



## References

1. Tubol'tsev L.G., Golubykh G.N., Padun N.I. Analiz riska avarii i opredelenie vozmozhnogo material'nogo ushcherba na metallurgicheskom predpriatii [Accident risk analysis and identification of possible material damage to the steel plant]. *Sb. nauch. tr. "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii"* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]. Dnepropetrovsk, 2006, Vol. 12, pp. 407–420.
2. *Obzor avariyy i incidentov v metallurgicheskoy otrasli* [Electronic resource]. Rezhim dostupa: Available at: <http://www.markmet.ru/tehnika-bezopasnosti-v-metallurgii/obzor-krupneishikh-avarii-v-metallurgicheskoi-otrasli> (Accessed 28 January 2016).
3. Gusev Iu.V., Gusev D.Iu. Matematicheskaya model' protsessa transportirovaniya chuguna v konver-ternyi tsekh [Mathematical model of iron transport process in the converter plant]. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Reporter of the Pryazovskyi state technical university*, 2008, no. pp. 230–232.
4. Emel'ianov V.A., Emel'ianova N.Iu. Intel'lectual'nyi metod raspoznavaniya izobrazhenii termogramm s ispol'zovaniem konturnogo analiza [Intelligent method of thermal image recognition based on contour analysis]. *Sistemy obrabotki informatsii. – Information processing systems*, 2013, no. 9 (116), pp. 22–26.
5. Vavilov V.P. *Infrakrasnaia termografiya i teplovoi kontrol'* [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, 2013, 544 p.

УДК 004.052.2

DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-89-96

## ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ ДОСТУПА LONG-REACH PASSIVE OPTICAL NETWORKS

© А.В. Игнатов<sup>1</sup>

Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,  
630102, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86.

Рассматривается технология доступа пользователей к инфокоммуникационным услугам на основе пассивных оптических сетей большой дальности LR-PON. Делается попытка оптимизации развертывания сети LR-PON. Проводится оценка характеристик сети, ограничивающих максимальную длину оптической линии между сетевыми устройствами. Исследования проведены методами линейного программирования. Произведен расчет максимальной радиуса сети при заданных параметрах надежности, стоимости и мощности устройств LR-PON.

*Ключевые слова:* оптические сети; спецификация LR-PON; наружность; энергетический баланс; стоимость сети доступа.

## LONG-REACH PASSIVE OPTICAL NETWORK OPTIMIZATION

A.V. Ignatov

Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences,  
86 Kirov St., Novosibirsk, 630102, Russia.

A technology enabling the users' access to information and communication services, which is based on long-reach passive optical networks of LR-PON is considered in the article. An attempt is made to optimize the deployment of LR-PON network. The network characteristics limiting the maximum length of an optical line between network devices are assessed. Researches have been carried out with the application of linear programming methods. The maximum radius of the network is calculated at the constraint parameters of reliability, cost and capacity of LR-PON devices.

*Keywords:* optical networks; LR-PON specification; reliability; power balance; access network cost

## Введение

Рост информационных потоков, циркулирующих в современных системах связи, обуславливает ужесточение требований к функционированию этих систем. Не является исключением и сеть доступа к инфокоммуникационным услугам.

Существенную долю всех современных сетей доступа занимают пассивные оптические сети (Passive Optical Network-PON), одной из которых является перспективная Long-reach PON (LR-PON). Приставка «Long-reach» подчеркивает увеличение масштаба развертывания по сравнению с классической PON (20 км). Сетевые устройства в Long-reach могут находиться друг от друга на расстояниях до 100 км. Оборудованием сервис-провайдера LR-PON является оптический линейный терминал (Optical Line Terminal) – OLT, который соединяется с пользо-

<sup>1</sup>Игнатов Александр Владимирович, аспирант, e-mail: [igsascha@mail.ru](mailto:igsascha@mail.ru)  
Ignatov Aleksandr, Postgraduate, e-mail: [igsascha@mail.ru](mailto:igsascha@mail.ru)

вательскими ONU (Optical Network Unit – оптическое сетевое устройство) через оптический сплиттер (рис. 1).

