

## ПРИМЕНЕНИЕ СКАЛЯРНЫХ КРИТЕРИЕВ ВЫБОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОЗВЕННОЙ КОММУТАЦИОННОЙ СХЕМЫ ДЛЯ КОММУТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Гайворонская Г.С., Рыбалов Б.А.

**Аннотация:** Предложен подход к выбору оптимальной коммутационной схемы, основанный на скалярных критериях выбора, и решена задача определения структуры многозвенной системы коммутации, характеризующаяся строгой неблокируемостью, не требующей ретрансляции при использовании любой процедуры установления соединения. Полученные результаты могут быть применены при проектировании пространственных систем коммутации оптических сигналов, позволяющих повысить эффективность функционирования оптических телекоммуникационных сетей за счет повышения быстродействия процессов коммутации в этих сетях.

**Ключевые слова:** коммутация оптических сигналов, система коммутации оптических сигналов, коммутационная схема, скалярные критерии выбора.

**Ключевые слова классификации ACM:** B.6 LOGIC DESIGN – B.6.3 Design Aids, B.4 INPUT/OUTPUT AND DATA COMMUNICATIONS - B.4.3 Interconnections (subsystems).

**Conference topic:** Informational Modelling.

---

### Введение

---

Создание сетей следующего поколения – *Next Generation Network (NGN)* – является наиболее актуальной задачей на современном этапе развития телекоммуникаций. Концепция *NGN* предусматривает предоставление неограниченного количества инфокоммуникационных услуг, что обуславливает рост требований к пропускной способности этой сети. Одним из возможных способов, позволяющих решить задачу существенного повышения пропускной способности телекоммуникационных сетей (ТС), является создание полностью оптических сетей – *All-Optical Networks (AON)*, позволяющих повысить пропускную способность сети до нескольких Пбит/с за счет применения полностью оптических технологий обработки информационного сигнала.

Основной задачей, требующей решения при создании полностью оптических сетей, является задача реализации коммутации оптических сигналов. Анализ состояния вопроса в области

создания оптических сетей [Каток В. Б., 2006; Иванов А.Б., 1999; Каток В.Б., 1999; Шарварко В.Г., 2006; Убайдуллаев Р.Р., 2001] показал, что на данный момент принципы функционирования волоконно-оптических систем передачи, изучены достаточно хорошо. В то же время вопросы реализации систем коммутации оптических сигналов (СКОС) рассмотрены поверхностно и требуют проведения дальнейших исследований. В настоящее время существуют лишь общие концептуальные подходы к построению СКОС, требующие развития и тщательного анализа.

Существующие методы коммутации оптических сигналов [Гайворонская Г.С. (1), 2011] предусматривают необходимость предварительного преобразования оптического излучения, несущего информацию, в электрическую форму ( $O/E$ ), коммутацию электрического сигнала и обратное электрооптическое преобразование ( $E/O$ ) с последующим усилением мощности оптического излучения. На рисунке 1 представлена обобщенная структурная схема системы коммутации  $O/E/O$ .

