

МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ БИНАРНЫХ ПРОВОДНИКОВ И ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

Г.В. Демьянчук

gregory-dm@mail.ru

SPIN-код: 2601-7600

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена выявлению особенностей создания магистральных оптоволоконных линий передачи данных. В процессе исследования рассмотрены требования к телекоммуникационным сетям. Изучено влияние затухания и дисперсии в оптическом волокне на длину регенерационного участка ВОЛС. Рассмотрено применение светового излучения в качестве энергетического носителя волоконно-оптических каналов, исследована пропускная способность каналов магистральных оптоволоконных линий передачи данных. Проведена оценка качества передачи информации бинарным проводником. В результате исследований удалось установить, что наибольшую информационную и энергетическую пропускную способность имеют бинарные проводники, что обуславливает их широкое использование в магистральных сегментах оптоволоконных линий передачи данных.

Ключевые слова

Магистраль, оптоволокно, информация, поток, модель, дисперсия, затухание, канал, передача данных

Поступила в редакцию 27.06.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. Начало XXI века характеризуется чрезвычайно быстрым развитием различных (особенно кабельных) систем и компьютерных технологий, синтез которых положил начало созданию широкополосной мировой инфраструктуры [1]. Прогресс в области электроники, оптических, квантовых и оптоэлектронных технологий позволил резко повысить быстродействие конечных устройств систем передачи информации (40 ... 80 Гбит/с) и расширить их полосу пропускания (около 100 ГГц). При этом полоса пропускания среды передачи (оптических кабелей) составляет десятки терагерц. Благодаря этому объем информации, передаваемой с одного волокна в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), увеличился во много раз. Дальность передачи сигналов без промежуточных пунктов регенерации увеличилась до нескольких сотен километров и в перспективе достигнет тысяч километров [2]. К преимуществам оптических каналов также следует отнести малый вес волокна, в случае использования волоконно-оптических проводников, или вообще отсутствие потребностей создавать среду передачи в открытых оптических каналах.

В данном контексте в настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития современных технологий передачи данных (связи) является применение волоконно-оптических конструкций. Высокие требования к телекоммуникационным сетям (скорость передачи информации, надежность, защищенность от несанкционированного доступа) позволяют констатировать значительные преимущества ВОЛС по сравнению с существующими системами. Учитывая качественные характеристики волоконно-оптической линии (ВОЛ), как линии связи (малое затухание сигнала, высокая пропускная способность оптического волокна, высокая надежность оптической среды; высокая защищенность от межволоконного воздействия), целесообразно ожидать, что ВОЛС заменят все существующие магистральные линии передачи данных [3].

С учетом вышеизложенного вопросы создания магистральных оптоволоконных линий передачи данных приобретают особую актуальность, теоретическую и практическую значимость, что и обусловило выбор темы данной статьи.

Вопросам применения ВОЛС для организации каналов передачи информации уделено значительное внимание таких специалистов, как Е.Л. Портнова, В.В. Виноградова, В. Г. Шарварко, Р. Л. Фриман, Д. Дж. Стерлинг. Большинство исследователей единогласно сходятся на том, что перспективным направлением дальнейших исследований является разработка аналитических моделей волоконно-оптического канала передачи информации. Для современных коммуникационных сред (и в первую очередь для компьютерных сетей) решение задач эффективной электронной транспортировки пакетов сообщений является очень актуальным направлением исследований. Это решение требует разработки новых методов и средств проектирования ВОЛС нового поколения. Техника и технология волоконно-оптических систем передачи данных развиваются динамично и достаточно интенсивно, разрабатываются новые поколения ВОЛС, где уже применяются различные методы мультиплексирования.

С учетом вышеизложенного цель статьи заключается в исследовании теоретических и практических аспектов построения магистральных оптоволоконных линий передачи данных. Оно направлено на появление новых архитектур и методов маршрутизации сетей связи с коммутацией оптических информационных потоков для ВОЛС. В результате исследования ожидается установить вид проводника, имеющего наибольшую информационную и энергетическую пропускную способность.

