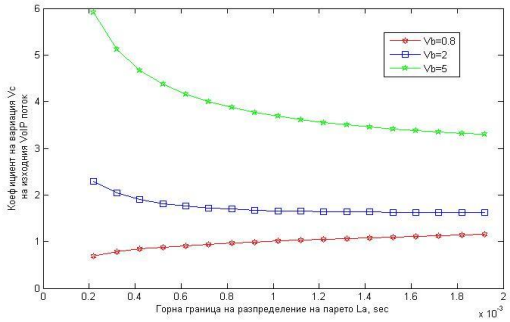
Фиг. 4.3 Зависимости на коефициента на вариация на интервалите във входните v_{aj} потоци от горната граница L_a на разпределение на Парето за VoIP поток при: ka=120*10^-6; la=(120*10^-6):(100*10^-6):(2000*10^-6); lb=1200*10^-6; kb=75*10^-6;



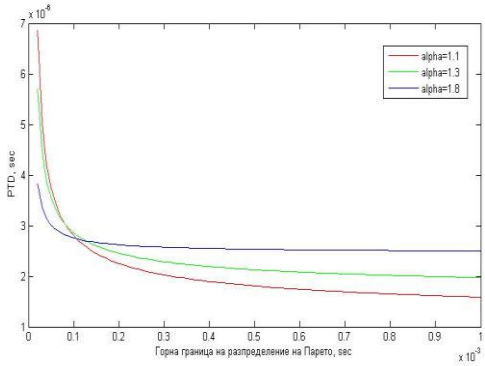
Фиг. 4.4 Зависимости на коефициента на вариация на интервалите във входните v_{aj} потоци от горната граница L_a на разпределение на Парето за IPTV потока при:ka=12.8*10^-6; la=(20*10^-6):(40*10^-6):(2000*10^-6); lb=300*10^-6; kb=18.7*10^-6;



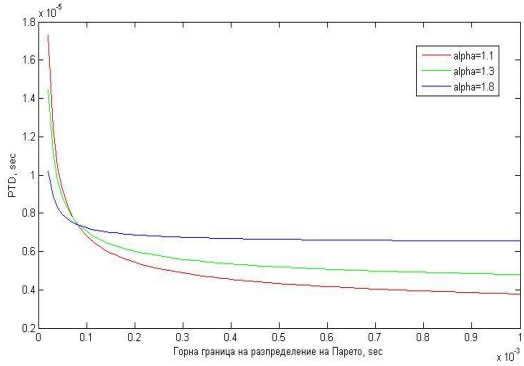
Фиг. 4.5 Зависимости на коефициента на вариация на интервалите в изходния IPTV поток от горната граница L_a на разпределение на Парето при ka=1.6*10^-6; la=(20*10^-6):(40*10^-6):(1000*10^-6); alpha=1.3; lb=150*10^-6; kb=0.83*10^-6;



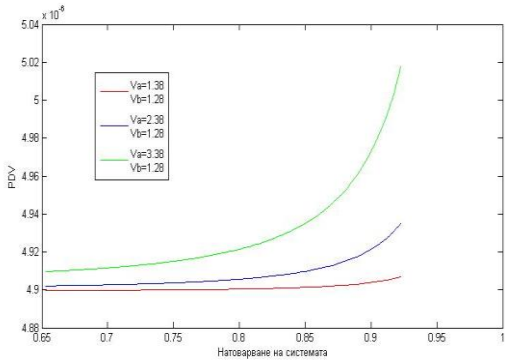
Фиг. 4.6 Зависимости на коефициента на вариация на интервалите в изходен VoIP поток от горната граница L_a на разпределение на Парето при ka=120*10^-6; la=(120*10^-6):(100*10^-6):(2000*10^-6); lb=1200*10^-6; kb=75*10^-6 , alpha=1.3.



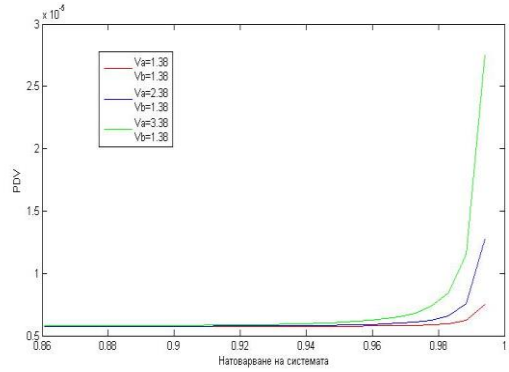
Фиг.4.7 Средно закъснение в първата фаза от горната граница на разпределение на Парето за IPTV поток при G/G/1; ka=3*10^-6; la=(20*10^-6):(10*10^-6):(1000*10^-6); kb=1.65*10^-6; lb=19.5*10^-6; VB=1.82



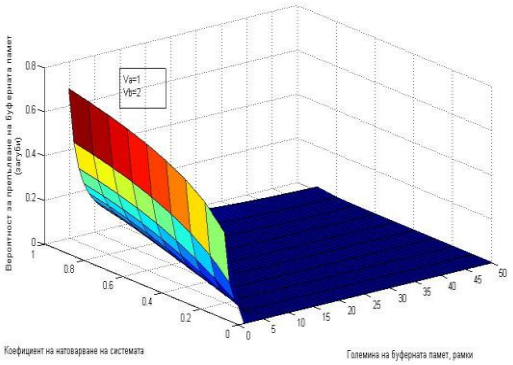
Фиг. 4.8 Средното закъснение в първата фаза от горната граница на разпределение на Парето за IPTV поток за система от вида M/G/1. kb=1.65*10^-6; lb=19.5*10^-6; Vb=1.82



