

# КРИТЕРИИ НАДЕЖНОСТИ ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

DOI 10.24411/2072-8735-2018-10085

**Постников Иван Николаевич,**  
Сибирский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики,  
г. Новосибирск, Россия,  
[pstivanprime@gmail.com](mailto:pstivanprime@gmail.com)

**Ключевые слова:** надежность,  
интенсивность отказов,  
пассивные оптические сети,  
SDN, FI, LR-PON.

Рассматривается один из возможных путей модернизации существующих сетей доступа – переход к LR-PON (Long Reach Passive Optical Network). Отличительной чертой является рассмотрение такой сети под управлением технологии SDN, в этом случае управление трафиком участка сети сосредоточено в выделенном устройстве – SDN-контроллере.

Целью работы является рассмотрение критериев оценки надежности сети с учетом экономических факторов, оценка влияния использования технологии SDN на общую надежность сети, а также рассмотрение факторов влияющих на восприятие клиентами отказов. Основной упор в исследовании характеристик надежности сделан на "влиянии отказа" – FI (Failure Impact). Этот параметр позволяет провести объективный анализ того, как отказ на сети повлияет на отток клиентов в зависимости от количества затронутых отказом объектов, вероятности отказа, а также психологических факторов, воздействующих на клиентов. Вычисление FI производилось при различных конфигурациях SDN-контроллера. Были получены значения FI для варианта сети LR-PON, в Новосибирской области. Вычисления проводились для различных значений коэффициента  $\alpha$ , характеризующего иррациональность среды. Совокупное значение FI было вычислено с учетом наличия контроллера SDN. В последнем разделе представлены пути модернизации показателя FI.

Руководствуясь полученными результатами можно сформулировать следующие положения:

– Резервирование важных участков сети позволяет уменьшить FI на порядок, даже при низкой надежности SDN-контроллеров. SDN-контроллер сети в значительной мере влияет на общий показатель FI совокупной сети.

Поскольку аппаратное резервирование контроллера значительно повышает надежность сети, то заметное влияние оказывается также и на совокупный показатель FI.

– Время восстановления контроллера заметно влияет на FI сети, поэтому важным условием является поддержание работоспособности SDN-контроллера и оптимизация времени восстановления на реальной сети

– При определении FI следует учитывать такие факторы как соотношение стоимости услуг связи операторов, соотношение скоростей передачи данных у операторов, затраты на смену оператора, раскрученность бренда оператора.

#### Для цитирования:

Постников И.Н. Критерии надежности пассивных оптических сетей нового поколения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Том 12. №5. С. 41-46.

#### For citation:

Postnikov I.N. (2018). Criteria of new generation passive optical networks reliability. *T-Comm*, vol. 12, no.5, pp. 41-46. (in Russian)

## 1. Структурная схема сети LR-PON

Структура сети LR-PON в отличие от классических пассивных оптических сетей предполагает обход сети агрегации. Благодаря перекрытию больших расстояний, узлы сети доступа подключаются непосредственно к ядру сети. LR-PON позволяет использовать оптическую инфраструктуру как можно ближе к клиенту с помощью простых пассивных сплиттеров. Пассивные сплиттеры не потребляют энергию и отличаются высокой надежностью. LR-PON использует оптическое усиление для поддержки большего суммарного разделения (порядка 500-1000) и более длинного охвата (с обслуживанием более 100 км). Более высокий порядок разделения сигнала обеспечивается несколькими ступенями разделения оптического сигнала, что позволяет увеличить степень совместного использования инфраструктуры и минимизировать затраты на клиента. Подходящее место для точки разделения (DP), оптического сплиттера 3-й ступени, находится рядом с местонахождением клиентов. Первичный кросс-коннектор (PSP), называемый оптическим сплиттером 2-й ступени или располагается в шкафу, как правило, менее 1 км от клиентов, или в центральном офисе, где находятся оптические усилители, так как этот узел имеет электроэнергию.

Для централизованного управления передачей данных в сети и предоставления абонентских услуг в [1] предлагается управление передачей трафика посредством технологии SDN, то есть используется контроллер SDN и сетевые устройства, управляемые посредством протокола OpenFlow. Использование технологии SDN возможно как в ядре сети, так и на сети доступа. Такой вариант предполагает глубокую модернизацию ядра сети.