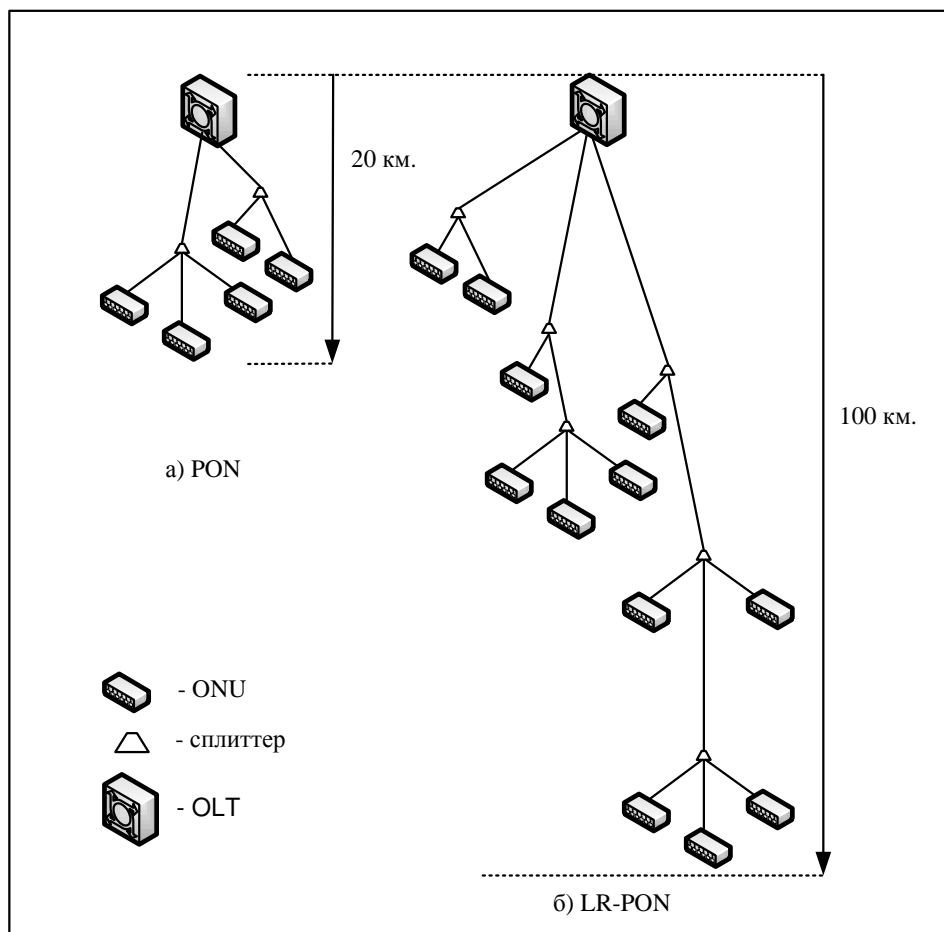


Рис. 1. Топология пассивных оптических сетей: а – PON; б – LR-PON

Строительству LR-PON, как достаточно сложной системе, предшествуют детальные расчеты по различным критериям. Попробуем обозначить важнейшие из них.

Способность передачи информации на заявленные расстояния достигается соответствием бюджета мощности передающих устройств бюджету потерь в рассматриваемой сети. Данное соответствие, называемое энергетическим балансом, несомненно, является существенной характеристикой сети доступа.

Не менее важна надежность функционирования сети, которая обеспечивает качество предоставляемых услуг пользователям.

Кроме того, обозначенные свойства тесно связаны с ресурсопотреблением системы. Бюджет стоимости сети непосредственно обеспечивает ее соответствие всем предъявляемым требованиям, является их фундаментальной базой.

Таким образом, энергетический баланс, надежность и стоимость наиболее вероятно являются основными направлениями оптимизации сети доступа.

В статье делается попытка оптимизации развертывания Long-reach PON по указанным критериям. При расчетах применяются методы линейного программирования.

#### Постановка задачи

Введем следующие обозначения:

$l_B$  – длина участка оптического волокна от OLT до ONU;

$A_{\text{общ}}$  – надежность сети доступа;



$C_{\text{общ}}$  – затраты на развертывание LR-PON;

$W_{\text{общ}}$  – бюджет мощности на развертывание LR-PON.

