

Электронный научный журнал «Век качества» ISSN 2500-1841 <https://www.agequal.ru>

2025, №4 https://www.agequal.ru/pdf/2025/AGE_QUALITY_4_2025.pdf

Ссылка для цитирования этой статьи:

Козиенко Л.В. Автоматизация расчётов параметров пассивной оптической сети ПГС-О с помощью GNU Octave // Электронный научный журнал «Век качества». 2025. №4. С. 303-313. Режим доступа: <https://www.agequal.ru/pdf/2025/425016.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.391

**Автоматизация расчётов параметров пассивной оптической сети
ПГС-О с помощью GNU Octave**

Козиенко Леонид Владимирович,
*кандидат технических наук,
доцент кафедры «Автоматика, телемеханика, связь»,
Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
leo.kozienko@gmail.com*

В работе рассматривается актуальная задача автоматизации расчётов при проектировании пассивных оптических сетей перегонной связи (ПГС-О), предназначенных для организации широкополосного доступа к объектам инфраструктуры железнодорожного транспорта. Предложен комплексный подход, включающий в себя разработку специализированных алгоритмов для решения двух взаимосвязанных задач: автоматизированного подбора коэффициентов деления оптических сплиттеров для построения сбалансированной топологии типа «шина» и точного расчёта энергетического бюджета линии. Методы реализованы в виде скриптов в среде математического моделирования GNU Octave. Алгоритмы позволяют рассчитать уровни сигнала на абонентских терминалах ONT, затухание в оптическом тракте и гарантированный энергетический запас. Результаты работы позволяют существенно сократить время при определении оптимальных параметров элементов системы ПГС-О в процессе проектирования телекоммуникационной сети широкополосного доступа к объектам железнодорожной инфраструктуры.

Ключевые слова: пассивные оптические сети; PON; пассивная сеть доступа; автоматизация проектирования; GNU Octave; оптические сплиттеры; оптический бюджет.

Технология пассивных оптических сетей (Passive Optical Network, PON) широко используется при строительстве сетей доступа в городской и сельской местности различными операторами. Данная технология нашла своё

применение и в ведомственных сетях, в частности, при организации сети перегонной связи по волоконно-оптическому кабелю на объектах инфраструктуры ОАО «РЖД» [1]. Традиционной основой для организации сетевого доступа к объектам, расположенным на перегонах, – устройствам автоматики и телемеханики, а также технологической связи – исторически служили кабели с металлическими жилами. Однако уже в начале 2010-х гг. в ОАО «РЖД» было выявлено, что данная технология исчерпала свой ресурс и обладает рядом фундаментальных недостатков, сдерживающих технологическое развитие компании. При этом попытки модернизации с использованием технологии xDSL, основанной на существующих медножильных кабелях, не решают системных проблем из-за ограниченной полосы пропускания, необходимости установки и обслуживания активного оборудования в точках доступа.

Альтернативой медножильным линиям являются волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). В отличие от магистральных ВОЛС при организации телекоммуникационной инфраструктуры на участке между станциями (перегоне) требуется наличие многочисленных ответвлений от основного кабеля для подключения объектов железнодорожной автоматики и телемеханики, а также устройств технологической связи [2]. Оптимальным решением в таком случае является строительство пассивной сети доступа (ПСД) с топологией типа «шина» и установкой пассивных оптических разветвителей (сплиттеров). Это позволяет от одного станционного терминала (Optical Line Terminal, OLT) обеспечить широкополосный доступ для десятков абонентских узлов (Optical Network Terminal, ONT), расположенных на перегоне.

При проектировании ПСД необходимо выполнить ряд условий, чтобы гарантировать работоспособность сети. Проектировщик должен обеспечить соблюдение энергетического бюджета для каждого абонентского узла с учетом затухания в оптическом волокне, вносимых потерь в сплиттерах, потерь на

механических и сварных соединениях. При этом необходимо оптимально, с минимальными затратами, подобрать конфигурацию и коэффициенты деления сплиттеров для построения шинной топологии, которая гарантирует требуемый уровень сигнала для всех ONT – от ближайших к станции до самых удалённых.

Ручной расчёт параметров такой сети для протяжённых перегонов с десятками объектов является достаточно трудоёмким процессом. Применение средств автоматизации расчётов позволит значительно ускорить процесс проектирования и определения оптимальных параметров сети. При отсутствии специализированного программного обеспечения соответствующие алгоритмы можно реализовать с использованием пакетов, предназначенных для инженерных и математических расчётов, таких как GNU Octave [3]. По своему функционалу GNU Octave похож на пакет MATLAB, однако в отличие от последнего является свободно распространяемым (по модели open source) и может использоваться без ограничений в России. Использование редактора сценариев (скриптов) позволяет реализовать различные алгоритмы автоматизированной обработки и анализа данных.