На этапе внедрения сетей LR-PON в инфраструктуру крупных операторов связи в рамках данной работы предлагается использовать следующую структурную схему сети (рис. 1). Здесь контроллеры SDN используются только на узлах доступа. Это позволит ускорить применение технологии и запускать пилотные проекты без необходимости модернизации ядра сети.

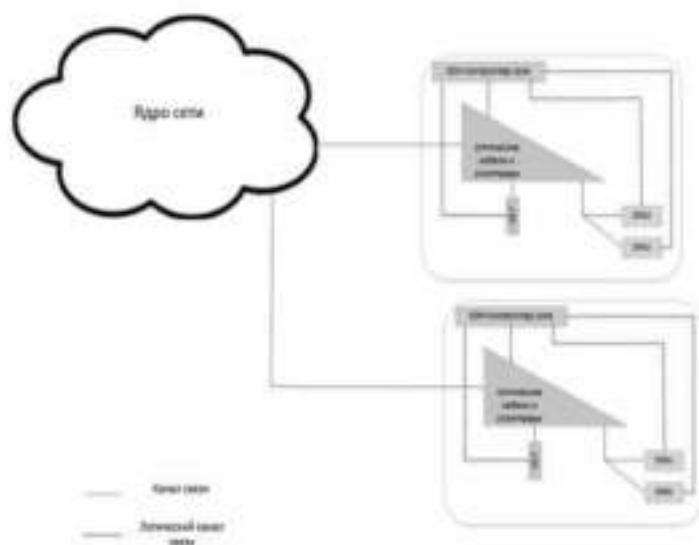


Рис. 1. Структура сети LR-PON с использованием SDN на сети доступа

## 2. Параметры, характеризующие надежность сети доступа

Одной из задач, обусловленных увеличением расстояния, перекрываемого сетью доступа до 100 и более километров, является задача обеспечения требуемых показателей надежности.

В [2] предложены следующие критерии оценки надежности сети LR-PON:

– Степень защиты. Степень защиты вычисляется как процент дублированных элементов архитектуры. Если все элементы дублированы, то степень защиты сети 100%.

– Готовность компонентов и соединения. Асимптотическая готовность определяется как вероятность того, что компонент работоспособен в произвольный момент времени и может быть выражена как:

$$A = 1 - \frac{MTTR}{MTBF}, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент готовности,  $MTTR$  – среднее время восстановления,  $MTBF$  – среднее время между отказами.

Готовность соединения означает вероятность того, что логическое соединение (например, между OLT и ONU) является работоспособным. Желаемое значение коэффициента готовности задается обслуживаемыми клиентами и может быть прописано в договоре. Поскольку сети агрегирования имеют коэффициент готовности «четыре девятки» [4], будем считать, что это значение достаточно и для сетей LR-PON.

*С. Влияние отказа (Failure Impact, FI)*

В [5, 6] рассматривают влияние отказа (FI) применительно к рациональной и иррациональной среде. В последнем случае оператор сети более беспокоится об отказе, отключающем одновременно множество клиентов в течение одного часа (отрицательные публикации в прессе, в газетах, на телевидении, что ведет к плохой рекламе), чем о нескольких мелких отказах в течение всего года, отключающих по очереди каждого клиента в среднем на 1 час. Влияние отказа в рациональной среде [7] пропорционально числу клиентов, отключенных отказом,  $N$ , и коэффициенту простоя  $U$  т.е.:

$$FI = N * U \quad (2)$$

Для моделирования влияния отказов в иррациональной среде предполагается, что все отказы статистически независимы, а также все отказы имеют два состояния: соединение полностью отключено и соединение работоспособно, промежуточные ситуации не рассматриваются. FI в иррациональном окружении определяется выражением:

$$FI = N^{\alpha} * U, \quad (3)$$

где  $\alpha > 1$  (с увеличением  $\alpha$  увеличивается и иррациональность), если  $\alpha = 1$ , то ситуация рациональна. Параметр  $\alpha$  означает «иррациональность» в поведении потребителей услуг связи. Он не может быть определен аналитическими интерпретациями. Для определения  $\alpha$  могут быть использованы психологические атрибуты поведения потребителей услуг оператора. В случае различных несовместных событий влияние этих событий может быть суммировано. В обобщенном виде влияние отказа может быть представлено как  $FI = f(N) * N$  и если  $\alpha = 1$ , то  $f(N) = N$ .

