

УДК 621.373.8

## Повышение пиковой мощности источника импульсного лазерного излучения с применением оптических линий задержки

© 2018 г. **В. А. АЛЕКСЕЕВ, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; А. С. ПЕРМИНОВ;**  
**С. И. ЮРАН, ДОКТОР ТЕХН. НАУК**

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск  
*E-mail: alekseevv@stu.ru*

Поступила в редакцию 20.08.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-12-08-14

Рассматриваются вопросы реализации запатентованного источника импульсного лазерного излучения, который позволяет экономично использовать энергопитание за счёт оригинальной структуры параллельного комплекта линий оптических задержек и сложения амплитуд импульсов входного лазерного излучения. Приведены результаты вычислительного эксперимента для различного числа коммутирующих каналов с определением прогнозируемой выходной пиковой мощности источника лазерного излучения. Для оценки источника излучения вводится понятие эффективности системы, как отношение выходной пиковой мощности к числу каналов линий задержек. Результаты расчётов приведены в виде графиков эффективности для различного числа каналов с учётом потерь в оптоволоконных линиях оптической задержки. Предложенный источник импульсного лазерного излучения имеет перспективу использования в оптических линиях связи, лазерных информационных системах и медицинских приборах.

**Ключевые слова:** оптический коммутатор, пиковая мощность излучения лазера, оптоволоконная линия задержки, соединитель (коннектор), потери в волокне .

**Коды OCIS:** 140.0140.

### ВВЕДЕНИЕ

В ряде систем экологического мониторинга загрязнений водных сред оптическими методами, в частности, для оперативного обнаружение аварийного сброса загрязняющих веществ в систему сточных вод [1, 2], медицинских системах диагностики и терапии [3] и др. требуются экономичные источники импульсного лазерного излучения, позволяющие создать необходимые по амплитуде импульсы оптического излучения в требуемом спектральном диапазоне. Авторами работы предложен экономичный источник импульсного лазерного излучения [4], позволяющий эффективно использовать его в указанных системах. Схема источника приведена на рис. 1.

Рассмотрим принцип действия источника импульсного лазерного излучения.

Импульсы оптического излучения лазера частотой  $F$  поступают на вход оптического коммутатора. При поступлении первого импульса комму-

татор направляет импульс оптического излучения на  $N$ -ый элемент линий задержек, состоящих из отрезков оптоволокна. Второй импульс оптического излучения коммутатор направляет на  $(N - 1)$  элемент линий задержек и т.д. Линии задержек содержат  $N$  элементов. Выходы линий задержек соединены с  $N$  входами оптического сумматора

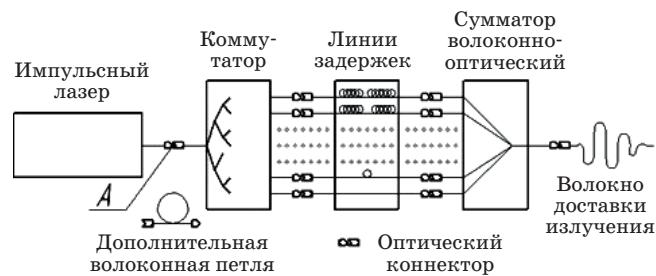


Рис. 1. Структурная схема источника импульсного лазерного излучения.

излучения. Элементы линий задержек выполнены таким образом, что все задержанные импульсы лазерного излучения поступают на входы оптического сумматора одновременно с  $N$ -ым импульсом. На выходе оптического сумматора формируется импульс, пиковая мощность которого в  $N$  раз больше пиковой мощности отдельного импульса (без учёта потерь).

В результате на выходе источника излучения образуется импульсное лазерное излучение, значительно превосходящее по пиковой мощности импульсы исходного излучения лазера. При этом частота следования импульсов на выходе устройства будет в  $N$  раз ниже частоты  $F$  излучаемых лазером импульсов.

Таким образом, по сравнению с известными источниками лазерного излучения при одних и тех же источниках энергии в рассматриваемом устройстве достигается существенное увеличение выходной пиковой мощности лазерного излучения за счёт возможности суммирования энергии. При этом для получения импульсов большой пиковой мощности требуются маломощные лазер и источник питания, что особенно важно для автономной аппаратуры.