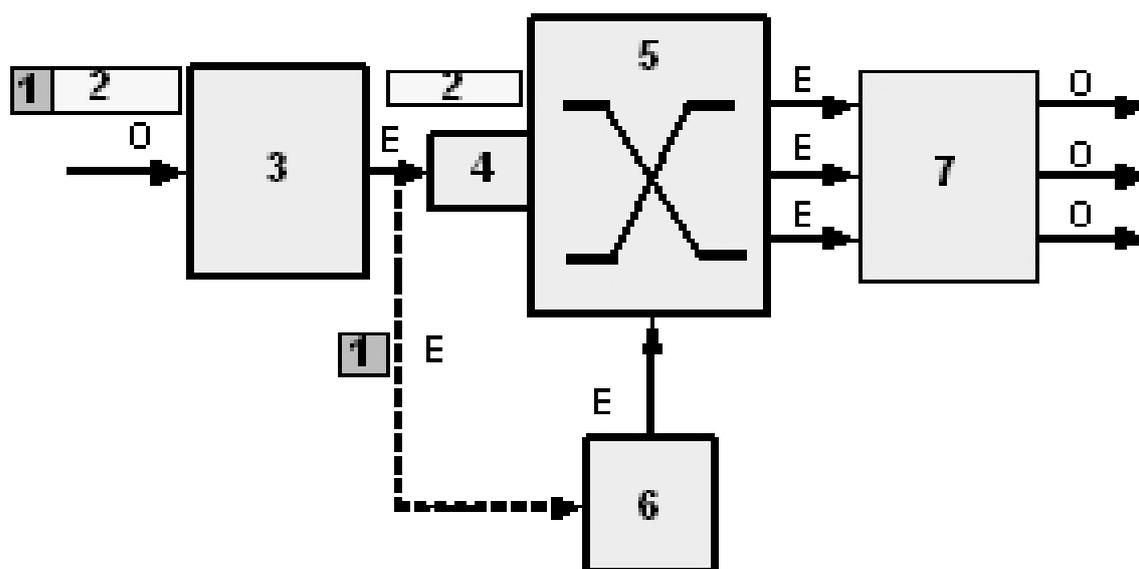


Рисунок 1 – Структурная схема системы коммутации  $O/E/O$ :

1 – служебная информация, 2 – полезная информация,

3 – блок оптоэлектрического преобразования,

4 – электронная буферная память, 5 – электронное коммутационное поле,

6 – электронный блок управления коммутацией, 7 – блок электрооптического преобразования

Такой подход к коммутации оптических сигналов накладывает ограничения на пропускную способность системы коммутации (СК) и ее емкость. Осуществление двукратного преобразования информационного сигнала, во-первых, существенно ограничивает пропускную способность СК (до 2,5 Гб/с), а, во-вторых, характеризуется чрезмерным энергопотреблением, что повышает стоимость эксплуатации системы коммутации. Более того, повышенное энергопотребление и наличие перекрестных помех приводит к ограничению емкости подобных СК, которая не превышает 32x32. [Гайворонская Г.С. (2), 2011; Гайворонская Г.С. (3), 2011].

Следовательно, электронно-оптические СК становятся узким местом ТС и являются сдерживающим фактором при наращивании её пропускной способности. Для устранения этого недостатка необходима разработка модели системы коммутации оптических сигналов, не только коммутирующей сигналы в оптической форме, но и обеспечивающей управление процессом коммутации с помощью оптического излучения. Под оптическим управлением процессом коммутации понимается управление переносом информации между оптическими каналами, реализуемое исключительно с использованием оптических технологий и позволяющее совершить переход к пентабитным скоростям передачи информации в ТС.

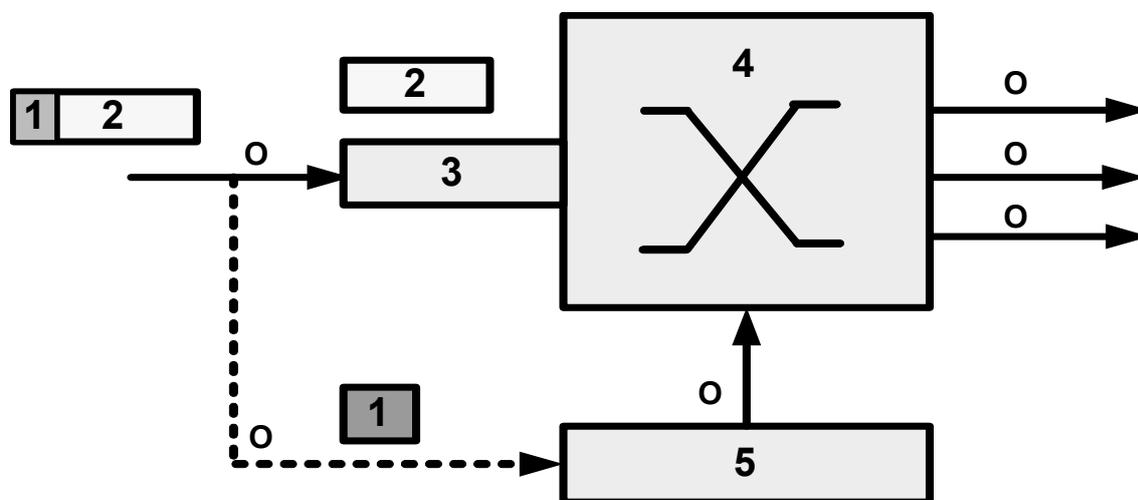


Рисунок 2 – Архитектура полностью оптической системы коммутации:

1 – служебная информация,

2 – полезная информация,

3 – оптический буфер,

4 – оптическое коммутационное поле,

5 – блок оптического управления коммутацией

---

На рисунке 2 приведена архитектура полностью оптической системы коммутации.