Задача по определению параметров пассивной сети ПГС-О реализуется в два этапа:

- определение коэффициентов деления оптических сплиттеров;
- расчёт затухания, определение уровней сигнала и энергетического запаса на всех узлах ONT.

Согласно нормативным документам на железнодорожном перегоне должны быть организованы перегонная (ПГС) и аварийно-восстановительная связь. На перегонах средней протяженности (до 10-15 км) предусматриваются ответвления от волоконно-оптического кабеля к стойкам ПГС-О, установленным с интервалом 1-2 км [4]. Таким образом, перегон между станциями делится на участки или сегменты с длиной 1...2 км. Общая протяжённость большинства перегонов на сети железных дорог не превышает 20 км, но встречаются перегоны длиной до 40 км. Соответственно количество

сегментов может варьироваться от 10-15 до 40 и более. Отсюда следует, что при номинальной величине затухания стандартного одномодового оптического волокна $\sim 0,32$ дБ/км для длины волны 1310 нм затухание в оптическом волокне составит 7...14 дБ при стандартном бюджете оптической линии 30 дБ. Однако в технологии PON основным источником потерь является не само оптическое волокно, а оптические сплиттеры, вносимые потери которых могут достигать величины 20 дБ [5].

Таким образом, на первом этапе необходимо подобрать сплиттеры с такими коэффициентами деления, которые обеспечивали бы необходимый энергетический запас на всех узлах ONT проектируемой сети. Такая сеть носит название сбалансированной [6]. Производители оборудования составляют таблицы, с помощью которых можно подобрать необходимое затухание в зависимости от коэффициента деления сплиттера. При этом в рекомендациях МСЭ-Т отсутствуют чёткие указания о том, как следует выбирать коэффициенты деления для построения сбалансированной пассивной оптической сети.

В основе процесса балансировки пассивной оптической сети лежит метод расчёта коэффициентов деления сплиттеров для построения оптических сетей [7], в соответствии с которым коэффициент деления определяется как:

$$D_i = \frac{100}{\sum_n^2 \frac{\Delta s_n \Delta s_i}{10^{(10+\beta)}}}, \quad (1)$$

где D_i – часть отводимой мощности на i -ый порт сплиттера;

i – номер порта оптического делителя;

$\Delta s_n \Delta s_i$ – разница затуханий на первой и второй ветвях сплиттера.

Соответственно формула для расчёта коэффициентов деления сплиттеров с одним входом и двумя выходами будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} D_1 = \frac{100}{\sum_n^2 \frac{\Delta s_2 \Delta s_1}{10^{(10+\beta)}}} \\ D_2 = \frac{100}{\sum_n^2 \frac{\Delta s_1 \Delta s_2}{10^{(10+\beta)}}} \end{cases} \quad (2)$$

Алгоритм расчёта должен обеспечивать наличие сбалансированного уровня оптической мощности на всех абонентских терминалах (ONT) независимо от их удалённости от центрального узла (OLT). Для n последовательно соединённых сегментов с длинами L_1, L_2, \dots, L_n и затуханием α дБ/км требуется найти такие коэффициенты деления $D1_i$ и $D2_i$ для каждого сплиттера, чтобы выполнялось условие:

$$P_{rx}(ONT_1) \approx P_{rx}(ONT_2) \approx \dots \approx P_{rx}(ONT_n) \quad (3)$$

Согласно (1) и (2) для расчёта коэффициента деления на первом выходе $D1_i$ используется следующее соотношение:

$$D1_i = \frac{100}{1 + \sum_i [10^{(\Delta loss_i/b)}]} \quad (4)$$

где $\Delta loss_i$ – разность потерь между сегментами;

b – эмпирический коэффициент, определяющий крутизну компенсации ($b = 10,25$).

Коэффициент деления второго выхода $D2_i$ определяется как:

$$D2_i = 100 - D1_i \quad (5)$$

Алгоритм реализует принцип «обратной связи»: чем больше накопленное затухание до данного сплиттера, тем большая доля мощности направляется в соответствующее плечо для компенсации потерь. В таком случае для шинной топологии к ближним ONT направляется меньшая доля мощности (5-20%), а к удалённым ONT наоборот – большая доля мощности (20-50%).

В среде GNU Octave алгоритм расчёта коэффициентов деления сплиттеров реализован в виде последовательности вычислительных модулей в одном файле-сценарии:

Модуль 1: Инициализация параметров

В этой части пользователем задаются начальные параметры для расчёта (количество сегментов n , длины сегментов $seg[]$, затухание в оптоволокне a , потери в коннекторах $splice_loss$ и коэффициент b). Параметры могут задаваться как непосредственно в файле сценария, так и вводиться пользователем с помощью функции `input()`.