При разработке конструкции описанного лазерного источника важную роль играют потери оптического излучения при прохождении импульсов по оптическому тракту, которые могут существенно снизить выходную импульсную интенсивность лазерного излучения.

Настоящая работа посвящена анализу путей оптимизации конструктивного исполнения описанного источника импульсного лазерного излучения.

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе рассматривается вычислительный эксперимент, связанный с моделированием источника импульсного лазерного излучения.

Для выбора параметров элементов источника излучения был принят ряд допущений. Считаем, что длина соединительных волокон достаточно мала, поэтому потери излучения в них не будут учитываться.

Потери в оптических соединителях принимались  $dB_1 = 0,15$  дБ, то есть соединители принимались достаточно высокого качества, а величина пропускания соединителя  $\beta = 10^{-0,1dB_1}$  ( $\beta = 0,966$ , т.е. потери на акт коммутации составляют 3,4%).

Потери на отражение в таких соединителях от  $-30$  до  $-40$  дБ, что является достаточно малыми величинами по сравнению с остальными потерями, и в дальнейшем учитываться не будут.

Потери в волокне принимались  $dB_2 = 2$  дБ/км (по умолчанию), то есть достаточно малыми, но отнюдь не рекордными в настоящее время [5].

Оптический коммутатор обеспечивает электронное управление каналами коммутации. Число коммутирующих каскадов (ярусов)  $k$  варьировалось от 1 до 10. Таким образом, число каналов изменялось от 2 до 1024 ( $2^k$ ).

Блок линий задержек — волоконный, элементарный шаг линий задержки  $\Delta$  варьировался в зависимости от длительности импульса лазера, скважность принята равной 2. Величина элементарного шага линий задержек  $\Delta$  определялась по формуле

$$\Delta = 2\tau c / n ,$$

где 2 — принятая скважность,  $\tau$  — длительность импульса,  $c$  — скорость света в вакууме, км/с,  $n$  — показатель преломления материала волокна (для кварца в диапазоне длин волн 1,3–1,5 мкм  $n \approx 1,44$  [6]).

Таким образом, длина линии задержки  $i$ -го канала определялась по формуле

$$L_i = (2^k + 1 - i)\Delta ,$$

где  $i$  — номер канала ( $i = 1, 2, \dots, 2^k$ ),  $k$  — число коммутирующих каскадов (ярусов).

Тогда величина пропускания линии задержки  $i$ -го канала будет

$$\beta_{dli} = 10^{-0,1dB_2L_i}$$

Оптический сумматор — также волоконный, например, сварные соединения в единое выводное волокно. Количество соединителей на канал получилось 4 (см. рис. 1). Возможно подключение в точке А дополнительной волоконной петли (о назначении которой речь будет вестись ниже), тогда получится 5 соединений, но, если ввод в сумматор выполнить тоже сварными соединениями, то число соединителей останется 4.

Реализация отдельных элементов предложенной схемы (коммутатор, сумматор) может быть осуществлена с использованием следующих разработок. В качестве коммутаторов можно использовать скоростные электрооптические переключатели NanoSpeed типа NS 1×4, состоящие из трёх 1×2. Серия NS связывает оптические каналы, перенаправляя входящий оптический сигнал в выбранный выход оптического волокна [7]. В качестве сумматора можно использовать объединители BragGrate™ Combiner, предназначенные для объединения лазерных излучений от нескольких источников в одно [8].

Выходная пиковая мощность лазера  $P_0$  для удобства описания принималась за единицу.

Пиковая мощность на выходе коммутатора (для  $i$ -го каскада коммутации)

$$P_{si} = P_0 \beta^4 \beta_s^i ,$$

где  $P_0$  — выходная пиковая мощность лазера,  $\beta$  — пропускание соединителя,  $\beta_s$  — пропускание элементарной ячейки коммутатора,  $i$  — номер коммутирующего каскада в коммутаторе системы.

Пиковую мощность на выходе системы  $P_{\text{out}}$  можно найти по формуле

$$P_{\text{out}} = P_{\text{sk}} \sum_{i=1}^{2^k} \beta_{dli},$$

где  $k$  — число коммутирующих каскадов (ярусов),  $i$  — номер канала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для удобства оценок введём понятие эффективности системы  $Q$ , как отношение выходной пиковой мощности системы к теоретической импульсной мощности, полученной сложением мощностей всех импульсов,

$$Q = P_{\text{out}} / (P_0 2^k),$$

где  $k$  — число коммутирующих каскадов (ярусов).