В этой системе информационный оптический сигнал, переносящий некоторый блок информации (БИ), одновременно запоминается в оптическом буфере (ОБф) и поступает на вход блока оптического управления (БОУ), который выполняет анализ БИ, выделяет адресную информацию и после ее обработки генерирует оптический сигнал управления точкой коммутации оптического коммутационного поля (ОКП). Затем оптический сигнал извлекается из ОБф и, следуя по коммутационному пути, поступает на выход СК. После усиления мощности сигнал передается по оптическому волноводу к следующему узлу коммутации.

Несмотря на преимущества полнооптического подхода к построению систем коммутации, его применение вызывает ряд сложностей. В первую очередь, это касается реализации БОУ, использующего оптические процессоры, применяемые в военной промышленности и ядерной энергетике, стоимость которых в десятки раз превышает стоимость их электронных аналогов [Жувикин Г., 2003].

Еще одним препятствием для построения СКОС является сложность создания оптического буфера с произвольным доступом (*Optical RAM*). Существующие на сегодняшний день линии оптической задержки – *Fiber Delay Line (FDL)* – способны накапливать оптический сигнал лишь ограниченный промежуток времени, что обуславливается чрезвычайно быстрым затуханием оптического излучения в миниатюрных петлях задержки. В связи с этим актуальной задачей является создание гибридной модели системы коммутации оптических сигналов на переходный период, которая, реализуя концепцию «коммутации на лету» (*“cut through”*) [Ершова Э.Б., 2009] без буферизации, позволит повысить эффективность функционирования оптических сетей. Такая модель СКОС должна быть лишена электрооптического преобразования информационного сигнала, а управление коммутацией может быть реализовано электронным способом. Это позволит решить проблему большого энергопотребления и сложности построения СК большой емкости путем применения технологии микроэлектромеханических систем (*MEMS*) [Гайворонская Г.С., 2010], используя для управления ОКП доступные по цене высокопроизводительные электронные процессоры. При этом одной из актуальных задач при проектировании СКОС емкостью более 1024 портов является определение структуры коммутационной схемы (КС). Эта статья посвящена решению задачи выбора КС для построения квадратных многозвенных СКОС.

---

**Основная часть**

---

При построении пространственных систем коммутации оптических сигналов функциональную пригодность и эффективность СКОС оценивают с помощью следующих показателей [Слепов Н.Н., 2000; Слепов Н.Н., 1999]:

- характеристики блокировки;
- требуемое количество базовых элементов (БЭ);
- однородность коммутации;
- пересекаемость связующих волноводов.

Под характеристиками блокировки СК понимают возможность установления соединения между любой парой свободных портов на входе и выходе СК ( $X_{ВХ}, Y_{ВЫХ}$ ). В зависимости от этой характеристики выделяют неблокирующие и блокирующие коммутационные схемы [Иванова О.Н., 1978]. Неблокируемость КС является ключевым требованием к системам пространственной коммутации оптических сигналов. При этом неблокирующие коммутационные схемы, в свою очередь, делятся на:

- неблокирующие в строгом смысле;
- неблокирующие в широком смысле;
- неблокирующие перестраиваемые.

Неблокирующие в строгом смысле КС – это такой тип схем, который не требует ретаршрутизации какого-либо соединения при использовании любой процедуры установления соединения.

Неблокирующие в широком смысле КС характеризуются отсутствием необходимости ретаршрутизации уже существующих соединений только при условии использования определенной процедуры установления связи.

Именно первые два типа неблокирующих КС на сегодняшний день могут быть эффективно использованы для построения СКОС. Это вызвано тем, что неблокирующие перестраиваемые КС требуют ретаршрутизации существующих соединений, что является проблематичным по причине необходимости буферизации оптического сигнала.

Стоимость системы коммутации определяется количеством используемых базовых элементов. Под базовым элементом (БЭ) многозвенной КС будем понимать коммутационный прибор с

параметрами  $2 \times 2$  либо  $1 \times 2$ . Следовательно, на стадии проектирования КС необходимо стремиться к минимизации количества используемых БЭ, что позволит уменьшить стоимость разрабатываемого устройства. Пересекаемость связующих волноводов необходимо минимизировать либо вовсе исключить, поскольку она обуславливает возникновение потерь мощности оптического излучения и переходные потери в результате взаимодействия световых потоков.