*2.1. Влияние комбинации ошибок:*

Допустим, есть два события  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  с коэффициентами простоя  $U_1$  и  $U_2$  и количеством затронутых клиентов  $N_{12}$  и  $N_{25}$ , соответственно, когда события происходят отдельно.

Количество затронутых клиентов равно  $N_p$ , когда два события происходят одновременно. Влияние отказов при их раздельном возникновении обозначается как  $FI_1$  и  $FI_2$ :

$$FI_1 = N_{1c}^* \cdot U_1 \cdot (1 - U_2) \quad (4)$$

$$FI_2 = N_{2c}^* \cdot U_2 \cdot (1 - U_1) \quad (5)$$

Если они происходят одновременно, то  $FI$ :

$$FI_3 = N_p^* \cdot U_1 \cdot U_2 \quad (6)$$

Общее значение  $FI$  можно найти по формуле:

$$FI_{\text{total}} = N_{1c}^* \cdot U_1 \cdot (1 - U_2) + N_{2c}^* \cdot U_2 \cdot (1 - U_1) + N_p^* \cdot U_1 \cdot U_2 \quad (7)$$

При допущении, что произведение  $U_1$  и  $U_2$  примерно равно нулю и  $(1 - U) \approx 1$  общее значение  $FI$  равно:

$$FI_{\text{total}} \approx N_{1c}^* \cdot U_1 + N_{2c}^* \cdot U_2 = FI_1 + FI_2 \quad (8)$$

Рассмотрим конкретные примеры. Пусть имеются две линии связи с коэффициентами простоя  $U_1$  и  $U_2$ , защищающие  $N$  клиентов. В этом случае ни один клиент не пострадает от одного отказа. Таким образом, уравнение (7) может быть переписано в виде:

$$FI_{\text{total}} = N^* \cdot U_1 \cdot U_2 \quad (9)$$

Рассмотрим теперь два последовательных канала с коэффициентом простоя  $U_1$  и  $U_2$  и некоторое количество клиентов, подключенных к каждому каналу, соответственно  $N_1$  и  $N_2$ . Для простоты снова предположим, что  $N_1 = N_2 = N$ .

В случае последовательного соединения  $N_{1c} = N_{2c} = N_p = N$ .

Таким образом, уравнение (7) сводится к:

$$FI_{\text{total}} = N^* \cdot (U_1 + U_2 - U_1 \cdot U_2) \quad (10)$$

Представленные выше формулы используются для расчета суммарного значения  $FI$  для участка сети LR-PON.

#### Д. Затраты

Основным стимулом для повышения отказоустойчивости для сетевых операторов являются огромные затраты, которые они несут в виде штрафов за потерю обслуживания в случае отказа. Повышение отказоустойчивости снижает эти затраты, которые являются частью эксплуатационных затрат сети. Однако при этом увеличиваются другие компоненты затрат, например, затраты на резервирование сетевого оборудования, инфраструктуру и т.д.

Оптимальная отказоустойчивая схема – это схема, которая минимизирует совокупную стоимость владения сетью. Рассматриваются две составляющие затрат: капитальные затраты (CAPEX) и эксплуатационные расходы (OPEX). Капитальные затраты включают затраты на следующее:

- Сетевое оборудование – это затраты на пассивное или активное оборудование, такое как OLT, ONU, AWG и PS.

- Установку оборудования – это затраты, необходимые для установки сетевого оборудования, которые зависят от числа техников, времени установки и времени поездки. Отметим, что эта составляющая затрат не будет отличаться для защищенного или незащищенного случая, и поэтому не учитывается.

- Сетевую инфраструктуру – это затраты на прокладку оптоволоконных кабелей (включают в себя затраты на прокладку траншей, прокладку кабелей, сращивание и т. д.).