Теоретические предпосылки создания оптоволоконных ВОЛС. На физическом уровне для создания магистральных оптоволоконных линий передачи данных в составе волоконно-оптических интерфейсов передачи информации необходимы следующие основные блоки:

– источники излучения на основе полупроводниковых лазерных диодов (светодиодов) с длинами волн в основных окнах прозрачности оптического волокна ($\lambda_1 = 0,85$ мкм, $\lambda_2 = 1,31$ мкм, $\lambda_3 = 1,55$ мкм);

- фотоприемники на основе лавинных (APD) или $p-i-n$ -фотодиодов с аналогичными длинами волн;
- волоконно-оптическая среда (оптическое волокно): одномодовое SMF (Single Mode Fiber) или многомодовое MMF (Multi Mode Fiber);
- оптика ввода-вывода излучения, исходящего от источников или от самого оптического волокна в фотоприемники;
- электронные драйверы и кодерный контроллер ввода (используется на передающем конце для обеспечения модуляции оптического излучения в соответствии с формой сигналов данных);
- электронные операционные усиливающие схемы, демодуляторы и контроллер декодирования (применяются на приемном конце интерфейса для усиления электрического сигнала от фотоприемников и его декодирования).

Для большей эффективности приема световой энергии и высокой скорости передачи информации целесообразно выбирать вертикально-излучающие лазерные диоды (VCSEL — лазеры с вертикальным оптическим резонатором), которые имеют высокую квантовую эффективность ($\eta > 0,8$), высокие скорости модуляции ($F = 10 \dots 12$ ГГц) и стабильные тепловые характеристики.

В качестве фотоприемников целесообразно применение $p-i-n$ -фотодиоды последних типов с малыми барьерными емкостями $p-n$ -перехода, что позволяет достичь высоких скоростей модуляции ($F < 10$ ГГц).

Рассмотрим более подробно физические явления в оптическом волокне, влияющие на длину регенерационного участка ВОЛС.

Расстояние, на которое можно передать информацию через оптическое волокно (длина регенерационного участка ВОЛС), зависит главным образом от затухания и дисперсии сигналов в волокне [4]. Рассмотрим влияние затухания в оптическом волокне на длину регенерационного участка.

Суммарное затухание $\alpha_{\text{ВОЛС}}$ (дБ) в ВОЛС без усилителей вычисляют по следующему соотношению:

$$\alpha_{\text{ВОЛС}} = l_{\text{лч}}\alpha_{\text{лч}} + \alpha_{\text{св}} + n_{\text{св}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{СК}}} \alpha_{\text{СК}_i} + \alpha_{\text{РС}} n_{\text{РС}} + \sum_{j=1}^{n_{\text{В}}} \alpha_{\text{В}_j},$$

где $l_{\text{лч}}$ — длина линейной части ВОЛС, км; $\alpha_{\text{лч}}$ — коэффициент затухания в линейной части ВОЛС, дБ/км; $\alpha_{\text{св}}$ — затухание в месте сварки волокна, дБ; $n_{\text{св}}$ — число мест сварки волокна в ВОЛС; $\alpha_{\text{СК}_i}$ — затухание в i -м соединительном кабеле, дБ; $n_{\text{СК}}$ — число соединительных кабелей в ВОЛС; $\alpha_{\text{РС}}$ — затухание сигнала в разъёмном соединении, дБ; $n_{\text{РС}}$ — число разъёмных соединений в ВОЛС между передатчиком и приемником; $\alpha_{\text{В}_j}$ — затухание сигнала в j -м ответвителе, дБ; $n_{\text{В}}$ — число ответвителей в ВОЛС между передатчиком и приемником.

Число мест сварки волокна $n_{\text{св}}$ зависит от строительной длины $l_{\text{каб}}$ (км) волоконно-оптического кабеля, применяемого при строительстве ВОЛС, и может быть найдено с помощью следующего соотношения:

$$n_{\text{св}} = \text{rnd} \left(\frac{l_{\text{лч}}}{l_{\text{каб}}} + 0,499999 \right) - 1,$$

где функция округления значения аргумента x до ближайшего целого имеет следующий вид:

$$\text{rnd}(x) = \begin{cases} n, & \text{если } n \leq x \leq n+0,5; \\ n+1, & \text{если } n+0,5 \leq x \leq n+1, \end{cases}$$

где n — целое число.