На рис. 2 приведено семейство зависимостей  $P_s = F\beta_s$  для различного числа коммутирующих каскадов в коммутаторе  $k$  (цифра возле кривой на рисунке).

Из рис. 2 (а) видно, что наиболее «интересная» область практического применения — это область, где  $\beta_s$  более 0,90. Считая, что потери в коммутаторе не должны превышать более 30%, т.е. пиковая мощность на выходе коммутатора должна быть больше или равна 0,7 от пиковой мощности на входе, можно получить требования к коммутатору —  $\beta_s \geq 0,98$  (см. рис. 2 (б)). Поэтому, в дальнейшем будем полагать  $\beta_s = 0,98$ .

На рис. 3 приведено семейство зависимостей  $Q = F(\beta_s)$  различного числа коммутирующих каскадов в коммутаторе.

Кроме того, можно заметить, что при длительности импульсов менее 1 нс даже при применении коммутатора на 1024 канала эффективность системы будет не ниже 0,7.

Влияние потерь в волокне (линии задержек) на эффективность системы можно наблюдать на семействах кривых, приведённых на рис. 4. Эти зависимости приведены для волокна не самого высокого качества, но, тем не менее, при уменьшении длительности импульсов до 0,5 нс система с количеством каналов 128 ( $k = 7$ ) обладает эффективностью более 0,7 даже при применении волокна с потерями 20 дБ/км. Если же использовать волокно достаточно качественное (потери менее 1 дБ/км), то создание системы с эффективностью более 0,7 возможно и при большом количестве каналов (см. рис. 4 (в) и (г)).

На рис. 5 приведены зависимости эффективности системы от потерь в волокне с низкими потерями для скважности импульсов 2 и 10, из которых видно, что при потерях в волокне менее 1 дБ нет больших различий в эффективности системы, работающей с импульсами 0,1 нс и скважностью 2 и 10.

Для реализации схемы устройства (рис. 1) можно в качестве импульсного лазера предложить ис-