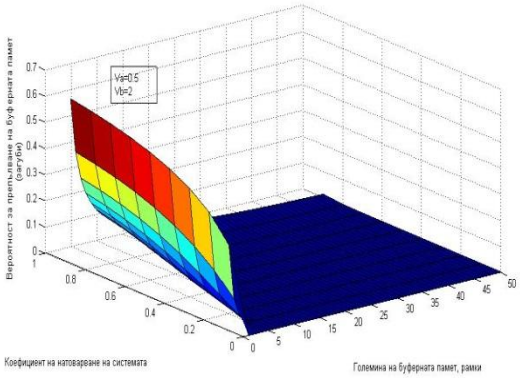
Фиг. 4.9 Средно квадратично отклонение на закъснението, за IPTV трафичен поток от натоварването на системата при ka=1.6*10^-6; la=(30*10^-6):(1*10^-6):(800*10^-6); alpha=1.3; kb=1.6*10^-6, lb=20*10^-6



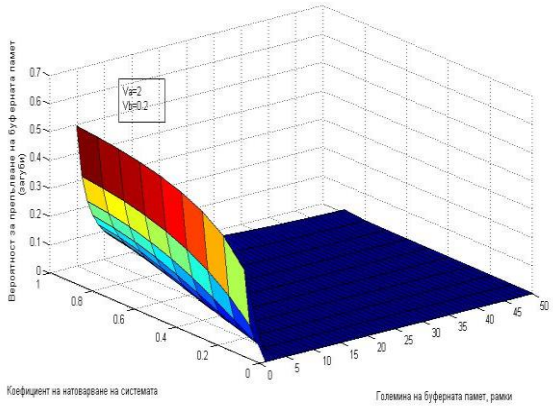
Фиг. 4.10 Зависимост на средно квадратичното отклонение на закъснението, за IPTV трафичен поток от натоварването на системата при ka=1.6*10^-6; la=(30*10^-6):(1*10^-6):(80*10^-6); alpha=1.3; kb=1.6*10^-6 lb=30*10^-6.



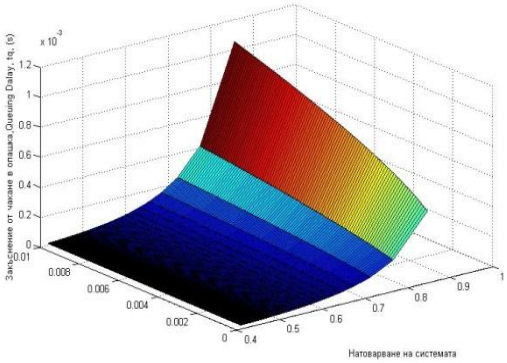
Фиг. 4.11 Вероятност за загуби от препълването на буферна памет PLR за VoIP трафичен поток при $V_a = 1, V_b = 2$



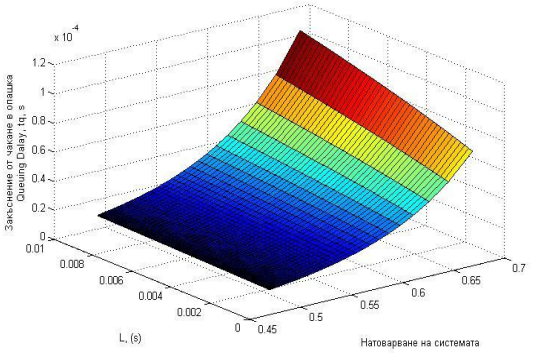
Фиг. 4.12 Вероятност за загуби от препълване на буферната памет PLR за VoIP трафичен поток при $V_a = 0.5$, $V_b = 2$.



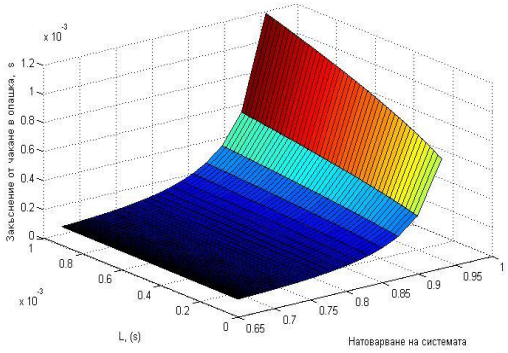
Фиг. 4.13 Вероятност за загуби от препълване на буферната памет PLR за VoIP трафичен поток при $V_a = 2$, $V_b = 0.2$.