Модуль 2: Расчёт суммарных потерь в линии

После инициализации параметров сети в скрипте последовательно вычисляются накопленные потери для каждого сегмента:

```
for ki = 1 : n
    fiber_loss = seg(ki) * a + all_seg_loss;
    total_loss(ki) = fiber_loss + splice_loss;
    all_seg_loss = fiber_loss;
end
```

При организации циклов следует иметь в виду, что традиционные переменные i и j используются в GNU Octave для записи мнимой единицы в комплексных числах [8], поэтому для удобства применяются счётчики ki и kj .

Модуль 3: Расчёт разности потерь между сегментами

Далее вычисляется разность потерь между соседними сегментами в обратном порядке:

```
kj = n;
for ki = 1 : n-1
    delta_loss(kj-1) = total_loss(kj) - total_loss(kj-1);
    kj = kj - 1;
end
```

Модуль 4: Расчёт коэффициентов деления сплиттеров

В данной части происходит определение коэффициентов деления сплиттеров согласно формулам (4) и (5):

```
for ni = 1 : n-1
    sum = 10 ^ (delta_loss(kj) / b);
    ki = ki + sum;
    D1(kj) = 100 / (1 + ki);
    D2(kj) = 100 - D1(kj);
    kj = kj - 1;
end
```

Результаты расчётов выводятся на экран в командное окно GNU Octave, а также в текстовый файл (в формате .txt), содержащий следующую информацию (пример для сети ПГС-О, состоящей из 11 сегментов):

Затухание в оптоволокне: 0.32 дБ/км

Количество сегментов: 11 шт.

Количество сплиттеров: 10 шт.

Результаты расчета коэффициентов деления сплиттеров системы ПГС-О на перегоне:

seg	L,km	Term #	D1,%	D2,%
S01	1.30	ONT 01	08.111	91.889
S02	1.80	ONT 02	08.936	91.064
S03	1.70	ONT 03	09.940	90.060
S04	1.00	ONT 04	11.128	88.872
S05	1.60	ONT 05	12.716	87.284
S06	1.40	ONT 06	14.797	85.203
S07	1.10	ONT 07	17.618	82.382
S08	2.60	ONT 08	22.369	77.631
S09	3.10	ONT 09	31.047	68.953

S10 1.00 ONT 10 46.591 53.409

Здесь $S01 \dots S10$ – номера сегментов участка, L – длина сегмента в км, $Term$ – номер узла ONT, $D1$ и $D2$ – рассчитанные значения коэффициентов деления (%) для первого и второго выходов сплиттера соответственно.

На основании расчётов коэффициентов $D1$ и $D2$ пользователю остаётся лишь подобрать подходящие сплиттеры, используя таблицы производителей оптических делителей с соответствующими параметрами.

После определения параметров сплиттеров можно переходить к расчёту основных характеристик сети ПГС-О и проверки её работоспособности.

Расчёт затухания, определение уровней сигнала и энергетического запаса на узлах ONT также реализован в GNU Octave в виде отдельного файла-сценария, состоящего из нескольких вычислительных модулей.

Модуль 1: Инициализация параметров сети и оборудования

В этой части пользователем задаются исходные данные для расчёта (количество сегментов n , длины сегментов $seg[]$, затухание в оптоволокне a , номинальные потери в сплиттерах $D80$, $D20$, $D50 \dots$, суммарные потери на стороне ONT ONT_loss , мощность передатчика OLT и чувствительность приёмника ONT). Параметры также могут задаваться непосредственно в файле сценария или вводиться пользователем с помощью функции *input()*.

Модуль 2: Расчёт для сегментов со сплиттерами 80/20

Для каждого сплиттера 80/20 вычисляются потери на ответвление ($D20$) ont_loss и транзит ($D80$) $line_trans_loss$:

```
for ki = 1 : n-2
```

```
seg_loss = seg(ki) * a; % считаем потери в текущем сегменте
```

```
ont_loss = line_sum_loss + seg_loss + D20 + ONT_loss; % считаем потери  
на текущем ONT
```

```
line_trans_loss = D80 + seg_loss + 0.08; % потери в транзите + сварка 0.08  
дБ
```

```
line_sum_loss = line_sum_loss + line_trans_loss;
```

end

Модуль 3: Расчёт для предпоследнего сегмента со сплиттером 50/50

Для сплиттера 50/50, устанавливаемого в конце линии, также рассчитываются потери на ответвление (D50) *ont_loss* и транзит (D50) *line_trans_loss*:

$$\text{seg_loss} = \text{seg}(n-1) * a;$$

$$\text{ont_loss} = \text{line_sum_loss} + \text{seg_loss} + \text{D50} + \text{ONT_loss};$$

$$\text{line_trans_loss} = \text{D50} + \text{seg_loss} + 0.08;$$

Итоговые результаты расчётов также выводятся на экран и дублируются в текстовый файл следующего содержания (пример для сети ПГС-О, состоящей из 11 сегментов):

Затухание в оптоволокне: 0.32 дБ/км

Количество сегментов: 11 шт.