Эксплуатационные затраты – это затраты, связанные с обслуживанием сети, и они зависят от рабочего горизонта ( $T_r$ ), то есть периода времени, в течение которого сеть функционирует. OPEX включает в себя расходы, связанные с восстановлением связи после отказов, потреблением элек-

троэнергии, используемыми площадями и штрафами, выплачиваемыми пользователями в случае отказа. Отметим, что за исключением штрафных расходов все остальные расходы могут возрасти с использованием резервирования.

#### 2.2. Пример участка сети LR-PON в НСО

На рисунке 2 приведено изображение карты Новосибирска с близлежащими населенными пунктами. На карте для примера взят участок в центре города, где находится центральный узел сети с OLT, далее участок протяженностью более 50 км, для организации доступа абонентам по технологии LR-PON в населенном пункте Искитим. На протяжении всего участка сети отсутствует активное оборудование.

Для представленной на рисунке схемы представляет интерес оценить влияние коэффициента  $\alpha$  на совокупное значение  $FI$ .

Как следует из (7) совокупное значение  $FI$  равно сумме  $FI$  отдельно взятых участков сети. Расчет  $FI$  произведем для случая отсутствия резервирования линий связи и ONU, а также при резервировании ONU для юридических лиц и резервировании кабеля, расположенного в черте города. Для расчетов примем, что доля юридических лиц составляет 15%, общее количество абонентов 1000. Полагаем, что к одному терминалу ONU подключен один абонент. Для удобства расчетов далее предполагаем, что значения  $\alpha$  равны для физических и юридических лиц. Однако, на практике разные категории абонентов будут с разной остротой реагировать на перемены связи.

Общая протяженность магистрального оптического кабеля 52 км, из них 22 км проложено за городом. Все абоненты подключены к сплиттеру на 1024 абонента.

В таблице 1 представлены числовые значения, которые будут использоваться в расчетах. Значения коэффициентов готовности для кабеля и оборудования сети взяты из [3].

Таблица 1

Числовые характеристики для расчетов

Элемент сети	$K_f (A)$	$K_{f(U)}$
OLT с двумя блоками питания	0,9999973	0,0000027
ОК в черте города, 1 км	0,9999429	0,0000571
ОК в черте города, 30 км	0,9982884	0,0017116
ОК вне города, 1 км	0,9999886	0,0000114
ОК вне города, 22 км	0,9997493	0,0002508
Сплиттер	0,9999993	0,0000007
ONU	0,9999806	0,0000194

В таблице 2 представлены результаты расчетов  $FI$  без резервирования и с резервированием магистрального оптического кабеля и ONU для юридических лиц.

На рисунке 3 построена зависимость  $FI$  от  $\alpha$  в логарифмическом масштабе. Из рисунка видно, что резервирование важных участков сети позволяет уменьшить  $FI$  вплоть до порядка. Это означает, что общее влияние на сеть отдельно взятого отказа значительно снижается.

Отдельного рассмотрения заслуживает оценка значений  $\alpha$  на практике, что требует долгосрочного сбора статистики отказов, количества новых абонентов, абонентов разорвавших договор, выплат за неказание услуг надлежащего качества.



Рис. 2. Фрагмент Карты НСО с элементами рассматриваемой сети

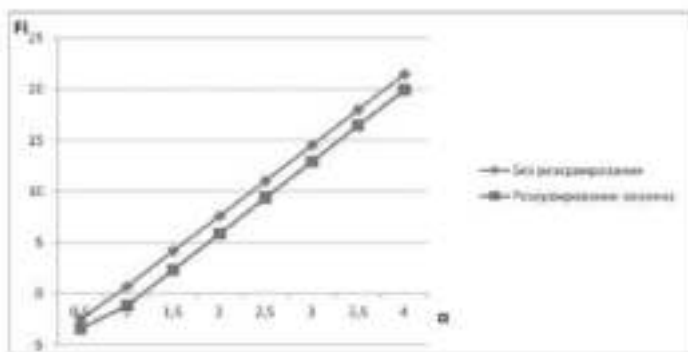


Рис. 3. Зависимость FI от  $\alpha$  в логарифмическом масштабе

Таблица 2

Полученные значения FI

$\alpha$	FI, без резервирования	FI, с резервированием ОК	ln(FI), без резервирования	ln(FI), с резервированием ОК
0,5	0,081573	0,03104	-2,50625	-3,47249
1	1,9852	0,318009	0,68572	-1,14568
1,5	62,17697	10,04196	4,129985	2,306772
2	1965,469	339,6133	7,583486	5,827808
2,5	62149,76	11511,52	11,0373	9,351103
3	1965275	390263,5	14,49114	12,87458
3,5	62145831	13231835	17,94499	16,39814
4	1970000000	449000000	21,40130	19,92253