Фиг. 4.14а Закъсненията от чакане в опашка за VoIP поток при ka=120*10^-6; la=(1200*10^-6):(200*10^-6):(10000*10^-6); alpha=1.3; kb=102.4*10^-6; lb=200*10^-6;

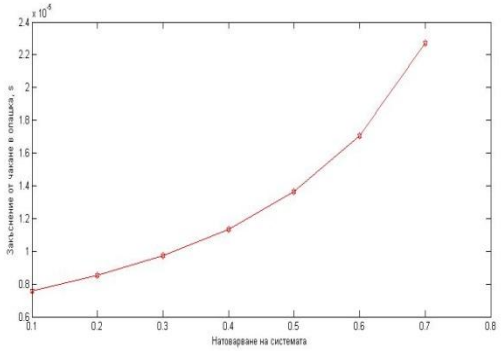


Фиг. 4.14b Закъсненията от чакане в опашка за VoIP поток при ka=120*10^-6; la=(1200*10^-6):(200*10^-6):(10000*10^-6); alpha=1.3; kb=200*10^-6; lb=1200*10^-6;

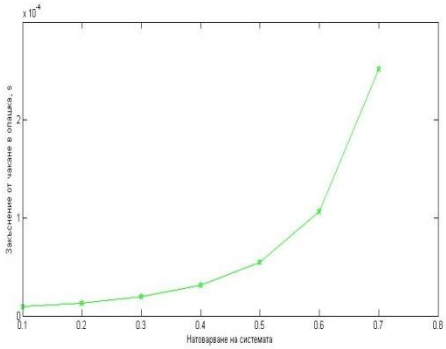


Фиг. 4.15 Закъсненията от чакане в опашка за IPTV поток при ka=12.8*10^-6; la=(100*10^-6):(20*10^-6):(1000*10^-6); alpha=1.3; kb=12.8*10^-6; lb=100*10^-6;

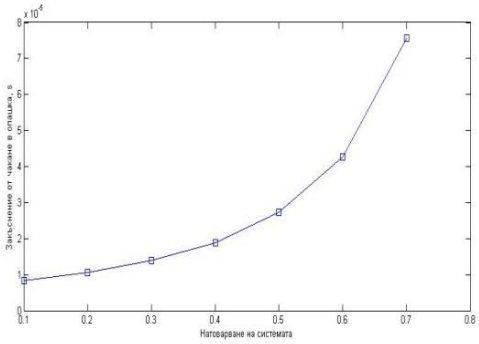
- **Резултати от изследване на Фаза 2 низходяща посока**



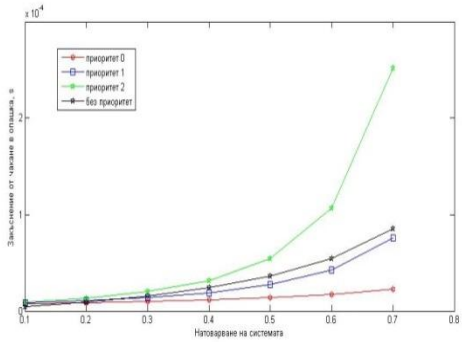
Фиг. 4.16 Закъснение от чакане в опашка при приоритетно обслужване за поток от клас 0



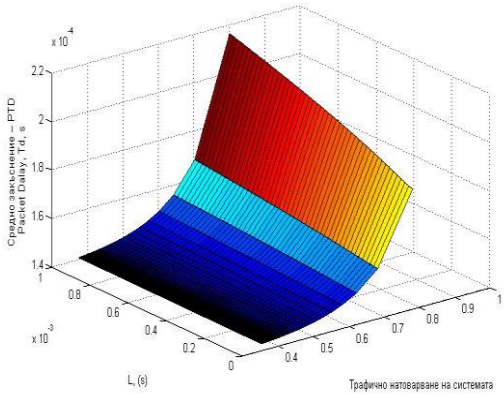
Фиг. 4.18 Закъснение от чакане в опашка при приоритетно обслужване за поток от клас 2



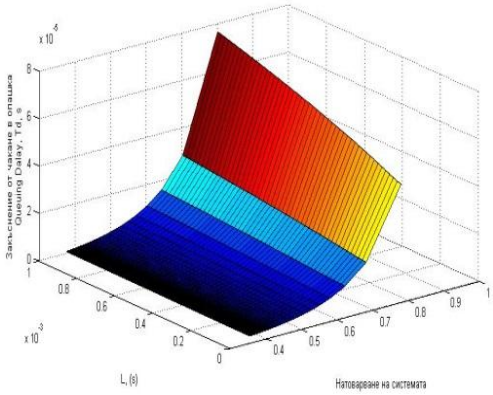
Фиг. 4.17 Закъснение от чакане в опашка при приоритетно обслужване за поток от клас 1



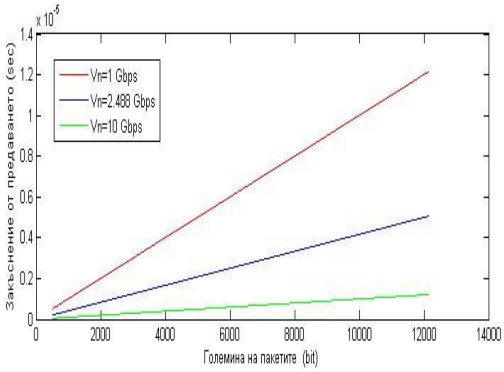
Фиг. 4.19 Закъснение от чакане в опашка при приоритетно обслужване и при безприоритетно обслужване на потоците.