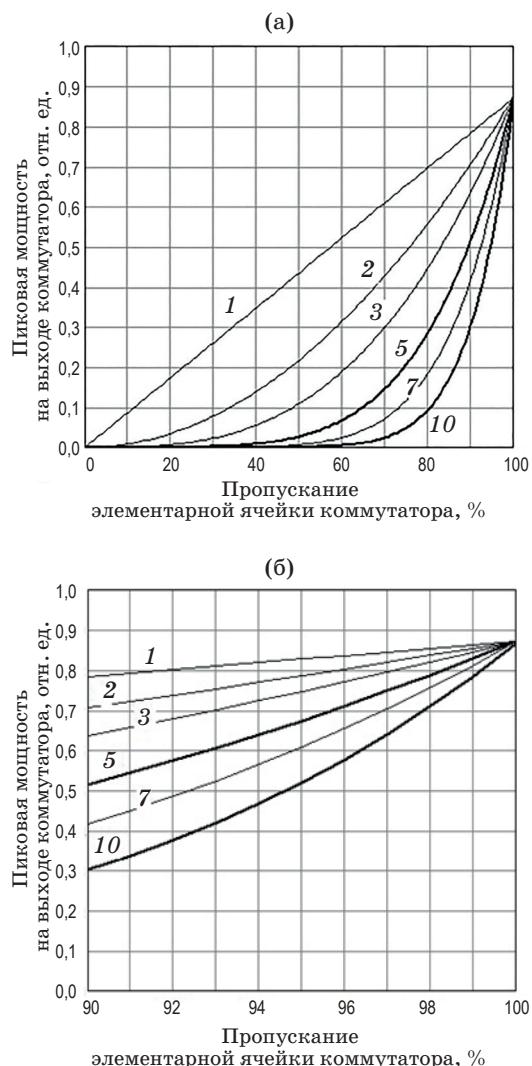
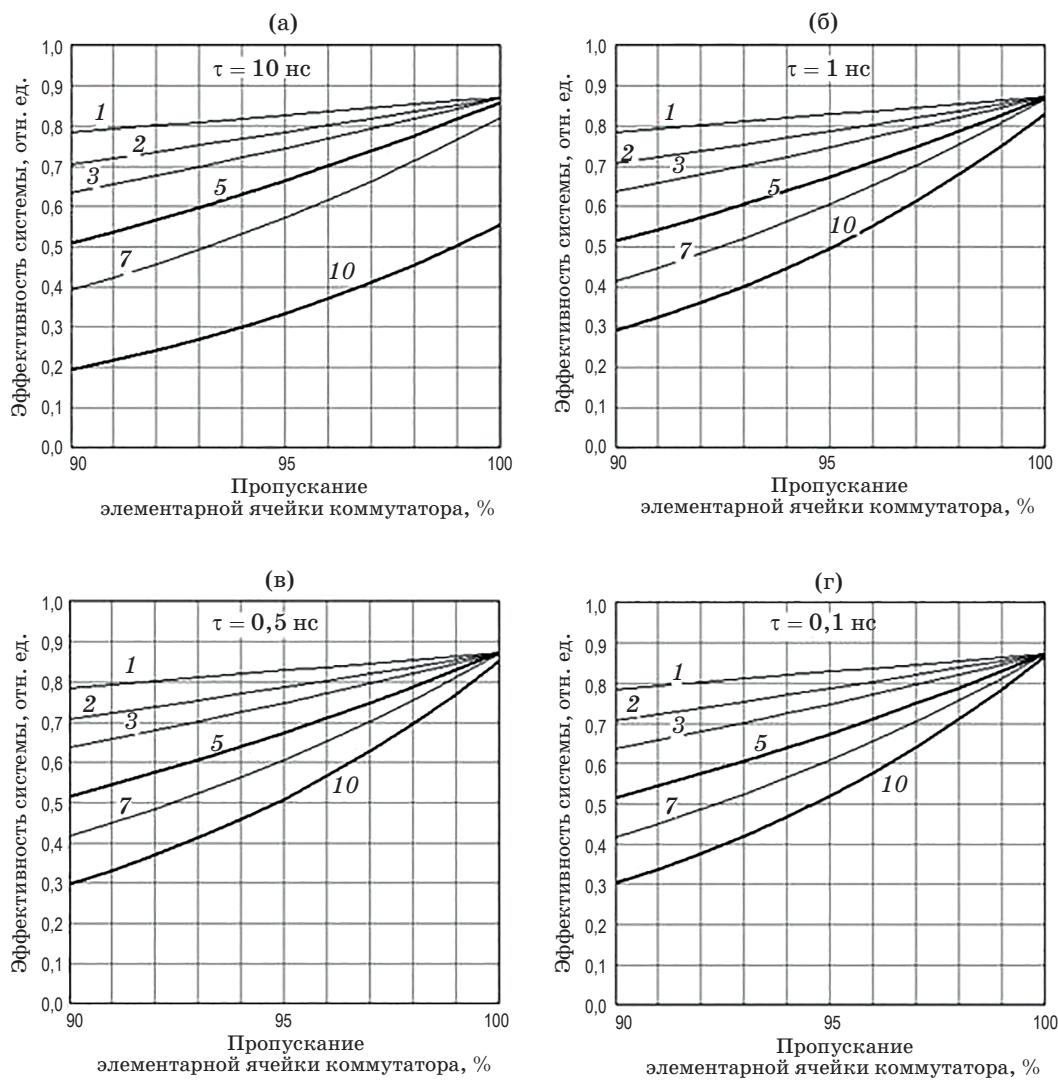


Рис. 2. Зависимость пиковой мощности на выходе коммутатора от пропускания элементарной ячейки коммутатора для различного числа коммутирующих каскадов (показано цифрами на поле рисунка).

пользовать лазерный диод с волоконным выходом, например, WSLP-1310-002m-9-DFB, применяющийся в системах волоконной связи и работающий в гигагерцовом диапазоне следования импульсов. Подобные диоды имеют встроенные фотоприёмники, которые могут позволить использовать сигнал от фотоприёмника для управления устройством коммутации, но так как любое электронное устройство работает с некоторой задержкой во времени, то для компенсации этого можно использовать дополнительную волоконно-оптическую линию задержки (на рис. 1 — это дополнительная волоконная петля). Появляется дополнительный соединитель, приводящий к снижению выходной мощности на 3,4%, но при длительности импульсов менее 1 нс выигрыш от снижения жёстких требований к качеству волокна очевиден (см. рис. 4, 5).