Даже при увеличении  $\alpha$  с 1 до 1,5 FI увеличивается более, чем на порядок. Отсюда на практике одной из первостепенных задач операторов связи является стремление в срок устранить отказы элементов сети. Это позволит избежать лавинообразного роста убытков из-за ухода абонентов к конкурентам и недовольства абонентов, что важно в условиях жесткой конкуренции операторов связи.

3. Оценка FI сети LR-PON с SDN контроллером

Используя результаты расчетов коэффициента готовности для SDN-контроллера из [9], были произведены расчеты совокупных значений FI сети LR PON из предыдущего пункта в случае, когда управление сетью осуществляется посредством контроллера SDN. В таблице 3 приведены результаты расчетов значений FI для различных вариантов резервирования контроллера SDN и оптического кабеля. Обозначения, использованные в таблице:

- «ОК +/-» – резервирование или отсутствие резервирования ОК;
- «Резервирование SDN +/-» – резервирование или отсутствие резервирования SDN контроллера;
- $1/\mu 1$  – величина, обратная интенсивности восстановления контроллера SDN при использовании одного сервера [9]

Таблица 3

Полученные значения FI

$\alpha$	Резервирование: SDN – ОК –	SDN + $1/\mu 1=0,5$ с ОК –	SDN + $1/\mu 1=12$ с ОК –	SDN + $1/\mu 1=24$ с ОК –
1	5,9852	2,2852	8,9852	15,9852
1,5	188,6681	71,66380298	283,5364062	504,8958424
2	5965,469	2265,469	8965,469	15965,469
2,5	188640,9	71636,59298	283509,1962	504868,6324
3	5965275	2265275	8965275	15965275
3,5	189000000	71632663,98	283505267,2	504864703,4
4	5970000000	2270000000	8970000000	15970000000
$\alpha$	Резервирование: SDN – ОК +	SDN + $1/\mu 1=0,5$ с ОК +	SDN + $1/\mu 1=12$ с ОК +	SDN + $1/\mu 1=24$ с ОК +
1	4,318009	0,618009	7,318009	14,31801
1,5	136,5331	19,52879	231,4014	452,7608
2	4339,613	639,6133	7339,613	14339,61
2,5	138002,6	20998,35	232871	454230,4
3	4390264	690263,5	7390264	14390264
3,5	140000000	22718668	235000000	456000000
4	4450000000	749000000	7450000000	14400000000

Как видно из таблицы 3, общее значение FI заметно не изменяется при изменении времени восстановления контроллера SDN [9]. Возможно сделать следующие выводы:

При низкой надежности SDN-контроллеров именно FI SDN-контроллера сети в значительной мере влияет на общий показатель FI совокупной сети.

Отсюда, поскольку аппаратное резервирование контроллера значительно повышает надежность сети, то заметное влияние оказывается также и на совокупный показатель FI.

Время восстановления контроллера с увеличением заметно влияет на FI сети, поэтому важным условием является поддержание работоспособности SDN-контроллера и оптимизация времени восстановления на реальной сети.

В [8] в ходе обсуждения с европейскими операторами связи было принято, что при  $\alpha = 1$  значения FI не должно превышать 0,1. Даже при расчетах FI без учета надежности контроллера SDN результат не удовлетворяет этим заданным требованиям. Однако, задача оценки необходимых значений FI требует отдельного рассмотрения и задачей расчетов в данной работе было в первую очередь сравнение и оценка влияния различных факторов на совокупное значение FI.

#### 4. Модернизация методики вычисления FI

В [2] предложено влияние отказа в иррациональном окружении вычислять по формуле (3). Однако, не рассматриваются факторы, определяющие меру иррациональности  $\alpha$ .

К таким факторам можно отнести:

– Соотношение стоимости услуг связи ( $C$ ) с ценами конкурентов. Например, если цена на услуги у конкурентов ниже, то это увеличит FI для клиента.