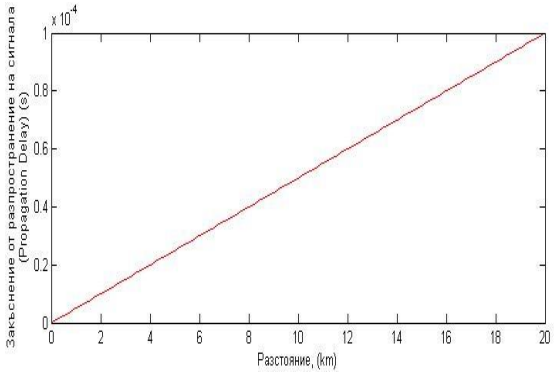
Фиг. 4.20 Средно закъснение като функция от натоварването и максималната стойност на интервала на постъпване на пакетите за трафичен поток при ka =25.6 μs, 30 μs≤LA ≤1000 μs, LB=30 μs, KB=25.6 μs



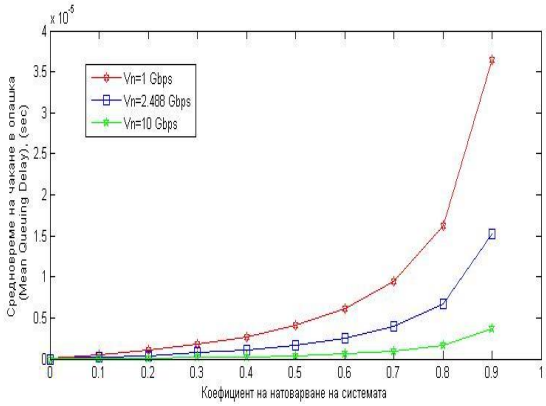
Фиг. 4.21 Закъснение от чакане в опашка, като функция от натоварването и максималната стойност на интервала на постъпване на пакетите за трафичен поток при ka =25.6 μs, 30 μs≤La ≤1000 μs, Lb=30 μs, kb=25.6 μs



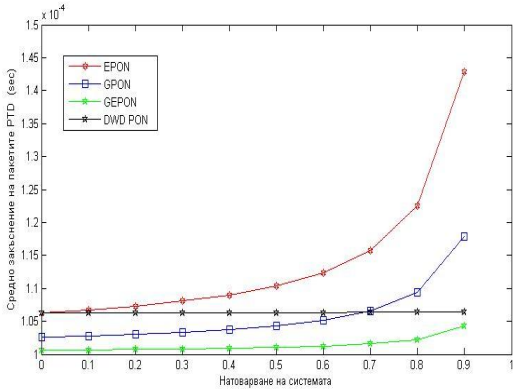
Фиг. 4.22 Зависимост на закъснението от предаване от големината на пакетите



Фиг. 4.23 Зависимост на закъснението от разпространение от разстоянието

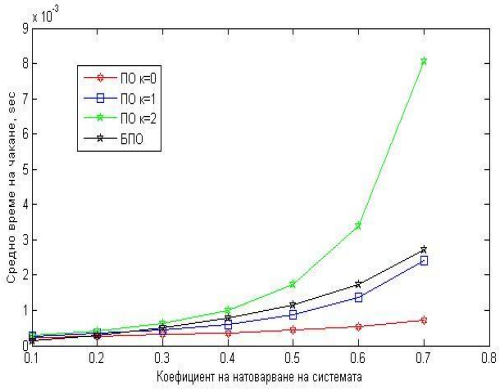


Фиг. 4.24 Зависимост на средното време на престой в опашка във фаза 2 от натоварването на системата.

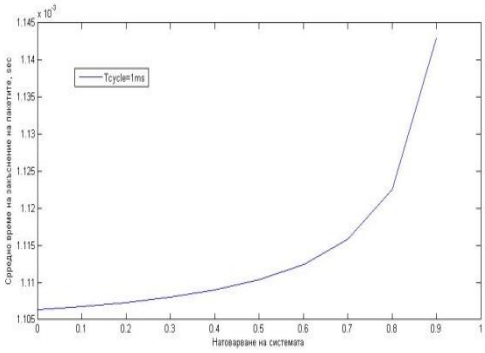


Фиг. 4.25 Зависимости на средното закъснение на пакетите във фаза 2 от натоварването на системата .

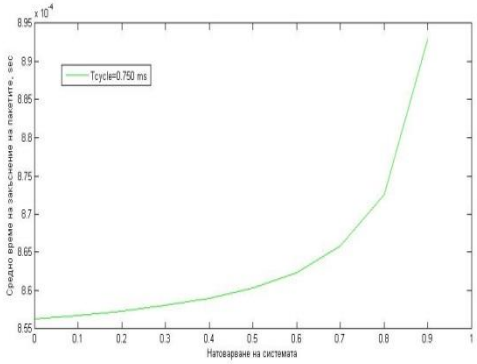
- **Основни резултати от изследване на възходяща посока**



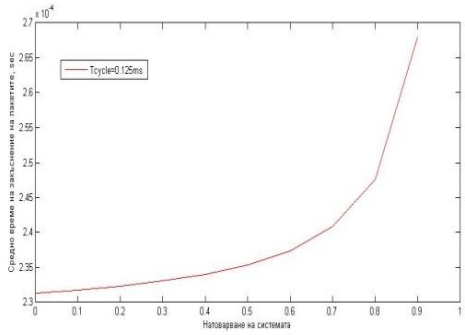
Фиг. 4.26 Зависимост на средното време за чакане за различните класове потоци от сумарното натоварването на системата във фаза 1



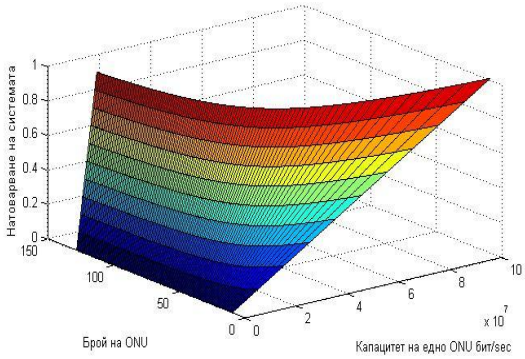
Фиг. 4.27 Средното време на закъснение на пакетите при $\mathrm{T}_{cycle} = 1ms$



Фиг. 4.28 Средното време на закъснение на пакетите при $\mathrm{T}_{cycle} = 0.750ms$



Фиг. 4.29 Средното време на закъснение на пакетите при $\mathrm{T}_{cycle} = 0.125ms$



Фиг. 4.30 Зависимост между натоварването на системата, капацитета и броя на ONU устройствата.