Для линии с длиной $l_{\text{лч}}$, равной длине регенерационного участка $l_{\text{ру}}$ (км), должно выполняться равенство

$$P_{\text{прд}} = \alpha_{\text{ВОЛС}} + P_{\text{зап}} + P_{\text{прм}},$$

где $P_{\text{прд}}$ — мощность передатчика, дБ · Вт; $\alpha_{\text{ВОЛС}}$ — общее затухание сигнала в ВОЛС, дБ; $P_{\text{зап}}$ — запас мощности для компенсации шумов в ВОЛС и искажения сигнала при передаче через ВОЛС, дБ; $P_{\text{прм}}$ — чувствительность приемника, дБ · Вт.

Длина регенерационного участка $l_{\text{р}}$ ВОЛС ограничена затуханием в оптическом волокне, равна длине линейной части $l_{\text{лч}}$ ВОЛС, при которой приобретает минимальное значение такая функция:

$$F_{\alpha}(l_{\text{лч}}) = \left| \frac{P_{\text{прд}} - \alpha_{\text{св}} \left(\text{rnd} \left(\frac{l_{\text{лч}}}{l_{\text{каб}}} + 0,499999 \right) - 1 \right)}{\alpha_{\text{лч}}} \right| =$$

$$= \left| \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{СК}}} \alpha_{\text{СК}_i} - \alpha_{\text{РС}} n_{\text{РС}}}{\alpha_{\text{лч}}} \right| = \left| \frac{\sum_{j=1}^{n_{\text{и}}} \alpha_{\text{в}_j} - P_{\text{зап}} - P_{\text{прм}}}{\alpha_{\text{лч}}} \right|.$$

При небольших длинах соединительных кабелей (до нескольких десятков метров) можно пренебречь затуханием в них.

Теперь рассмотрим влияние дисперсии сигналов в волокне на длину регенерационного участка ВОЛС. Дисперсия — это рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала, которое вызывает увеличение продолжительности оптического импульса на выходе ВОЛС. Дисперсия ограничивает диапазон частот, пригодных для использования оптического волокна, и уменьшает дальность передачи информации по такому волокну, поскольку чем длиннее ВОЛС, тем больше проявляется дисперсия и больше расширяется импульс.

Различают межмодовую (модовую) $\tau_{\text{мм}}$, хроматическую (частотную) $\tau_{\text{хр}}$ и поляризационно-модовую $\tau_{\text{пм}}$ дисперсии [5]. Межмодовая дисперсия вызвана наличием большого числа мод в оптическом волокне, каждая из которых распространяется со своей скоростью.

Хроматическую дисперсию подразделяют на материальную $\tau_{\text{мат}}$ и внутримодовую (волноводную) $\tau_{\text{вм}}$. Материальная дисперсия связана с зависимостью показателя преломления оптического волокна от длины волны сигнала. Внутримодовая дисперсия обусловлена процессами внутри моды и связана со световодной структурой моды. Для современных одномодовых волоконно-оптических кабелей связи хроматическую дисперсию $\tau_{\text{хр}}$ определяют с использованием следующего выражения:

$$\tau_{\text{хр}} = D_{\text{хр}}(\lambda_p) \cdot \Delta\lambda_{\text{прд}} l_{\text{лч}},$$

где $D_{\text{хр}}(\lambda_p)$ — коэффициент хроматической дисперсии оптического волокна, зависящий от рабочей длины волны λ_p , пс/(нм км); $\Delta\lambda_{\text{прд}}$ — ширина спектра сигнала на выходе источника излучения, нм.

Коэффициент хроматической дисперсии

$$D_{\text{хр}}(\lambda_p) = \frac{S_0}{4} \lambda_p \left(1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_p} \right)^4 \right),$$

где S_0 — коэффициент наклона дисперсионной характеристики оптического волокна, пс/(км · нм²); λ_0 — длина волны нулевой дисперсии оптического волокна, нм.

Эксперимент. Для обеспечения информационно-энергетического обмена в процессе создания магистральных оптоволоконных линий передачи данных целесообразно использовать два типа связи: бинарных проводников и волоконно-оптических информационно-энергетических каналов. Бинарные проводники представляют собой кабельную структуру и в качестве информационно-передающей среды включают объединенные под защитной оболочкой оптические волокна, роль энергетически-передающей среды играют токонесущие жилы на основе металлического проводника электроэнергии [6].