Под однородностью СК понимается равенство минимального и максимального количества базовых элементов, которые пройдет оптический сигнал, прежде чем достигнет выхода системы коммутации. Учитывая тот факт, что каждый базовый оптический элемент вносит затухание сигнала, при проектировании СКОС необходимо стремиться к тому, чтобы, во-первых, количество БЭ, через которые проходит оптический сигнал, было минимальным, а, во-вторых, минимальные и максимальные потери сигнала должны быть тождественны. Среди существующих схем комбинирования коммутационных приборов, удовлетворяющих условию неблокируемости, можно выделить следующие: матричную, схему Бенеша, схему Шпанке и схему Шпанке-Бенеша [Иванова О.Н., 1978]. Основные характеристики неблокирующих КС приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики неблокирующих коммутационных схем  $N \times N$

Схемы Показатели	Матричная	Бенеша	Шпанке- Бенеша	Шпанке
Неблокируемость	В широком смысле	С перестройкой	С перестройкой	В строгом смысле
Количество БЭ	$N^2$	$\frac{N(2 \log_2 N - 1)}{2}$	$\frac{N(N - 1)}{2}$	$2N(N - 1)$
Максимум потерь	$2N - 1$	$2 \log_2 N - 1$	$N$	$2 \log_2 N$

Минимум потерь	1	$2\log_2 N - 1$	$\frac{N}{2}$	$2\log_2 N$
Однородность коммутации	Нет	Да	Нет	Да
Пересекаемость	Нет	Да	Нет	Да

Пусть задано множество КС  $\Omega$ , состоящее из отдельных вариантов  $\omega_i$  так, что каждый отдельный вариант  $\omega_i \in \Omega$  рассматривается как точка в пространстве показателей приемлемости, а множество возможных вариантов  $\Omega$  определяется областью их существования:  $\Omega = \{\omega_i\}, i = \overline{1, N}$ .

Альтернативные варианты в однородном множестве  $\Omega$  представляются минимальными конечными описаниями, представляющими собой набор характеристик коммутационной схемы  $P = \{p_j\}, j = \overline{1, J}$ , в достаточной степени полно описывающий каждый из вариантов однородного множества  $\Omega$ . Множество характеристик  $\{p_j\}$  для коммутационных схем  $\Omega = \{\omega_i\}$  состоит из подмножества показателей приемлемости  $\{k_l\}$  и подмножества условий  $\{Y_z\}$ . Множество альтернатив, удовлетворяющих совокупности условий  $\{Y_z\}$ , т. е. требованиям по допустимости  $S_d$ , является допустимым множеством  $\Omega_d$ .

Учитывая, что ключевым условием реализации системы коммутации оптических сигналов является требование неблокируемости КС, множество  $\Omega_d$  составляют следующие КС: матричная  $W_1$ , Бенеша  $W_2$ , Шпанке-Бенеша  $W_3$  и Шпанке  $W_4$ .

Задача выбора сводится к тому, чтобы среди множества допустимых коммутационных схем  $\Omega_d$  выбрать вариант, обладающий лучшими значениями  $k_l$  с точки зрения принятой критериальной постановки.

Прежде чем сформулировать критериальную постановку  $K = \{k_1, \dots, k_M\}$  необходимо отобразить характеристики КС на числовую шкалу. Для отображения качественных характеристик (тип

неблокируемости, однородность коммутации) использована порядковая шкала, а для количественных характеристик (количество БЭ, максимум и минимум потерь) – абсолютная шкала.