Масштабы развертывания сети доступа можно менять в зависимости от требований, которые предъявляются к рассматриваемым характеристикам. Тогда задачу оптимизации сети доступа в общем виде можно сформулировать так:

$$\begin{aligned} l_{\text{в}} &\rightarrow \max, \\ A_{\text{общ}} &\leq A_{\text{доп}}, \\ C_{\text{общ}} &\leq C_{\text{доп}}, \\ W_{\text{общ}} &\leq 30 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_{\text{доп}}$ ,  $C_{\text{доп}}$  – требования по надежности и стоимости соответственно, а  $W_{\text{общ}} \leq 30$  [дБ] – бюджет мощности, соответствующий максимальной длине линии LR-PON не более 100 км. Эта величина обусловлена применяемыми типами усилителей оптического сигнала [3]. В рамках статьи бюджет мощности будет верхним граничным пределом оптимизации. При планировании установки на сети других усилителей фиксированный параметр  $W_{\text{общ}}$  может быть изменен.

Надежность и стоимость сети представляются функциями, вводящими ограничения к наибольшей длине оптической линии.

#### Расчет надежности

Надежность сложной системы можно найти из показателей надежности составляющих ее элементов. В LR-PON каждая цепь *OLT – сплиттер – ONU* является последовательным соединением элементов, а между собой цепи соотносятся как параллельное соединение [2]. Надежность всей сети будет определяться наиболее ненадежной цепью *OLT – сплиттер – ONU*.

Переходя к вероятности отказа, получаем:

$$U_{\text{общ}} = 1 - A_{\text{общ}} = 1 - \prod(1 - U_i), \quad (2)$$

где  $U_{\text{общ}}$  – вероятность отказа сети;  $U_i$  – вероятность отказа  $i$ -го элемента наиболее ненадежной цепи *OLT – сплиттер – ONU*.

От произведения вероятностей отказов можно перейти к суммированию [5]:

$$1 - \prod(1 - U_i) \approx \sum U_i. \quad (3)$$

Исходя из (2) и (3), для сети без резервирования получаем:

$$U'_{\text{общ}} = U_{\text{OLT}} + U_{\text{ф}}l_{\text{ф}} + NU_{\text{сп}} + \sum_{k=1}^{N-1} U_{\text{пр}}l_k + U_{\text{р}}l_m + U_{\text{ONU}}, \quad (4)$$

где  $U_{\text{OLT}}$  – вероятность отказа OLT;  $U_{\text{ф}}$  – вероятность отказа волокна на участке *OLT – сплиттер* (фидерный участок), приведенная к длине 1 км;  $l_{\text{ф}}$  – длина участка *OLT – сплиттер*;  $N$  – количество сплиттеров в сети;  $U_{\text{сп}}$  – вероятность отказа сплиттера;  $U_{\text{пр}}$  – вероятность отказа волокна на участке *сплиттер – сплиттер* (промежуточный участок), приведенная к длине 1 км.;  $l_k$  – длина  $k$ -участка *сплиттер – сплиттер*;  $U_{\text{р}}$  – вероятность отказа волокна на участке *сплиттер – ONU* (распределительный участок), приведенная к длине 1 км;  $l_m$  – длина  $m$ -распределительного участка *сплиттер – ONU*;  $U_{\text{ONU}}$  – вероятность отказа ONU.



Полагая равными вероятности отказа волокна на любых участках сети, введем общее обозначение  $U_B = U_\phi \approx U_{\text{пр}} \approx U_p$ . Длина участка *OLT – ONU* определяется значением

$$l_B = (l_\phi + \sum_{k=1}^{N-1} l_k + l_m). \quad (5)$$

Тогда

$$U'_{\text{общ}} = U_{OLT} + NU_{\text{сп}} + U_{ONU} + U_B l_B. \quad (6)$$

Для сети с полным резервированием необходимо учесть дополнительную установку оптических переключателей трафика с основного канала на резервный, которые будут вносить свой вклад в вероятность отказа. С учетом этого получаем:

$$U''_{\text{общ}} = U_{OLT}^2 + U_{\text{сп}}^2 N + U_{ONU}^2 + U_{\text{оп}}(N + 2) + U_B^2 l_B, \quad (7)$$

где  $U_{\text{оп}}$  – вероятность отказа оптического переключателя.

Схема с полным резервированием труднореализуема. На практике резервируют наиболее важные элементы. При частичном резервировании в каждом слагаемом из (4) водится в квадрат только та вероятность отказа, которая характеризует резервируемый элемент.

Выражение (4)–(6) даны для максимально протяженной цепи *OLT – сплиттеры – ONU* линий, надежность остальных полагается не хуже.