– Соотношение скорости передачи данных ( $B$ ) со скоростями конкурентов. Если оператор предоставляет самую высокую скорость, то это уменьшит FI.

– Затраты на смену оператора ( $X$ ). Например, если смена оператора влечет за собой смену технологии доступа и, соответственно, покупку нового оборудования.

– «Раскрученность» бренда оператора ( $M$ ). Данную величину сложнее всего оценить объективно, основная идея состоит в том, что при сильной приверженности бренду лишь более сильные последствия отказа подтолкнут клиента на смену оператора или наложения штрафных санкций на оператора.

Помимо этого, в [2] не приводятся причины выбора экспоненциальной зависимости FI от  $\alpha$ .

Применение подобных вычислений теряет смысл из-за слишком быстрого изменения значений FI с ростом  $\alpha$ . На основании вышесказанного представим выражение для FI в виде:

$$FI = N * U * \alpha(C, B, X, M) \quad (11)$$

Принимая во внимание соотношения стоимости услуг связи и скорости передачи данных, получим следующую формулу:

$$FI = N * U * \frac{1}{M} * \frac{1}{X} * \frac{C}{C_2} * \frac{B_2}{B}, \quad (12)$$

где индексом «2» обозначаются значения показателей конкурента.

Считаем, что на рынке, где более одного конкурента сравнение производится с самым «выгодным» по сравниваемой характеристике, например, с конкурентом, предоставляющим самую высокую скорость или с конкурентом с самой низкой ценой.

Сравнение значений цены и скорости передачи данных следует считать независимыми друг от друга, т.е. возможны

случаи, когда по разным параметрам происходит сравнение с разными операторами.

Отдельного рассмотрения заслуживает случай отсутствия конкуренции, тогда получаем:

$$FI = N * U * \frac{1}{M} \quad (13)$$

Таким образом, предполагаемый подход позволит более объективно подходить к вычислению FI.

Однако, по-прежнему возникают трудности с объективной оценкой психологических составляющих FI, например, связанных с маркетингом. Этот аспект требует дальнейшего исследования

#### Литература

1. M. Ruffini, L. Wosinska, M. Achouche, J. Chen, N. Doran, F. Farjady, J. Montalvo, P. Ossieur, B. O'Sullivan, N. Parsons, T. Pfeiffer, X. Qiu, C. Raack, H. Rohde, M. Schiano, P. Townsend, R. Weissaly, X. Yin, D. Payne. DISCUS: An End-to-End Solution for Ubiquitous Broadband Optical Access // IEEE communications magazine, feb 2014.
2. A. Dixit, M. Mahloo, B. Lannoo, J. Chen, L. Wosinska, D. Colle, M. Pickavet. Protection strategies for Next Generation. Passive Optical Networks -2 / IEEE Conference Location, 2014.
3. OASE Project, D4.2.1: Technical assessment and comparison of next-generation optical access system concepts, oct. 2011. <http://cordis.europa.eu/docs/projects/enect/5/249025/080/deliverables/01-OASED421WP4UESsex31Oct2011V10.pdf>.
4. M. Vogt, R. Martens, T. Anilvaag. Availability modeling of services in IP networks. DRCN, Banff, Canada, oct. 2003.
1. A. Dixit, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester. Trade off between End-to-End Reliable and Cost-Effective TDMA/WDM Passive Optical Networks. Proc. RNDM, 2012.
2. J. Kim, S. Yen, S. Fu, L. G. Kazovsky. Resilient optical access networks: optimization on the number of spikes in the StarRing. Workshop on Photonic Technologies for Access and Bio-Photonics, jan. 2011.
3. M. Mahloo, A. Dixit, J. Chen, C. M. Machuca, B. Lannoo, D. Colle, L. Wosinska. Towards Reliable Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks // IEEE Commun. Mag., feb. 2014.
4. Постников И.И. Увеличение протяженности сети доступа за счет использования технологии Long Reach PON // Молодой ученый. №19, 2017.
5. Постников И.И. Моделирование влияния периодического контроля сети SDN на характеристики надежности // Телекоммуникации. №7, 2017.