- **Оценка на ефективността и пропускателната способност на NG PON технологии**

Таблица 4.1 Оценка на ефективността и пропускателната способност на NG PON технологии

параметър	технология			
	EPON	GPON	10GEPON	NG GPON
$E_{eff\ up}$	61.3 %	96.3 %	61.3 %	96.3 %
$E_{eff\ down}$	70.9 %	98.9 %	70.9 %	98.9 %
V_{up}	1250 Mbps	1244.16 Mbps	10312.5 Mbps	9953.28 Mbps
C_{up}	762 Mbps	1197 Mbps	6321.5 Mbps	9696 Mbps
V_{down}	1250 Mbps	1244.16 Mbps	10312.5 Mbps	9953.28 Mbps
C_{down}	886 Mbps	1230 Mbps	7311.5 Mbps	9843.7 Mbps

- **метод за изчисляване на параметрите на качеството на обслужване в сегмент от Пасивна оптична мрежа**

В глава четири е предложена методика за изчисляване на параметрите на качеството на обслужване в сегмент от Пасивна оптична мрежа, разработена на базата на избраните в дисертационния труд методи за анализ и получените резултати състояща се в следното:

Задават се изходните данни:

- Брой сегменти в мрежата - M
- Брой на абонатите във всеки сегмент – N
- Брой на класовете потоци –j

Задават се изходните данни за фаза 1 в низходяща посока:

За всеки клас трафик се задават:

- Минималните интервали между времената на постъпване на заявките във входните потоци - k_{aj};
- Максималните интервали между времената на постъпване на заявките във входните потоци - L_{aj};
- Минималните интервали между времената на обслужване на заявките - k_{bj};
- Максималните интервали между времената на обслужване на заявките - L_{bj};
- Определя се параметърът на формата на разпределение на интервалите на обслужване - α;

Изчисляват се параметрите на качеството на обслужване за фаза 1 в низходяща посока

- Изчислява се средната интензивност на входните потоци за всеки тип трафик - $\overline{\lambda_j}$:

$$\overline{\lambda_j} = \frac{(\alpha-1)(L_{aj}{}^{\alpha}-k_{aj}{}^{\alpha})}{\alpha(k_{aj}L_{aj}{}^{\alpha}-L_{aj}k_{aj}{}^{\alpha})}, \quad \alpha \neq 1, \tag{4.1}$$

- Изчислява се средното време на обслужване - $\overline{b_j}$:

$$\overline{b_j} = \frac{(\alpha-1)(L_{bj}{}^{\alpha}-k_{bj}{}^{\alpha})}{\alpha(k_{bj}L_{bj}{}^{\alpha}-L_{bj}k_{bj}{}^{\alpha})}, \quad \alpha \neq 1, \tag{4.2}$$

- Изчислява се коефициентът на вариация за входните и изходните потоци:

$$v_{aj}{}^2 = \frac{(\alpha-1)^2}{\alpha(\alpha-2)} \frac{(L_{aj}{}^{\sigma}-k_{aj}{}^{\alpha})(k_{aj}{}^2L_{aj}{}^{\alpha}-k_{aj}{}^{\alpha}L_{aj}{}^2)}{(k_{aj}L_{aj}{}^{\alpha}-L_{aj}k_{aj}{}^{\alpha})^2}, \quad \alpha \neq 2, \tag{4.3}$$

$$v_{bj}{}^2 = \frac{(\alpha-1)^2}{\alpha(\alpha-2)} \frac{(L_{bj}{}^{\sigma}-k_{bj}{}^{\alpha})(k_{bj}{}^2L_{bj}{}^{\alpha}-k_{bj}{}^{\alpha}L_{bj}{}^2)}{(k_{bj}L_{bj}{}^{\alpha}-L_{bj}k_{bj}{}^{\alpha})^2}, \quad \alpha \neq 2, \tag{4.4}$$

Изчислява се средно време на закъснение на предаването на пакетите PTD:

$$\rho_j = \lambda_j b_j, \tag{4.5}$$

$$f(v_a) = \begin{cases} \exp\left[-\frac{2(1-\rho_j)\left(1-v_{aj}^2\right)^2}{3\rho_j\left(v_{aj}^2+v_{bj}^2\right)}\right] & , v_a < 1 \\ \exp\left[-\left(1-\rho_j\right)\frac{v_a^2-1}{\left(v_{aj}^2+4v_{bj}^2\right)}\right] & , v_a \geq 1 \end{cases}, \tag{4.6}$$

$$\widetilde{w}_j \approx \frac{\rho b\left(v_{aj}^2+v_{bj}^2\right)}{2(1-\rho_j)} f(v_a), \tag{4.7}$$

$$PTD = \widetilde{w}_j + \overline{b_j}. \tag{4.8}$$

Изчислява се , отклонението на закъснението на предаване на пакетите PDV на база средно квадратичното отклонение (3.14)