#### Расчет стоимости

Стоимость LR-PON будет складываться из стоимости составляющих ее элементов. Для сети без резервирования получаем:

$$C'_{\text{общ}} = C_{OLT} + C_\phi l_\phi + NC_{\text{сп}} + \sum_{k=1}^{N-1} C_{\text{пр}} l_k + \sum_{m=1}^{M-1} l_m C_p + MC_{ONU} + C_{\text{пнр}}, \quad (8)$$

где  $C_{OLT}$  – стоимость OLT;  $C_\phi$  – стоимость 1 км волокна на фидерном участке;  $C_{\text{сп}}$  – стоимость сплиттера;  $C_{\text{пр}}$  – стоимость 1 км волокна на промежуточном участке;  $C_p$  – стоимость 1 км волокна на распределительном участке;  $C_{ONU}$  – стоимость ONU;  $M$  – количество ONU;  $l_m$  – длина  $m$ -распределительного участка *сплиттер – ONU*;  $C_{\text{пнр}}$  – стоимость пуско-наладочных работ при развертывании сети.

Для передачи всего трафика можно использовать однопольный оптический кабель, поэтому стоимость волокна для разных участков будет одинаковой. Тогда  $C_B = C_\phi \approx C_{\text{пр}} \approx C_p$ .

Аналогично с (6)

$$C'_{\text{общ}} = C_{OLT} + NC_{\text{сп}} + MC_{ONU} + C_{\text{пнр}} + C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), \quad (9)$$

Для сети с полным резервированием стоимость каждого устройства увеличится вдвое. Также необходимо учесть стоимость оптических переключателей:

$$C''_{\text{общ}} = 2C_{OLT} + 2NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + C_{\text{оп}}(N + M + 1) + C_{\text{пнр}} + 2C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), \quad (10)$$

Допустим, что стоимость пуско-наладочных работ равна стоимости монтируемого оборудования. С учетом этого для сети без резервирования получим:

$$C'_{\text{общ}} = 2C_{OLT} + 2NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + 2C_{\text{оп}}(N + M + 1) + 2C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m). \quad (11)$$

При установке устройств с резервированием будем полагать удвоение стоимости этих

устройств. Стоимость пуско-наладочных работ оставим равной аналогичному показателю для сети без резервирования. Для сети с полным резервированием

$$C''_{\text{общ}} = 3C_{OLT} + 3NC_{\text{сп}} + 3MC_{ONU} + 3C_{\text{оп}}(N + M + 1) + 3C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m). \quad (12)$$

Выражения (10), (11) показывают соответственно минимальную и максимальную стоимость развертывания сети LR-PON.

### Решение задачи оптимизации

Составим системы уравнений по надежности и стоимости развертывания сети:

$$A_{\text{общ}} = \begin{cases} 1 - (U_{OLT} + NU_{\text{сп}} + U_{ONU} + U_B l_B), I \\ 1 - (U_{OLT}^2 + U_{\text{сп}} N + U_{ONU} + U_{\text{оп}} + U_B l_B), II \\ 1 - (U_{OLT}^2 + U_{\text{сп}}^2 N + U_{ONU} + U_{\text{оп}}(N + 1) + U_B l_B), III \\ 1 - (U_{OLT}^2 + U_{\text{сп}}^2 N + U_{ONU} + U_{\text{оп}}(N + 1) + U_B^2 l_{\phi} + U_B(l_B - l_{\phi})), IV \\ 1 - (U_{OLT}^2 + U_{\text{сп}}^2 N + U_{ONU} + U_{\text{оп}}(N + 1) + U_B^2(l_{\phi} + \sum_{k=1}^{N-1} l_k) + U_B(l_B - l_{\phi} - \sum_{k=1}^{N-1} l_k)), V \\ 1 - (U_{OLT}^2 + U_{\text{сп}}^2 N + U_{ONU}^2 + U_{\text{оп}}(N + 2) + U_B^2 l_B), VI \end{cases} \quad (13)$$

$$C_{\text{общ}} = \begin{cases} 2C_{OLT} + 2NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + 2C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), I \\ 3C_{OLT} + 2NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + C_{\text{оп}} + 2C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), II \\ 3C_{OLT} + 3NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + 2C_{\text{оп}}(N + 1) + 2C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), III \\ 3C_{OLT} + 3NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + 2C_{\text{оп}}(N + 1) + C_B l_{\phi} + 2C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), IV \\ 3C_{OLT} + 3NC_{\text{сп}} + 2MC_{ONU} + 2C_{\text{оп}}(N + 1) + 3C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m) - C_B \sum_{m=1}^{M-1} l_m, V \\ 3C_{OLT} + 3NC_{\text{сп}} + 3MC_{ONU} + 2C_{\text{оп}}(N + M + 1) + 3C_B(l_B + \sum_{m=1}^{M-2} l_m), VI \end{cases}, \quad (14)$$