**Рис. 3.** Зависимость  $Q = F(\beta_s)$  для различного числа коммутирующих каскадов в коммутаторе (длительность импульсов — 10 нс (а), 1 нс (б), 0,5 нс (в) и 0,1 нс (г), скважность — 2, потери в коннекторе — 0,15 дБ, потери в волокне — 1 дБ/км).

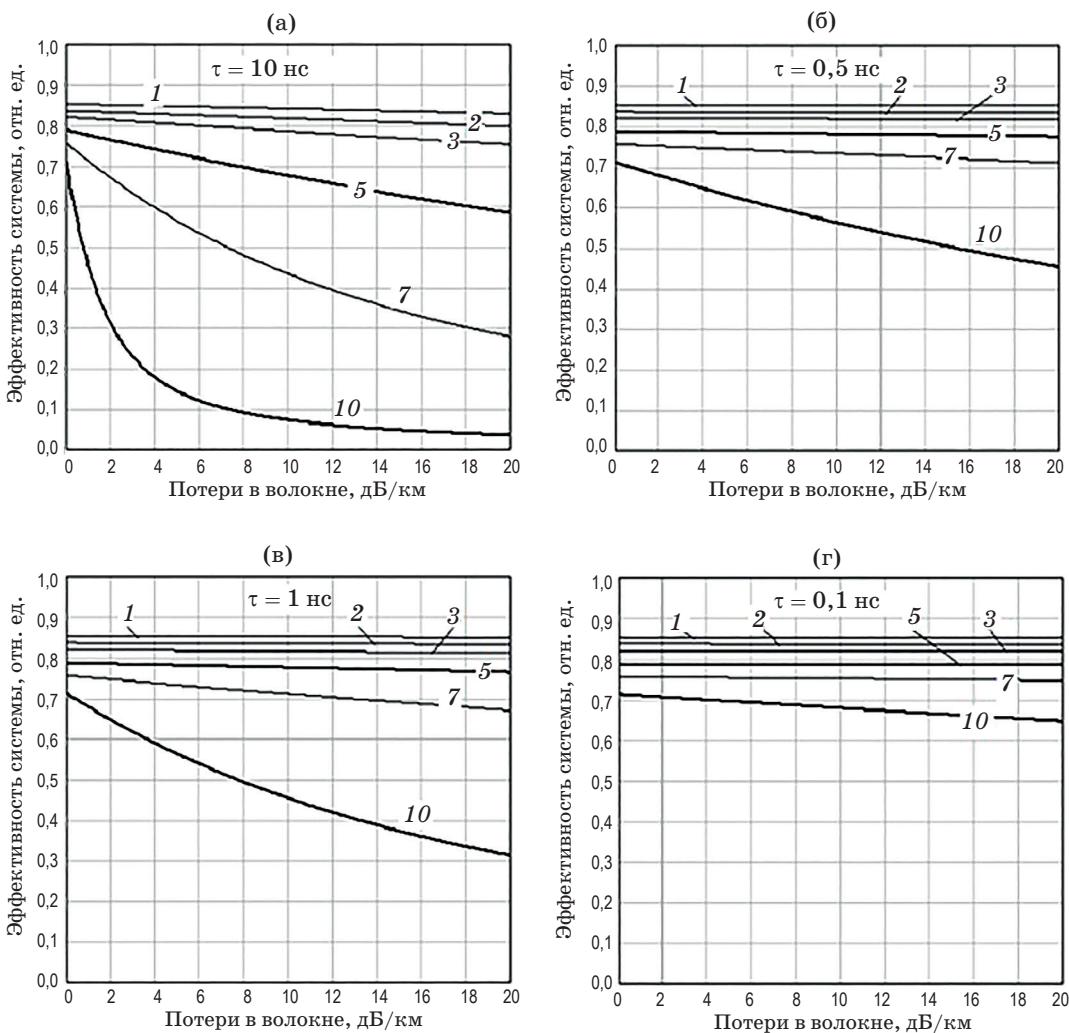
Проведём оценку выходной пиковой мощности системы, созданной на базе лазерного диода WSLP-1310-002m-9-DFB. Средняя выходная мощность данного лазерного диода — 2 мВт. Скорость передачи данных — 2,5 Гбит/с, т.е. частота генерации импульсов — около 2,5 ГГц, следовательно, импульсы следуют с интервалом 0,4 нс. И, таким образом, длительность выходного импульса  $\tau = 0,1$  нс, вполне реальная величина, при этом скважность составит 4. При средней выходной мощности 2 мВт за секунду излучается энергия 2 мДж. На один импульс приходится 8 нДж, что при длительности импульса 0,1 нс даёт пиковую мощность выходного импульса указанного лазерного диода 8 мВт.