$$\lambda_j = \frac{1}{M_{aj}}, \tag{4.9}$$

$$\rho_j = \frac{M_{bj}}{M_{aj}}, \tag{4.10}$$

$$M_{a_j} = \frac{\alpha\left(k_{aj}L_{aj}{}^{\alpha} - L_{aj}k_{aj}{}^{\alpha}\right)}{(\alpha-1)\left(L_{aj}{}^{\alpha} - k_{aj}{}^{\alpha}\right)}, \tag{4.11}$$

$$M_{b_{ji}} = \frac{\alpha\left(k_{bj}L_{bj}{}^{\alpha} - L_{bj}k_{bj}{}^{\alpha}\right)}{(\alpha-1)\left(L_{bj}{}^{\alpha} - k_{bj}{}^{\alpha}\right)}. \tag{4.12}$$

$$\sigma_{uj}{}^2 = \frac{\lambda_j^2\left(v_{aj}^2M_{aj}^2+v_{bj}^2M_{bj}^2\right)}{4\left(1-\rho_j\right)^2} + \sigma_{bj}, \tag{4.13}$$

Изчислява се коефициентът на загуби на пакети PLR:

$$F(v) = \frac{2}{V_{aj}{}^2 + V_{bj}{}^2}. \tag{4.14}$$

$$P_{loss_j} = \frac{1-\rho_j}{1-\rho_j{}^{\left(\widetilde{w}_j+1\right)F(v)}} \rho_j{}^{\widetilde{w}_j F(v)}, \tag{4.15}$$

Задават се Изходните данни за за фаза 2 низходяща посока:

За обединения трафичен поток, който се обслужва във фаза 2 се задават:

- $\tau_c = 5\ \mu s/km$

-Средна стойност на интервала на обслужване - $\overline{b}_2$;

-Коефициент на вариация на времето на обслужване - $\overline{v}_2$;

-Средна интензивност на трафичните потоци VoIP, Data и IPTV- λ_j ,

-Средни интервали на обслужване за всеки клас трафик -$\overline{b}_{j2}$;

-Коефициент на вариация на интервала на обслужване за всеки клас трафик $\overline{v}_{j2}$;

-Среден брой IPTV канали в мултикастинг групата - n;

-Средна интензивност на един IPTV канал - λ_{tv};

-Интензивност на VoD потока за един абонат - λ_{VoD};

-Общ брой абонати на услугата VoD в сегмента - N_{VoD}.

Изчисляват се параметрите на качеството на обслужване за фаза 2 в низходяща посока:

- Изчислява се интензивността на IPTV потока

$$\Lambda_{TV} = n\lambda_{tv} + N_{VoD}\lambda_{VoD}. \quad (4.16)$$

Изчислява се сумарната интензивност на входния поток:

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^{N}(\lambda_{Vi} + \lambda_{Di}) + \Lambda_{TV} \quad (4.17)$$

Изчислява се PTD:

$$PTD = \bar{b}_2 + \tau_c L + \frac{\Delta_2 \bar{b}_2{}^2\left(1+\bar{v}_{b_2}^2\right)}{2(1-\rho)}. \quad (4.18)$$

За всеки клас поток се изчислява PTD:

$$R_{k-1} = \sum_{j=1}^{k-1} {}_j\, \rho_j\ , \quad (4.19)$$

$$R_k = \sum_{j=1}^{k} \rho_j = \sum_{j=1}^{k} \lambda_j \bar{b}_{j2}. \quad (4.20)$$

$$w_j = \frac{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j \bar{b}_{j2}^2\left(1+\bar{v}_{j2}^2\right)}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}, \quad (4.21)$$

$$PTD_j = \bar{b}_{j2} + \tau_c L + w_{j2},\ ..(j = 1,2,3), \quad (4.22)$$

Изчислява се вариацията на времето на чакане на заявките от клас к, PDV_j:

$$u_{j2} = w_{j2} + \bar{b}_{j2}, \quad (4.23)$$

$$w_{j2}^{(2)} = \frac{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j \bar{b}_{j2}^{(3)}}{3(1-R_{k-1})^2(1-R_k)} + \frac{\sum_{j=1}^{3} \lambda_j \bar{b}_{j2}^{(2)} \sum_{j=1}^{3} \lambda_j \bar{b}_{j2}^{(2)}}{2(1-R_{k-1})^2(1-R_k)^2} + \frac{\sum_{j=1}^{k-1} \lambda_j \bar{b}_{j2}^{(2)} \sum_{j=1}^{3} \lambda_j \bar{b}_{j2}^{(2)}}{2(1-R_{k-1})^3(1-R_k)}, \quad (4.24)$$

$$b_j^{(2)} = b_j^2\ (1 + \bar{v}_{j2}^2) \quad (4.25)$$

$$PDV_{j2} = \sqrt{w_{j2}^{(2)} + 2w_{j2}\bar{b}_{j2} + \bar{b}_{j2}^{(2)} - u_{j2}^2}\ , \quad (4.26)$$

Задават се изходните данни за фаза 1 възходяща посока

Задават се:

- Средна интензивност на входящия поток за всеки вид абонатен трафик за всеки абонат – VoIP, VoD и Data - $\bar{\lambda}_{i_v}$, $\bar{\lambda}_{i_{VoD}}$, $\bar{\lambda}_{i_D}$;
- Усреднена стойност на параметъра свързан с дължината на оптичната линия - Δl;
- Средна стойност на интервала на обслужване: - $\bar{b}_{j_{up1}}$;
- Средна стойност на коефициента на вариация за изходния поток - $\bar{v}_{bi_{up1}}^2$;
- Средно време на обработка на пакета от тип j - $\overline{t_{pr_j}}$;
- Средно време на предаване на пакета от тип j - $\overline{t_{tr_j}}$;
- Коефициента на вариация на времето за обслужване за всеки клас трафик - V_{b_D} , V_{b_D} , $V_{b_{VoD}}$.