где I – вариант сети без резерва, II – вариант сети с резервом OLT, III – вариант сети с резервом OLT и сплиттеров, IV – вариант сети с резервом OLT, сплиттеров и фидерного волокна, V – вариант сети с резервом OLT, сплиттеров, фидера и промежуточных волокон, VI – вариант сети с полным резервом.

Функции из (13) и (14) линейные, что позволяет применить аппарат линейного программирования для решения общей задачи оптимизации [1, 4].

Рассматривая сети доступа с позиции FTTH (Fiber-To-The-Home – волокно до квартир / офисов), можно допустить количественную потребность в подключении к сети LR-PON из расчета один сплиттер на один дом (в LR-PON к одному сплиттеру можно подключать до 256 ONU), ведутся разработки сплиттеров для 512 ONU [6]). Тогда длина распределительного участка  $l_m$  будет достигать сотен метров. Для местности с низкой плотностью населения (например, сельская местность) один сплиттер может обеспечить доступ к инфокоммуникационным услугам всем жителям. Длина распределительного участка в этом случае может достигать  $l_m \approx 3$  км. Точные данные длины участков могут быть получены только при проектировании конкретных объектов. В рамках этой статьи примем среднюю длину  $l_m \approx 1$  км.

Будет рассчитывать  $l_B$  от 10 км до 100 км, с шагом в 10 км. При расчетах необходимо учитывать, что сплиттеры устанавливаются по мере увеличения радиуса сети – один сплиттер на  $100/17 \approx 5-6$  км. Длину промежуточного участка примем  $l_k = 5$  км. Длину фидерного участка  $l_{\phi}$  примем равной 15 км (для первого и второго случаев, когда  $l_{B1} = 10$  и  $l_{B2} = 20$ , примем  $l_{\phi1} = 9$  км и  $l_{\phi2} = 10$  км соответственно).

Числовые данные по надежности и стоимости компонентов LR-PON возьмем из [5] (табл. 1).



Таблица 1

**Надежность и стоимость компонентов LR-PON**

Компонент сети	Стоимость, долл.	Вероятность отказа
OLT	650	$5,12 \cdot 10^{-7}$
ONU	450	$5,12 \cdot 10^{-7}$
сплиттер	650	$10^{-7}$
оптический переключатель	100	$4 \cdot 10^{-7}$
оптический кабель (1 км)	2,5	$3,42 \cdot 10^{-6}$

Проведем расчеты по (12) и (13), изменяя длину  $l_B$ . Результаты поместим в табл. 2.

Таблица 2

**Надежность и стоимость в зависимости от радиуса LR-PON**

BP сетей	Длина волокна $l_B$ , км									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Надежность										
I	0,996478	0,993057	0,989637	0,986217	0,982797	0,979377	0,975957	0,972536	0,969116	0,965696
II	0,996528	0,993109	0,989688	0,986268	0,982848	0,979428	0,976008	0,972587	0,969167	0,965747
III	0,996528	0,993108	0,989688	0,986267	0,982846	0,979426	0,976005	0,972585	0,969164	0,965743
IV	0,999605	0,996527	0,994816	0,991395	0,987975	0,984554	0,981133	0,977713	0,974292	0,970872
V	0,999605	0,998236	0,998235	0,998233	0,998231	0,998229	0,998228	0,998226	0,998224	0,998222
VI	0,999998	0,999996	0,999995	0,999993	0,999991	0,99999	0,999988	0,999986	0,999984	0,999983
Стоимость, долл.										
I	234320	235670	237020	239670	242320	244970	247620	250270	252920	255570
II	235070	236420	237770	240420	243070	245720	248370	251020	253670	256320
III	235370	236920	238470	241520	244570	247620	250670	253720	256770	259820
IV	236042,5	238245	240457,5	244807,5	249157,5	253507,5	257857,5	262207,5	266557,5	270907,5
V	236042,5	238267,5	240492,5	244867,5	249242,5	253617,5	257992,5	262367,5	266742,5	271117,5
VI	403080	405305	407530	411905	416280	420655	425030	429405	433780	438155

Проведем анализ рассчитанных схем по соотношению цена/качество (приведенных к сотням тысяч долларов). Результаты соотношений поместим в табл. 3.