Для сравнения в таблице приведены значения пиковой мощности на выходе системы для

двух лазерных диодов (WSLP-1310-002m-9-DFB и WSLP-1550-010m-9-DFB, средние выходные мощности которых 2 и 10 мВт соответственно, вывод излучения через встроенный волоконный кабель). Потери в соединителе приняты 0,15 дБ (например, оптические разъёмы F-3000 или AngledPC), потери в волокне — от 0,4 до 1 дБ/км, потери на единичном акте коммутации — 2%.

Выходные мощности для 1024 каналов при фокусировке излучения в пятно диаметром 50–100 мкм уже позволяют получать плотности мощности технологических лазеров.

Недостатком приведенной схемы (рис. 1) является большое количество соединителей, но это количество можно уменьшить почти в два раза, если объединить в единый узел блок линий задержек



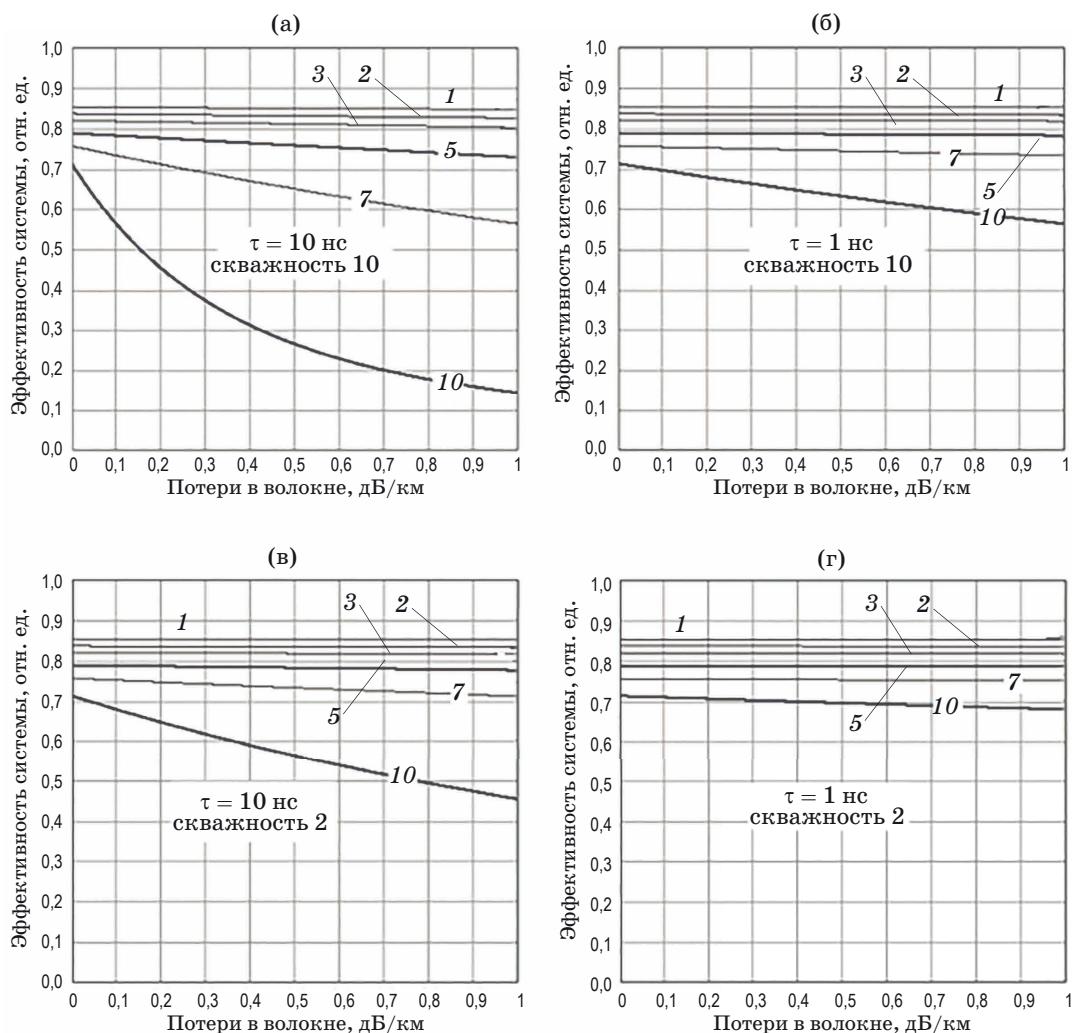
**Рис. 4.** Зависимость эффективности системы от потерь в волокне для импульсов длительностью 10 нс (а), 1 нс (б), 0,5 нс (в) и 0,1 нс (г) (потери в соединителе — 0,15 дБ, скважность импульсов — 2,  $\beta_s = 0,98$ ).