В свою очередь, волоконно-оптические информационно-энергетические каналы представляют собой размещенные с помощью волнового мультиплексирования оптические спектры для передачи информации и энергии в едином оптическом волокне специализированного типа (с большим диаметром сердцевины 200...1000 мкм) [7]. Именно последние представляют большой интерес в плане разработки, исследования и аппаратной реализации магистральных оптоволоконных линий передачи данных. Поэтому данное направление применения светового излучения в качестве энергетического носителя волоконно-оптических каналов является очень актуальным.

Новизна данного предложения заключается в том, что принцип оптического информационно-энергетического обмена помимо передачи энергии в специализированном оптическом волокне предусматривает параллельную передачу информации на других спектральных частотах с помощью технологии WDM (Wave Division Multiplexing). Реализация информационно-энергетической пе-

редачи по волоконно-оптическим каналам требует детального рассмотрения и исследования процессов общего оптического способа передачи информации и энергии.

Ориентировочные значения информационной и энергетической пропускной способности для каждого типа каналов магистральных оптоволоконных линий передачи данных приведены в таблице.

**Пропускные способности каналов
магистральных оптоволоконных линий передачи данных**

Тип канала	Пропускная способность		Тип линии
	Информационная, Мбит/с	Энергетическая, Дж / с	
Бинарные проводники	$1 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$	$10 - 10^5$	Магистральные каналы
Открытые оптические каналы	$10^2 - 10^3$	—	Выделенные информационные каналы
Волоконно-оптические информационно-энергетические каналы	$1 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$	$10 - 10^2$	Выделенные локальные каналы

Если для первых двух типов каналов нет необходимости расчета и исследований значения пропускных способностей, поскольку технологии реализации их известны, то для волоконно-оптических информационно-энергетических каналов необходимо более подробно рассмотреть механизмы объединенного способа передачи информации и энергии в них. На основе построенных математических моделей и расчетов необходимо определить максимально возможные значения пропускных способностей и в соответствии с этим установить сферу применения и классы конечного оборудования для каналов этого типа.

Поскольку в бинарных проводниках среды передачи информации и энергии являются пространственно и физически разделенными, целесообразно рассматривать процессы в оптическом волокне (информационная среда) и в токопроводящих жилах на основе металлических проводников (энергетически несущая среда) по отдельности.

Быстродействие оптических волокон бинарного проводника может быть описано как

$$B_{\max} = B_{\max.od} = 0,44\tau_z = 0,44 \left(\sqrt{(\tau_{mat} + \tau_w)^2 + \tau_{pmd}^2} \right) \approx \frac{0,5}{\delta},$$

где $B_{\max.od}$ — максимальное быстродействие единичного волокна; δ — средняя квадратичная ширина импульса входной информации; τ_z — общая дисперсия одномодового волокна бинарных проводников, которая состоит из суммы квадратов материальной τ_{mat} , волновой τ_w и поляризационной τ_{pmd} дисперсий.

Для энергетической среды, в роли которой выступают металлическая оболочка или токонесущие жилы (в случае размещения их вместе с волокнами в одном пачкорде [8]), максимальная энергетическая пропускная способность определяется параметрами рабочего напряжения U_R , максимально допустимого значения рабочего тока $I_{R\max}$ и омическим сопротивлением металлических токонесущих частей энергетической среды длиной $2L$ согласно общеизвестному закону Ома [9]:

$$P_{\max} = U_R I_{R\max} = U_R \frac{U_R}{R_{2L}} = \frac{U_R^2}{R_{2L}}.$$

Пропускная способность бинарных проводников измеряется в киловольт-амперах [КВА].

При использовании бинарных проводников канального типа, каждый из которых содержит по два токонесущих канала, их важной характеристикой является максимально допустимое значение напряжения диэлектрического пробоя между металлическими частями $U_{\max \text{ проб}}$, превышение которого приведет к внутреннему электрическому пробое. При применении бинарных проводников канального типа длина токонесущего пути (металлических частей) увеличивается в 2 раза по сравнению с одноканальным ($L = 2L_{\text{од.мет}}$, где $L_{\text{од.мет}}$ — длина одной токонесущей части), ведь, как известно, для передачи электрической энергии необходима двухполюсная схема (\pm , или фаза и ноль F/O) [10].