Пусть  $k_1$  – это тип неблокируемости КС,  $k_2$  – количество БКЭ,  $k_3$  – максимум потерь,  $k_4$  – минимум потерь,  $k_5$  – однородность коммутации,  $k_6$  – пересекаемость волноводов. Тогда критериальная постановка  $K$  будет иметь следующий вид:

$$K = \{k_1 \rightarrow \max, k_2 \rightarrow \min, k_3 \rightarrow \min, k_4 \rightarrow \min, k_5 \rightarrow \max, k_6 \rightarrow \max\} \quad (1)$$

Учитывая тот факт, что характеристики КС имеют различные физические размерности, необходимо выполнить нормирование исходных значений. При этом влияние каждого нормированного показателя на результирующую функцию будет сопоставимо, если диапазоны возможных изменений каждого из них окажутся общими. Для этого использовано следующее выражение (2):

$$k_i = \frac{k_i - k_i^*}{k_i^{**} - k_i^*}, \quad (2)$$

где  $k_i^* = \min k_i \in \{k_i\}$ ,

$$k_i^{**} = \max k_i \in \{k_i\}.$$

С помощью этого выражения для каждой характеристики  $k_i$  получены характеристики неблокируемых КС после нормирования.

Важным этапом при решении задачи выбора является определение используемого критерия выбора. Векторные критерии (критерии по Парето и Слейтеру) позволяют отбросить лишь заведомо худшие варианты и выявить нехудшие – эффективные по Парето и Слейтеру. Главной чертой векторных критериев является их объективность, так как показатели качества в таких критериях являются независимыми [Гайворонська Г.С. (4), 2011]. Учитывая, что сформулированная постановка задачи выбора предусматривает наличие зависимых показателей приемлемости (в частности, однородность коммутации зависит от числа минимальных и максимальных потерь), то применение векторных критериев не представляется

целесообразным. Более того, одним из главных требований к применению критериев по Парето и Слейтеру является свойство сравнимости вариантов. Варианты сравнимы, если значения всех показателей качества одного варианта меньше (или больше) значений показателей качества другого варианта. Поскольку предварительный анализ исходного множества допустимых вариантов  $\Omega_d$  показывает присутствие малого числа сравнимых вариантов, то напрашивается вывод о неэффективности использования векторных критериев для решения поставленной задачи. Особенностью скалярных критериев является возможность получения единственного варианта решения, однако вместе с тем скалярные критерии содержат большую долю субъективности лица принимающего решения (ЛПР).

В случае решения задачи выбора КС функция выбора задается как некоторый функционал – комплексный показатель приемлемости, отражающий суммарный целевой эффект. Следовательно, для решения поставленной задачи целесообразным является применение интегрального критерия сравнения альтернатив.

Для назначения экспертных оценок весовых коэффициентов использован метод ранжирования, поскольку он предусматривает возможность достаточно точной оценки важности каждого из показателей выбираемого варианта. Суть метода ранжирования заключается в оценке показателей приемлемости по шкале относительной важности (например, в диапазоне от 1 до 10). Согласно этому методу, для  $M$  показателей весовые коэффициенты определяются по следующей формуле:

$$a_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{l=1}^M \lambda_l}, \quad (3)$$

где  $\lambda_l$  – оценка значимости фактора  $l$ .

При этом для  $M$  весовых коэффициентов  $a_i$  должно выполняться выражение:

$$\sum_{i=1}^M a_i = 1, \quad a_i \geq 0, \quad \overline{i = 1, M} \quad (4)$$

Оценка показателей приемлемости по десятибалльной шкале относительной важности приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка показателей приемлемости по шкале относительной важности

Показатели качества	Относительная оценка
Тип неблокируемости, $a_1$	10
Количество БЭ, $a_2$	3,51
Минимум потерь, $a_3$	1
Максимум потерь, $a_4$	1,49
Однородность коммутации, $a_5$	2
Пересекаемость, $a_6$	1,8

После расчета весовых коэффициентов для каждого показателя приемлемости с помощью применения интегрального критерия выбора аддитивного типа решена задача выбора КС.

$$W = \sum_{i=1}^M a_i k_i, \quad \overline{1, M} \quad (5)$$

На рисунке 3 приведены результаты расчета интегрального критерия выбора для каждой КС  $W_i$ .