Можно рассчитать изменение показателя «цена/качество» в зависимости от радиуса сети  $\Delta_{\text{в}}(C_{\text{общ}}/A_{\text{общ}})$  – табл. 4, а также в зависимости от варианта резервирования (BP),  $\Delta_{\text{BP}}(C_{\text{общ}}/A_{\text{общ}})$  – табл. 5.

Таблица 3

**Отношение цена/качество ( $C_{\text{общ}}/A_{\text{общ}}$ ), долл. в зависимости от радиуса LR-PON**

BP сетей	Длина волокна $l_B$ , км									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I	2,351	2,373	2,395	2,430	2,466	2,501	2,537	2,573	2,610	2,646
II	2,359	2,381	2,402	2,438	2,473	2,509	2,545	2,581	2,617	2,654
III	2,362	2,386	2,410	2,449	2,488	2,528	2,568	2,609	2,649	2,690
IV	2,361	2,391	2,417	2,469	2,522	2,575	2,628	2,682	2,736	2,790
V	2,361	2,387	2,409	2,453	2,497	2,541	2,585	2,628	2,672	2,716
VI	4,031	4,053	4,075	4,119	4,163	4,207	4,250	4,294	4,338	4,382



Таблица 4

Изменение показателя цена/качество в зависимости от радиуса LR-PON –  $\Delta_{ie}$   
( $C_{общ}/A_{общ}$ ), долл.

ВР сетей	Длина волокна $l_B$ , км									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I		<b>0,022</b>	<b>0,022</b>	0,035	0,035	0,036	0,036	0,036	0,036	0,037
II		<b>0,022</b>	<b>0,022</b>	0,035	0,035	0,036	0,036	0,036	0,036	0,037
III		0,024	0,024	0,039	0,040	0,040	0,040	0,040	0,041	0,041
IV		0,029	0,026	0,052	0,053	0,053	0,053	0,054	0,054	0,054
V		0,026	<b>0,022</b>	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044
VI		<b>0,022</b>	<b>0,022</b>	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044

Таблица 5

Изменение показателя цена/качество в зависимости от варианта резервирования LR-PON –  $\Delta_{ВР}(C_{общ}/A_{общ})$ , долл.

ВР сетей	Длина волокна $l_B$ , км									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I										
II	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
III	0,003	0,005	0,007	0,011	0,015	0,019	0,024	0,028	0,032	0,036
IV	–	0,005	0,008	0,020	0,034	0,047	0,060	0,073	0,087	0,100
V	<b>0,000</b>	–	–	–	–	–	–	<b>-0,054</b>	–	–
VI	1,669	1,666	1,666	1,666	1,666	1,666	1,666	1,666	1,666	1,666

### Заключение

В современных условиях развития инфокоммуникаций отдельные пользователи предъявляют к сети доступа требования по надежности  $A_{общ} = 0,99999$ . Как видно из табл. 2, выполнение данных требований можно обеспечить только при полном резервировании LR-PON и только для сети с максимальным радиусом развертывания до 80 км.

Исходя из данных табл. 4, развертывание сети LR-PON оптимально в радиусе до 30 км для большинства вариантов резервирования. Как для различных радиусов сети (табл. 4), так и с различными вариантами резервирования самыми неблагоприятными сценариями развертывания LR-PON по критериям стоимости и надежности являются вариант с резервированием OLT, сплиттеров и фидерного волокна (вариант IV), а также полное резервирование (вариант VI). Оптимальным сценарием с позиции резервирования представляется вариант с резервированием OLT, сплиттеров, фидера и промежуточных волокон (вариант V).

Математический аппарат, использованный в статье, по мнению автора, позволяет оценить по нескольким критериям эффективность строительства пассивных оптических сетей большой дальности.

Статья поступила 17.02.2016 г.

### Библиографический список

1. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах: учеб. пособие для студентов эконом. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1986. 317 с.
2. Громов Ю.Ю., Иванова О.Г., Мосягина Н.Г., Набатов К.А. Надежность информационных систем: учеб. пособие. Тамбов, 2010. 160 с.
3. Игнатов А.В. Энергетические условия развертывания LR-PON // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2015. С. 147–149.
4. Теория математического программирования. Однокритериальная оптимизация. Необходимые и достаточные условия для локальных экстремумов гладких функций. [Электронный ресурс]. URL: <http://add.coolreferat.com>. (13.01.2016).