Бинарные проводники целесообразно использовать в магистральных сегментах оптоволоконных линий передачи данных, поскольку они имеют наибольшие значения энергетической общей и информационной $B_{\max z}$ пропускных способностей. В магистральных каналах их укладывают в магистральные пачкорды, которые представляют собой магистральное звено сегмента оптоволоконных линий передачи данных. В таком магистральном звене может быть размещено N оптических волокон или спектров при условии мультиплексирования на длинах волн λ_i , $i = 1, \dots, N$, и M токонесущих проводников. Тогда общая информационная $B_{\max z}$ и энергетическая $P_{\max z}$ пропускные способности будут пропорциональны числу оптических токонесущих каналов [11]:

$$\begin{cases} P_{\max z} = MP_{\max}; \\ B_{\max z} = NB_{\max} = \sum_{i=1}^N B_{\max \lambda_i}. \end{cases}$$

Для оценки качества передачи бинарных проводников по аналогии с волоконно-оптическими информационно-энергетическими каналами можно воспользоваться коэффициентами передачи по оптическому волокну k_{opt} и токонесущим проводникам $k_{el.ekt}$ [12], которые определяются как

$$\begin{cases} P_{out.opt} = k_{opt} P_{in.opt}; \\ P_{out.elect} = k_{el.ekt} P_{in.elect}. \end{cases}$$

Заключение. Подводя итоги проведенного исследования, можно сделать следующие выводы. Широкое внедрение на практике ВОЛС различного уровня стимулирует появление новых архитектур и методов маршрутизации сетей связи с коммутацией оптических информационных потоков для магистральных оптоволоконных линий передачи данных. Это требует создания новых коммутационных технологий. Технически указанная задача успешно решается с использованием физических принципов, основанных на кванто-оптических, электрооптических, магнитооптических, акустооптических и других явлениях.

В процессе выявления особенностей создания магистральных оптоволоконных линий передачи данных рассмотрены физические явления в оптическом волокне, влияющие на длину регенерационного участка ВОЛС. Проанализирована возможность использования современных методов передачи данных в ВОЛС. Для создания магистральных оптоволоконных линий передачи данных в процессе исследования был разработан математический аппарат описания процессов передачи информации и энергии. Также удалось установить, что наибольшую информационную и энергетическую пропускную способность имеют бинарные проводники, что делает возможным их широкое применение в магистральных сегментах.

Литература

- [1] Кайюмов С.Т. Особенности формирования и развития рынков услуг связи. *Качество. Инновации. Образование*, 2017, № 12(151), с. 75–79.
- [2] Сидельников О.С., Скидин А.С. Исследование эволюции QAM, сигнала в волоконно-оптических линиях связи с использованием различных несущих импульсов. *Фотон-экспресс*, 2017, № 6, с. 186–187.
- [3] Вдовин А.К., Махнева А.О., Абзалилова Ю.Р., Выдрин Д.Ф. Оптоволоконная связь. *Теория и практика современной науки*, 2017, № 2(20), с. 145–147.
- [4] Шихалиев И.И., Лукиных С.Н., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Коньшев В.А. Распределенные рамановские усилители в волоконно-оптических линиях связи. *Фотон-экспресс*, 2017, № 6(142), с. 84.
- [5] Жалило А.В. Принципы построения систем мониторинга волоконно-оптических линий связи. *Вестник магистратуры*, 2017, № 11-2, с. 6–7.
- [6] Галеев Р.Г., Михалев Д.Н., Моисеев Е.Г. Принимающий (передающий) аналоговый модуль для волоконно-оптической линии связи. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2017, № 12, с. 155–159.
- [7] Гиберт Д. Современные технологии в помощь проектировщику ВОЛС. *Первая милья*, 2017, № 4(65), с. 20–27.
- [8] Шапиро Е.Г., Шапиро Д.А. Влияние нелинейного взаимодействия на пропускную способность оптического канала с компенсацией дисперсии. *Квантовая электроника*, 2017, т. 47, № 11, с. 1049–1052.
- [9] Дьяконов А.В., Шелестов Д.А., Артемьев Б.В. Быстродействующий мониторинг протяженных объектов с помощью волоконно-оптических сенсорных систем на основе брэгговских решеток. *Контроль. Диагностика*, 2018, № 3, с. 40–43.

[10] Дмитриев В.Е., Попов Д.В. Анализ методов двухлучевой передачи сигнала по оптоволоконному кабелю. *Технологии инженерных и информационных систем*, 2018, № 2, с. 36–47.