Количество сплиттеров: 10 шт.

Мощность передатчика: 1.5 дБм

Чувствительность приемника: -28 дБм

Результаты расчета параметров системы ПГС-О на перегоне:

seg	L,km	Term #	split	Loss,dB	ONT,dBm	Ezp,dB
-----	------	--------	-------	---------	---------	--------

S01	1.30	ONT 01	80/20	-09.816	-08.316	19.684
S02	1.80	ONT 02	80/20	-11.672	-10.172	17.828
S03	1.70	ONT 03	80/20	-13.496	-11.996	16.004
S04	1.00	ONT 04	80/20	-15.096	-13.596	14.404
S05	1.60	ONT 05	80/20	-16.888	-15.388	12.612
S06	1.40	ONT 06	80/20	-18.616	-17.116	10.884
S07	1.10	ONT 07	80/20	-20.248	-18.748	09.252
S08	2.60	ONT 08	80/20	-22.360	-20.860	07.140

S09 3.10 ONT 09 80/20 -24.632 -23.132 04.868

S10 1.00 ONT 10 50/50 -21.832 -20.332 07.668

S11 1.90 OLT --- -20.520 -19.020 08.980

Здесь $S01 \dots S11$ – номера сегментов участка, L – длина сегмента в км, $Term$ – номер узла ONT, $split$ – коэффициент деления установленного сплиттера, $Loss$ – затухание в сегменте (дБ), ONT – уровень сигнала на приёмнике ONT (дБм), Ezp – энергетический запас по мощности (дБ).

Критерием правильности расчёта является наличие положительного энергетического запаса (>3 дБ) на каждом из узлов ONT.

Таким образом, с использованием реализованных в виде файлов-сценариев алгоритмов можно оперативно определить оптимальные параметры элементов проектируемой сети оптического доступа на перегоне.

Список литературы

1. Хлудеева, М.А. Перегонная связь на основе технологий PON // Вестник связи. – 2024. – № 3. – С. 4-6.
2. Лапунов, С.И., Блиндер, И.Д., Ананьев, Д.В., Левин, Л.С. Системы доступа объектов на перегоне на основе пассивных оптических сетей // Автоматика, связь, информатика. – 2020. – № 4. – С. 27-33.
3. Алексеев, Е.Р., Чеснокова, О.В. Введение в Octave для инженеров и математиков. – М.: ALT Linux, 2012. – 368 с.
4. Корпусенко, Е.Г., Попов, Д.А., Ванчиков, А.С., Канаев, А.К. Организация перегонной связи по волоконно-оптическому кабелю // Автоматика, связь, информатика. – 2015. – № 9. – С. 15-19.
5. Аньев, Д.В., Тарасов, И.А. Организация передачи данных для систем ЖАТ // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – № 1. – С. 33.
6. Попов, Д.А., Ванчиков, А.С., Канаев, А.К., Кренев, В.В. Пассивные оптические сети для организации связи на перегоне // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – № 3. – С.10-13.

7. Шевцов, С.П., Козиенко, Л.В. Метод расчета коэффициента деления оптического сплиттера для построения сбалансированных PON сетей // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т. 1. – С. 374-379.
8. Pajankar, A., Chandu, S. GNU Octave by example: A fast and practical approach to learning GNU Octave. – Apress, 2020. DOI:10.1007/978-1-4842-6086-9.

Automation of Railway Passive Optical Network parameters calculation using GNU Octave

Kozienko Leonid V.,
Associate Professor, Ph.D. (Technical Sciences)
Department of Automation, Telemechanics and Communications
Irkutsk State Transport University
664074, Irkutsk, Chernyshevsky St., 15
leo.kozienko@gmail.com

This paper addresses the task of automating calculations for the design of Railway Passive Optical Networks, used for providing broadband access to the railway infrastructure objects and facilities. A comprehensive approach is proposed, which involves the development of specialized algorithms to solve two interconnected problems: the automated selection of optical splitter ratios to build a balanced bus topology network and the precise calculation of the line power budget. The methods are implemented via scripts in the GNU Octave, a scientific programming language for scientific computing and numerical computation. The algorithms enable the calculation of signal levels at Optical Network Terminals (ONTs), attenuation in the optical fiber, and the guaranteed power margin. The results of this work significantly reduce the time required to determine the optimal parameters for PON system elements during the design of a broadband access telecommunication network for the railway infrastructure objects.

Keywords: passive optical networks; PON; passive access network; design automation; GNU Octave; optical splitters; optical budget.