Изчисляват се параметрите на качеството на обслужване за фаза 1 възходяща посока:

За всеки абонат се изчислява закъснението на всеки отделен поток:

$$R_{k-1} = \sum_{j=1}^{k-1} {}_j\, \rho_{j_{up1}}\ , \quad (4.27)$$

$$R_k = \sum_{j=1}^{k} \rho_{j_{up1}} = \sum_{j=1}^{k} \bar{\lambda}_{j_{up1}} \bar{b}_{j_{up1}}, \quad (4.28)$$

$$w_{j_{up1}} = \frac{\sum_{j=1}^{3} \bar{\lambda}_{j_{up1}} \bar{b}_{j_{up1}}^2\left(1+\bar{v}_{j_{up1}}^2\right)}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)}, \quad (4.29)$$

$$u_{j_{up1}} = \widetilde{w}_{j_{up1}} + \bar{b}_{j_{up1}}. \quad (4.30)$$

Изчисляват се параметрите на качеството на обслужване за фаза 2 възходяща посока:

Изчисляват се:

Средни стойности на интервала за достъп за всеки абонат

$$\overline{t_{a_{ij}}} = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta l\, \tau + \sum_{i=1}^{N-1} \overline{t_{tr_{ij}}}, \quad (4.29)$$

Средни стойности на интервала на обслужване:

$$\overline{b_{JUP}} = \overline{t_{a_i}} + \overline{t_{pr_j}} + \overline{t_{tr_j}}. \quad (4.30)$$

За сумарния поток на всеки абонат се изчислява закъснението $PTD_{i_{up2}}$ във фаза 2:

$$PTD_{i_{up2}} = \bar{b}_{ij_{up}} + \tau_c L_i + w_{i_{up2}}, \ ..(j = 1,2,3) \quad (4.31)$$

$$\bar{\lambda}_i = \bar{\lambda}_{Vi} + \bar{\lambda}_{VoDi} + \bar{\lambda}_{Di}, \quad (4.32)$$

$$u_{i_{up2}} = \widetilde{w}_{i_{up2}} + \bar{b}_{i_{up2}}, \quad (4.33)$$

$$\widetilde{w}_{i_{up2}} \approx \frac{\bar{\lambda}_i \bar{b}_{i_{up2}}{}^2 \left(1 + \bar{v}^2_{bi_{up1}}\right)}{2(1-\rho)}. \quad (4.34)$$

PDV се изчислява на база средно квадратичното отклонение на закъснението:

$$\sigma_{up2} = \sqrt{u_{i_{up2}}{}^{(2)} - u_{i_{up2}}{}^2}. \quad (4.35)$$

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ЗА ПРАКТИКАТА

Резултатите от изследването показват, че WDM PON технологията притежава най-добри характеристики във възходяща посока тъй като липсва споделяне на преносния капацитет. Поради отсъствие на продължителен процес на достъп и малки стойности на интервала на обслужване при WDM PON се постига най-малко влияние на коефициента на вариация на интервала на обслужване. В низходяща посока GEPON технологията си съперничи с WDM PON, като при натоварвания на системата до 70% е по-удачно използване на GEPON.

При TDM PON технологиите най-добри стойности за PTD и PDV във възходяща посока на сегмента се постигат при 10GPON.

Анализът на пропускателната ефективност на канално ниво за мрежи, изградени на базата на следваща генерация PON технологии, при еднакъв брой абонати в мрежата показва около 30% по-висока ефективност на 10GPON технологията, като основното намаляване на ефективността при GEPON се получава от схемата на линийно кодиране.

При формирането на трафичните потоци (Shaping) е необходимо да се цели постигане на минимален коефициент на вариация на интервалите на обслужване в обслужващите устройства, а буферните памети трябва да притежават достатъчен капацитет, което се постига с достатъчен обем за филтриране на пулсациите при минимум PLR.

Освен закъсненията, свързани с чакане на заявките в опашки и обработката на заявките във възлите на мрежовите устройства е необходимо да се отчита времето на разпространение на сигналите в преносната среда. Съвременните мрежови устройства притежават изключителна производителност и бързодействие и закъсненията в тях даже при голямо натоварване не превишават стойности от няколко десетки микросекунди. Отчитайки известния закон на Мур, съгласно който изчислителната мощ на интегралните схеми се удвоява на всеки 18 месеца, може да се прогнозира повишаване на производителността на новото мрежово оборудване, което ще доведе до още по-голямо намаляване на закъсненията от обработка във възлите. Скоростта на разпространение на сигнала в оптичната линия обаче остава същата и закъсненията от разпространение не се променят. В мрежата за достъп, където разстоянията са от порядъка на 10 до 20 км. тези закъснения са от 50 до 100 μs. Тези стойности превишават съществено закъсненията от обработка и чакане в опашки. Следователно в процеса на проектиране на оптични мрежи за достъп, при изчисляване на PTD е необходимо да се отчитат закъсненията от разпространение на сигналите.

ПРИНОСИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:

Основните приноси в дисертационния труд са от научно-приложен характер и могат да бъдат обобщени по следния начин:

- Синтезиран е аналитичен модел на сегмент от пасивна оптична мрежа за достъп от ново поколение с използване методите на теорията на масовото обслужване, който позволява прогнозиране на показателите на качеството на обслужване за различни класове трафик.
- Предложен е метод за оценка на мрежовата ефективност в сегмент от оптична мрежа за достъп.
- Предложени са варианти за увеличаване капацитета на изградена вече пасивна оптична мрежа.

- Получени са резултати от числено изследване на сегмент от PON мрежа изграден на базата на GPON EPON WDM PON технологии
- Разработен е метод за оценка на показателите на качеството на обслужване на участък от широколентова мрежа за достъп използваща PON технологии.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Костадинова С., Р. Димова, „Еволюция на оптичните мрежи за достъп“, Осма научно-приложна конференция с международно участие “ Инвестиции в бъдещето 2011 pp. 67-73, Варна 2011.

2. Костадинова С., Р. Димова, „Мрежова архитектура и стратегия за предоставяне на нови широколентови услуги“, Известия на съюза на учените Варна, серия „Технически науки“ 2, ISSN 1310-5833, стр. 29-33, 2011.

3. Костадинова С., Г. Симеонова, Д. Александров, „Архитектура, модел и мощностен баланс на мрежа за достъп от следващо поколение”, 3-ти международен научен конгрес на ТУ Варна -10.2012, pp. 172-176, 2012.

4. Kostadinova S., R. Dimova, „Optical line Terminal Process modeling”, Proceedings of papers Vol. 2, International Scientific Conference on Information, Communication and Energy systems and Technologies ICEST 2013, Ohrid, Macedonia 27 Jun 2013, pp.463-466, 2013.

5. Kostadinova S. „NGPON networks throughput efficiency evaluation”, International scientific proceedings, vol.2, UNITEX, Gabrovo, 22-23. 10. 2013, pp.79-83, 2013.

6. Костадинова С., Р. Димова, "Създаване на математически модел за моделиране и изследване на процеси в телекомуникационна мрежа", Сборник трудове ИИКТ-БАН, ИМИ-БАН, ВУ КТП, Моделиране и Управление на Информационните процеси, София 2013 ISSN 1314-2771, стр. 31-43, 2013.

7. Kostadinova, S., Dimova, R., Stoyanov, G., "Performance parameters evaluation in broadband access network", Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 Brashov, Romania, International Conference, pp.790-795, 2014, available on IEEE Xplore Digital Library.

8. Костадинова С., Р. Димова, „Модел на мрежа за достъп от следващо поколение”, Сборник научни доклади „Принос за развитие на технологичен предприемачески дух и насоченост на инженерните изследвания към развитие на икономика, базирана на знание и иновации”, Варна 2014; pp.31-36, 2014.

9. Костадинова С., Р. Димова, „Иновативни технологии за изграждане на мрежи за достъп от следващо поколение“, Годишник на Департамент ”Телекомуникации”, Нов Български Университет, София 2014/том 1, - ISSN 2367-5039, 2014.

РЕЗЮМЕ НА АНГЛИЙСКИ ЕЗИК

The subject of the current PhD Thesis is related to investigation of Quality of service (QoS) evaluation in new generation passive optical transport systems as main problem in optical access networks. The major goal is to study the QoS characteristics in 10 Gigabit-capable Passive Optical Networks (10GPON), 10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network (10GEPON) and Wavelength Division Multiplexing PON (WDM PON), based on mathematical models development. An analysis of methods for QoS evaluation in passive optical networks is performed.

In the thesis the xDSL technology limitations were shown applied in Bulgaria access network. In relation with the grow in bandwidth demand by delivering extremely high data rates to end users and offering high levels of performance, 10GPON, 10GEPON and WDM PON technologies that promise to meet the anticipated that can cater for all current and predicted future voice, data and video services were selected for modeling by comparative analysis.

There were analyzed the structure and features of the PON networks and the problems that it creates. Analysis of the telecommunications services types and their basic bandwidth requirements is given. Based on depth analysis were defined the basic problem in passive optical networks connected to the collective use of the transmission environment and quality of service ensuring.

Methods of mathematical modeling of the quality of service parameters in telecommunication packet networks using queuing theory approach are proposed. Based on these methods characteristics of the QoS, which describe the requirements of network services were discussed in terms of network load. Network load is characterized by average package intensity, packet size and service time of the packets in the node, network reliability expressed by the network delay, delay variation and packet loss and network performance expressed by the bandwidth.

In the majority of the probabilistic analyses, the packet arrivals are modeled by Poisson process. In the thesis bounded Pareto distribution for traffic flow modeling and a new method for queuing delay analysis based on the Kramer and Langenbach-Belz approximation are developed.

New analytical model of access network representing the structural and functional organization is presented. Analytical dependences are derived to evaluate the network performance. Based on analysis variants of modernization of already built passive optical network were proposed.

In the thesis the dependences of QoS characteristics from input streams (coming flow) parameters were analyzed in segment of NGPON network, based on the mathematical model in MATLAB. The developed method for QoS evaluation in PON segments was presented.

The thesis is a base for the development of innovative methods, which could find a practical implementation in PON next generation telecommunication access networks.