[11] Муравьев К.А., Терехов В.В. Методы управления сетевым трафиком гетерогенных распределенных телекоммуникационных систем. *Проектирование и технология электронных средств*, 2017, № 2, с. 15–21.

[12] Аминев Д.А., Кроткова К.Г., Лошак Д.И., Коньшев В.А. Анализ вариантов построения устройств формирования напряжений смещения для оптических модуляторов. *Технологии инженерных и информационных систем*, 2017, № 3, с. 25–36.

Демьянчук Григорий Валентинович — студент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

METHODS OF CREATING THE TRUNK FIBER OPTIC DATA TRANSMISSION LINES BASED ON BINARY CONDUCTORS AND FIBER-OPTIC INFORMATION AND ENERGY CHANNELS

G.V. Dem'yanchuk

gregory-dm@mail.ru

SPIN-code: 2601-7600

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The article deals with identifying features of creating a trunk fiber-optic data transmission lines. Requirements for telecommunication networks are considered in the research process. The effect of attenuation and dispersion in an optical fiber on the length of the fiber-optic fiber regeneration section are studied. The use of light radiation as an energy carrier of fiber-optic channels is considered, the throughput of channels of the main fiber-optic data transmission lines is investigated. An assessment of the quality of information transmission by a binary conductor is carried out. As a result of the research, it was possible to establish that binary conductors have the greatest information and energy bandwidth. This leads to their widespread use in the trunk segments of fiber optic data lines.

Keywords

Trunk, fiber optic, information, flow, model, dispersion, attenuation, channel, data transfer

Received 27.06.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

References

- [1] Kayyumov S.T. Features of the formation and development of communication services markets. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*, 2017, no. 12(151), pp. 75–79.
- [2] Sidel'nikov O.S., Skidin A.S. Research on evolution of QAM, of signal in fiber-optic links using different carrier pulses. *Foton-ekspres*, 2017, no. 6, pp. 186–187.
- [3] Vdovin A.K., Makhneva A.O., Abzalilova Yu.R., Vydrin D.F. Fiber optic communications. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*, 2017, no. 2(20), pp. 145–147.
- [4] Shikhaliev I.I., Lukinykh S.N., Naniy O.E., Treshchikov V.N., Konyshv V.A. Distributed Raman amplifiers in fiber-optic links. *Foton-ekspres*, 2017, no. 6(142), p. 84.
- [5] Zhalilo A.V. Design concepts of monitoring systems for fiber-optic links. *Vestnik magistratury*, 2017, no. 11-2, pp. 6–7.
- [6] Galeev R.G., Mikhalev D.N., Moiseev E.G. Receiving-transmitting analog module for fiber-optic communication line. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki* [Achievements of Modern Radioelectronics], 2017, no. 12, pp. 155–159.
- [7] Gibert D. Modern technologies for designer of FOCL. *Pervaya milya* [Last Mile], 2017, no. 4(65), pp. 20–27.
- [8] Shapiro E.G., Shapiro D.A. Influence of nonlinear interaction on the capacity of an optical dispersion-compensating channel. *Kvantovaya elektronika*, 2017, vol. 47, no. 11, pp. 1049–1052. (Eng. version: *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 11, pp. 1049–1052).
- [9] D'yakov A.V., Shelestov D.A., Artem'yev B.V. Highspeed monitoring of extended objects using fiber-optics sensor systems based on Bragg gratings. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2018, no. 3, pp. 40–43.

- [10] Dmitriev V.E., Popov D.V. Analysis of dual-beam signal transmission methods through fiber-optic cable. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem*, 2018, no. 2, pp. 36–47.
- [11] Murav'yev K.A., Terekhov V.V. Methods of management of the network traffic of the heterogeneous distributed telecommunication systems. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv* [Design and technology of electronic means], 2017, no. 2, pp. 15–21.
- [12] Aminev D.A., Krotkova K.G., Loshak D.I., Konyshov V.A. Analysis of variants of construction of devices for forming bias voltages for optical modulators. *Tekhnologii inzhenernykh i informatsionnykh sistem* [Design and technology of electronic means], 2017, no. 3, pp. 25–36.

Dem'yanchuk G.V. — Bachelor's Degree student, Department of Electronic Equipment Design and Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.