**Значения пиковой мощности на выходе системы для лазерных диодов WSLP-1310-002m-9-DFB и WSLP-1550-010m-9-DFB**

Число коммутирующих каскадов, $k$	Число каналов	Выходная пиковая мощность/эффективность, мВт/отн. ед.	
		WSLP-1310-002m-9-DFB	WSLP-1550-010m-9-DFB
1	2	13,7/0,854	68,3/0,854
2	4	26,8/0,836	133,8/0,836
3	8	52,5/0,820	263,4/0,820
5	32	201,5/0,787	1007/0,787
7	128	774,1/0,756	3840/0,756
10	1024	5800/0,708	30970/0,708

и волоконно-оптический сумматор. Это приведёт к жёсткой фиксации числа каналов, но при соответствующем перепрограммировании блока управления коммутатором можно получить систему с шагом в один канал.

Кроме того, при большом количестве каналов суммарная длина волокна в линиях задержки может составить десятки километров. Поэтому на взгляд авторов статьи увеличение количества каналов более  $2^5$ – $2^6$  является чрезмерным.



**Рис. 5.** Зависимость эффективности системы от потерь в волокне с низкими потерями (менее 1 дБ/км) для импульсов длительностью 10 и 0,1 нс (потери в соединителе — 0,15 дБ,  $\beta_s = 0,98$ ) при скважности импульсов 10 и 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из анализа приведённых зависимостей можно сделать следующие заключения:

- оптический коммутатор для эффективной работы системы с большим количеством каналов следует выбирать таким, чтобы потери на единичном акте коммутации составляли не более 2%;
- уменьшение длительности импульсов приводит к увеличению эффективности работы системы, что связано с уменьшением общей длины волоконной линии задержки для каждого канала;
- при малом количестве каналов (не более 32) можно не предъявлять жёстких требований к качеству волокна в плане потерь;

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.А., Козаченко Е.М., Юрченко С.И. Автоматическая установка для устранения аварийного выброса в системах фильтрации сточных вод // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 2. С. 239–243.

- при уменьшении длительности импульсов до 0,1 нс требования к качеству волокна становятся несущественными (см. рис. 4 и 5);

- при использовании импульсов длительностью менее 0,5 нс и малой скважности, а также волокна с достаточно малыми потерями (менее 1 дБ/км) создание импульсного источника, имеющего 1024 канала и обладающего эффективностью около 0,7 вполне возможно.

Перспективными направлениями использования предложенного источника импульсного лазерного излучения могут быть волоконно-оптические и беспроводные линии связи, сети, информационно-измерительные системы, технологическое оборудование, медицинские приборы и др.

2. Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н. Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод // Приборы и методы измерений. 2018. Т. 9. № 1. С. 7–16.
3. Алексеев В.А., Ардашев С.А., Юран С.И. Автоматизированный фотоплетизмограф // Приборы и методы измерений. 2013. № 1 (6). С. 46–51.
4. Алексеев В.А., Юран С.И., Перминов А.С., Стерхова М.А. Источник импульсного лазерного излучения // Патент России № 2477553. 2013.
5. Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Материалы и технологии волоконной оптики: специальные оптические волокна // Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 130 с.
6. ГОСТ 15130-86. Стекло оптическое кварцевое. Общие технические условия.
7. <http://sphotonics.ru/catalog/skorostnye-elektroopticheskie-pereklyuchateli-nanospeed/nssw1kh4/>.
8. Компания OptiGrate <http://www.azimp.ru/catalogue/optical+elements/39585/>.