5. Kantarci B., Mouftah H.T, Availability and Cost-Constrained Long-Reach Passive Optical Network Planning / IEEE Transactions on Reliability, vol. 61, no. 1, march 2012, pp. 113–124.
6. Song. B.H. Long-Reach Passive Optical Networks. Dissertation Submitted in partial satisfaction of the requirement for the degree of doctor of philosophy. University Of California, Davis. 2009, 109 p.

#### References

1. Akulich I.L. *Matematicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh* [Mathematical programming in examples and problems]. Moscow, 1986, 317 p.
2. Gromov Iu.Iu., Ivanova O.G., Mosiagina N.G., Nabatov K.A. *Nadezhnost' informatsionnykh sistem* [Information system reliability]. Tambov, 2010. 160 p.
3. Ignatov A.V. Energeticheskie usloviya razvertyvaniya LR-PON [Energy conditions of LR-PON deployment]. *Materialy Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi kon "Sovremennye problemy telekommunikatsii"* [Materials of Russian scientific and technical conference], Novosibirsk, 2015, pp. 147–149.
4. *Teoriya matematicheskogo programmirovaniya. Odnokriterial'naya optimizatsiya. Neobkhodimye i dostatochnye usloviya dlia lokal'nykh ekstremumov gladkikh funktsii* [Theory of mathematical programming. One-criterion optimization. Required and sufficient conditions for smooth function local extrema]. Available at: <http://add.coolreferat.com>. (Accessed 13 January 2016).
5. Kantarci B., Mouftah H.T, Availability and Cost-Constrained Long-Reach Passive Optical Network Planning / IEEE Transactions on Reliability, vol. 61, no. 1, March 2012, pp. 113–124.
6. Song. B.H. Long-Reach Passive Optical Networks. Dissertation Submitted in partial satisfaction of the requirement for the degree of doctor of philosophy. University Of California, Davis. 2009, 109 p.

УДК 658.135.073

DOI: 10.21285/1814-3520-2016-4-96-101

## ПОСТРОЕНИЕ ГРАФА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВЗИМАНИЯ ПЛАТЫ С БОЛЬШЕГРУЗНОГО ТРАНСПОРТА

© Н.С. Кулик<sup>1</sup>, В.И. Мартьянов<sup>2</sup>, Д.В. Пахомов<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Рассмотрены основные принципы построения графа автомобильных дорог. Выделены основополагающие требования к графу автомобильных дорог для системы взимания платы с большегрузного транспорта «Платон». Описана возможность использования измерений передвижной видеолaborатории для построения графа автомобильных дорог. Исследован вопрос сопряжения графа автомобильных дорог федерального значения с графом автомобильных дорог регионального и межмуниципального значения Иркутской области. Проанализированы основные свойства интеллектуальных транспортных систем (ИТС).

*Ключевые слова:* дорожный граф; ребро; узел; передвижная видеолaborатория.

### BUILDING A MOTORWAY GRAPH FOR THE HEAVY TRUCKS TOLLING SYSTEM

N.S.Kulik, V.I. Martyanov, D.V. Pakhomov

Irkutsk National Research Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia.

The basic principles of building a motorway graph are considered. Fundamental requirements to the motorway graph for "Platon" system of tolling heavy truck transport are identified. The possibility to use the measurements of a mobile video laboratory for building the motorway graph are described. The question of correlation of the graph of motorways of federal importance and the graph of roads of regional and intermunicipal importance of the Irkutsk region is considered. Analysis is also given to the main properties of intelligent transport systems (ITS).

*Keywords:* motorway graph; edge; node; mobile video laboratory

<sup>1</sup>Кулик Никита Сергеевич, аспирант, e-mail: ad@istu.edu

Kulik Nikita, Postgraduate, e-mail: ad@istu.edu

<sup>2</sup>Мартьянов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры автомобильных дорог, e-mail: ad@istu.edu

Martyanov Vladimir, Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor of the Department of Automobile Roads, e-mail: ad@istu.edu

<sup>3</sup>Пахомов Дмитрий Вячеславович, программист, e-mail: ad@istu.edu

Pakhomov Dmitriy, Programmer, e-mail: ad@istu.edu