## CRITERIA OF NEW GENERATION PASSIVE OPTICAL NETWORKS RELIABILITY

Ivan N. Postnikov, Siberian State University of Telecommunications and Informatic Science  
 PDH Student, Novosibirsk, Russia, [pstivanprime@gmail.com](mailto:pstivanprime@gmail.com)

**Abstract**

The article considers one of the possible ways of upgrading existing access networks – LR-PON. A distinctive feature is the consideration of such a network, which is managed by means of SDN technology, i.e. when network traffic management is concentrated in the dedicated device – SDN-controller. The purpose of the work is to consider the criteria that can be used for the reliability of a network estimation, taking into account the economic factor, the impact of using SDN technology on the overall reliability of the network, and considering factors affecting the perception of failure on the network by the customers of the telecommunications operator. The main emphasis in the study of reliability characteristics is made on the "failure impact" (FI), this parameter allows an objective comparison of how the failure on the network will affect the operator in one or another case depending on the number of affected objects, the probability of failure, as well as psychological factors, affecting customers. The FI calculation was performed for various configurations of the SDN controller.

As results, FI values were obtained for the example of the LR-PON network developed for Novosibirsk District. The calculations were carried out for various values of the coefficient  $\alpha$ , which characterizes the irrationality of the surrounding. Next, an SDN controller was added to the review, which allowed us to compute the aggregate value of FI. In the last section, ways to optimize and improve FI calculations were formulated to improve comparison of communication operators.

Based on the obtained results, the following provisions can be emphasized:

- Redundancy of important network sections allows to reduce FI up to order, with low reliability of SDN-controllers during the "run-in" phase of the technology, it is the FI SDN-controller of the network that largely affects the overall FI of the aggregate network. Hence, since the hardware redundancy of the controller significantly improves the reliability of the network, a noticeable effect also appears on the aggregated FI value.
- If the recovery time of the controller has a significant effect on the FI network, an important condition is to maintain SDN controller and optimize the recovery time on a real network.
- For obtaining FI, factors such as the cost of communication services, the data rate, the cost of changing the operator, the strength of the operator's brand.

**Keywords:** reliability; failure intensity; passive optical networks; SDN; FI; LR-PON.

**References**

1. M. Ruffini, L. Wosinska, M. Achouche, J. Chen, N. Doran, F. Farjady, J. Montalvo, P. Ossieur, B. O'Sullivan, N. Parsons, T. Pfeiffer, X. Qiu, C. Raack, H. Rohde, M. Schiano, P. Townsend, R. Wessaly, X. Yin, D. (2014). Payne. DISCUS: An End-to-End Solution for Ubiquitous Broadband Optical Access. *IEEE communications magazine*, feb 2014.
2. A. Dixit, M. Mahloo, B. Lannoo, J. Chen, L. Wosinska, D. Colle, M. Pickavet. (2014). Protection strategies for Next Generation Passive Optical Networks-2. *IEEE Conference Location*, 2014.
3. OASE Project, D4.2.1: Technical assessment and comparison of next-generation optical access system concepts, oct. 2011. <http://cordis.europa.eu/docs/projects/cnect/5/249025/080/deliverables/001-OASED421WP4UESsex31Oct2011V10.pdf>.
4. M. Vogt, R. Martens, T. (2003). Andvaag. Availability modeling of services in IP networks. *DRCN, Banff, Canada, oct. 2003*.
5. A. Dixit, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester. (2012). Trade off between End-to-End Reliable and Cost-Effective TDMA/WDM Passive Optical Networks. *Proc. RNDM*, 2012.
6. J. Kim, S. Yen, S. Fu, L. G. Kazovsky. (2011). Resilient optical access networks: optimization of the number of spikes in the StarRing. *Workshop on Photonic Technologies for Access and Bio-Photonics*, jan. 2011.
7. M. Mahloo, A. Dixit, J. Chen, C. M. Machuca, B. Lannoo, D. Colle, L. Wosinska. (2014). Towards Reliable Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks, *IEEE Commun. Mag.*, feb. 2014.
8. I.N. Postnikov. (2017). Increasing the length of the access network through the use of Long Reach PON technology. *Molodoy ucheniy magazine*. No.19.
9. I.N. Postnikov. (2017). Modeling the effect of periodic monitoring of the SDN network on reliability characteristics. *Telecommunications*. No.7.