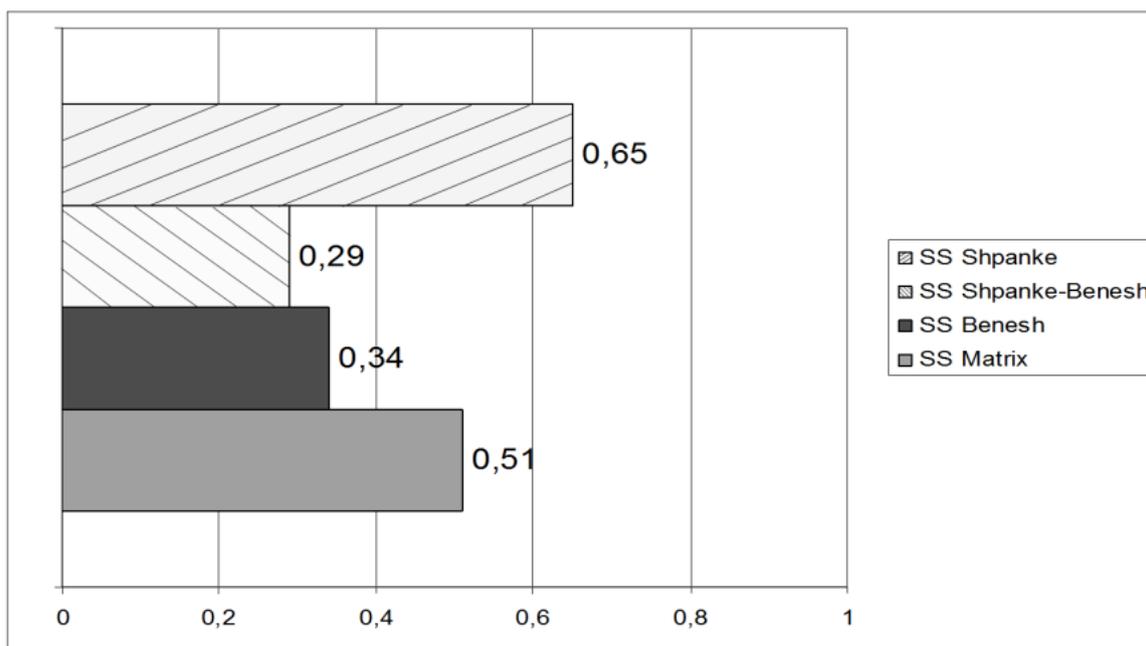


Рисунок 3 – Показатели интегрального критерия выбора для неблокирующих КС

На основании решения задачи выбора, наиболее приемлемым вариантом для построения СКОС является альтернатива  $W_4$  – коммутационная схема Шпанке, удовлетворяющая условию строгой неблокируемости.

---

### **Заключение**

---

Предложенный в статье подход к выбору коммутационной схемы для построения системы коммутации оптических сигналов позволяет однозначно утверждать, что решение таких задач характеризуется большой долей субъективизма ЛПР, и зависит от его подготовленности и профессионализма. Решение задачи с применением интегрального критерия выбора позволило выбрать структуру коммутационной схемы Шпанке для построения квадратных систем коммутации оптических сигналов большой емкости. Несомненным достоинством коммутационной схемы Шпанке является характеристика строгой неблокируемости, однако для ее реализации необходимо большое количество коммутационных приборов  $1 \times 2$ . Другие коммутационные схемы, рассмотренные при решении задачи выбора, могут быть использованы при построении многокаскадных СКОС лишь тогда, когда будет решена проблема оптической реализации перестройки существующих соединений.

---

### **Благодарности**

---

Настоящая работа выполнена при поддержке интернационального проекта ITHEA XXI Института информационных теорий и их приложений FOI ITHEA и Ассоциации ADUIS Украина (Ассоциация разработчиков и пользователей интеллектуальных систем).

The paper is published with financial support by the project ITHEA XXI of the Institute of Information Theories and Applications FOI ITHEA ([www.ithea.org](http://www.ithea.org)) and the Association of Developers and Users of Intelligent Systems ADUIS Ukraine ([www.aduis.com.ua](http://www.aduis.com.ua)).

---

### **Литература**

---

- [Каток В. Б., 2006] Аналіз характеристик передачі одномодових волокон для мереж зв'язку / В.Б. Каток, О.Б. Омецинская, М.В. Шаповалов // Тези доповідей МНПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій». – Запоріжжя. – 2006. – С.18-19.
- [Иванов А.Б., 1999] Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Сайрус системс, 1999. – 664 с.

- [Каток В.Б.,1999] Волоконно-оптичні системи зв'язку. – Київ.: *Lucent Technologies*, 1999. – 483 с.
- [Шарварко В.Г.,2006] Волоконно-оптические линии связи: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 170 с.
- [Убайдуллаев Р.Р.,2001] Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
- [Гайворонская Г.С. (1), 2011] Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях / Г.С. Гайворонская, А.В. Рябцов // *Applicable Information Models*. – Sofia: *ITHEA*, 2011. – № 22. – Р. 169-181.
- [Гайворонская Г.С. (2), 2011] Проблема обеспечения полностью оптической коммутации в конвергентных сетях / Г.С. Гайворонская // Збірник тез V МНТК «Проблеми телекомунікацій». – Київ. – НТУУ «КПІ». – 2011. – С.39
- [Гайворонская Г.С. (3), 2011] Тенденции развития оптических коммутаторов / Г.С. Гайворонская, А.В. Рябцов// Збірник тез V МНТК «Проблеми телекомунікацій».– Київ.– НТУУ «КПІ».– 2011.– С.99
- [Жувикин Г., 2003] Светит ли нам оптический компьютер? / Г. Жувикин // М.: Компьютерра. – 2003. – №2. – Режим доступа: <http://offline.compu-terra.ru/2000/332/2877/>
- [Ершова Э.Б.,2009] К вопросу построения оптических сетей / Э.Б. Ершова, Э.М. Вакс // Спецвыпуск «Технологии информационного общества». – Москва. – 2009. – С. 14 – 18.
- [Гайворонская Г.С., 2010] Метод повышения быстродействия оптических коммутаторов в информационных сетях / Г.С. Гайворонская, А.В. Рябцов // Холодильна техніка і технологія. – Одеса: ОДАХ, 2010. – №4 (126). – С. 70-72.
- [Слепов Н.Н., 2000] Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов // М.: Радио и связь, 2000. – 468 с., ил.
- [Слепов Н.Н., 1999] Оптические кросс-коммутаторы. Принципы реализации и архитектура / Н.Н. Слепов // М.: Связь и телекоммуникации. – 1999. – №6. – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/issue/1999/6/3>
- [Иванова О.Н.,1978] Автоматические системы коммутации / О.Н. Иванова, М.Ф. Копп // М.: Связь. – 1978.– 624 с.
- [Гайворонська Г.С. (4), 2011] Оптимальний синтез інформаційних мереж: навчальний посібник для магістрів / Г.С. Гайворонська // Одеса: ОДАХ. – 2011. – 94 с.

---

## Информация об авторах

---



**Гайворонская Галина Сергеевна** – Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, факультет информационных технологий и кибербезопасности ОНАПТ, д.т.н., профессор, зав. кафедрой информационно-коммуникационных технологий, советник ректора по инфокоммуникациям; Украина, Одесса, 65026, ул. Дворянская, 1/3; тел. (048)-720-91-48; e-mail: [gsgayvoronska@gmail.com](mailto:gsgayvoronska@gmail.com)

Области научных исследований: оптимизация переходных периодов при эволюции телекоммуникационных сетей. Потoki вызовов, нагрузка и межузловое тяготение в сетях. Проблемы создания сетей доступа. Проблема построения полностью оптических сетей и систем коммутации.



**Рыбалов Борис Александрович** – Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского, факультет информационных технологий и кибербезопасности ОНАПТ, старший преподаватель кафедры информационно-коммуникационных технологий; Украина, Одесса, 65026, ул. Дворянская, 1/3; тел. (067) 93 29 677; e-mail: [borisr@ukr.net](mailto:borisr@ukr.net)

Основные направления научных исследований: задачи создания полностью оптических сетей, коммутация оптических сигналов.

## SCALAR CHOICE CRITERIA'S USAGE FOR DETERMINATION OF THE OPTIMUM SWITCHING CIRCUIT FOR OPTICAL SIGNALS' SWITCHING SYSTEM

**Galina Gayvoronska, Borys Rybalov**

**Abstract:** An approach to the optimum switching scheme's choice is proposed. It is based on the scalar choice criteria. Problem of the multistage switching system's structure's determination is solved. Such system is characterized by strict non-blocking and doesn't require rerouting at the usage of any connection establishment procedure. Obtained results can be applied at the design of spatial optical signals' switching systems, allowing improvement of the optical telecommunications networks' functioning by increasing the performance of switching operations in these networks.

**Keywords:** optical signals' switching, optical signals' switching system, switching scheme, scalar choice criteria.