

Применение коммутаторов оптических сигналов в судовых системах передачи информации

Рябцов А.В.
НУ "Одесская морская академия", Одесса, Украина
alex.ryabtsov@gmail.com

Application of Optical Switches in ship's data transfer systems

Oleksandr Ryabtsov
NU "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine
alex.ryabtsov@gmail.com

Резюме – Рассмотрены вопросы использования коммутаторов оптических сигналов в судовых автоматизированных системах для повышения помехоустойчивости передаваемой информации.

Проанализированы различные виды дефлекторов, применяемых для коммутации оптических сигналов. Предложены конструкции одиночных и матричных оптических коммутаторов на основе управляемых пьезоэлектрических актуаторов, изготовленных по МЭМС-технологии.

Предложены к применению полностью оптические коммутаторы на основе дефлекторов светового потока. Пучок света, выходя из волоконно-оптической линии связи, отклоняется дефлектором в нужном направлении, и попадает в другой волоконно-оптический канал.

Abstract – The article is devoted to the usage of optical switches in ship's automated systems to increase the noise immunity of transmitted information.

The article discusses various types of deflectors used for optical signals switching. Designs of single and matrix optical switches based on controlled piezoelectric actuators manufactured by MEMS technology are proposed.

DOI: 10.31653/1819-3293-2020-1-26-72-84

В условиях непрерывно растущих требований к эффективности морских перевозок одно из ключевых мест занимают вопросы повышения надежности судовых технических средств. Постоянное возрастание размеров судов неизбежно вызывает удлинение необходимых линий связи между судовыми системами управления, а насыщенность современных судов мощным электрооборудованием обуславливает рост всех видов электромагнитных помех и наводок на информационные сигналы, передаваемые по судовым линиям связи.

С учетом повсеместного внедрения судовых автоматизированных систем управления приходится уделять особое внимание вопросам существенного повышения помехоустойчивости при передаче больших объемов информации между всеми судовыми системами.

В этих условиях рост требований к надежности и помехоустойчивости линий связи для интегрированных судовых систем становится одной из первостепенных задач. Энерговооруженность современных судов может достигать нескольких киловатт на тонну водоизмещения, при этом уровень электромагнитных помех в судовых линиях связи может превышать сотни милливольт. В таких условиях традиционные методы защиты от помех, такие, как повышение мощности сигнала, различные виды частотной и фазовой фильтрации, экранирование кабелей и прочие привычные меры, становятся уже неэффективными.

Решением данной проблемы стало применение на судах волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), которые, по определению, должны обеспечивать независимость передаваемых сигналов от внешних электромагнитных помех за счет переноса информационного спектра в значительно более высокую частотную область. Использование оптоволокна, по которому информация распространяется не в виде импульсов электрического тока, а в виде модулированных импульсов света, теоретически позволяет полностью исключить влияние судовых электромагнитных помех любого рода на передаваемую информацию. Такие системы уже нашли широкое применение на специализированных судах и, в частности, в системах динамического позиционирования, для обмена информацией между оборудованием, расположенным в машинном отделении, и управляющими контроллерами, обычно расположенными в надстройке.

Такое техническое решение в свое время стало техническим прорывом и позволило существенно увеличить помехоустойчивость передачи, однако проблему полного исключения влияния помех на процесс обмена информацией окончательно не решило. Это связано с тем, что помехоустойчивость увеличилась лишь у некоторого участка на общей протяженности судовых линий связи. Прочие участки судо-

вых коммуникаций, где ВОЛС не использовались, по-прежнему остались проводными, и также как и раньше подвергаются действию помех. Напрашивающееся решение использовать оптоволоконную оптику на всей протяженности судовых линий связи чаще всего отвергается производителями судовых систем как из-за высокой стоимости, так и из-за технологических сложностей с коммутацией оптических сигналов. Такая ситуация сохраняется на протяжении уже трех десятков лет.

Как известно, основным достоинством оптоволоконных сетей является практически неограниченная пропускная способность. На практике это означает возможность многократного увеличения объема информации, передаваемой по оптоволоконным каналам связи. При этом надежность и долговечность оптических кабелей сравнима с лучшими образцами проводных каналов связи, а их стоимость падает с каждым годом даже быстрее, чем стоимость оконечного оборудования.

Сейчас большинство коммутируемых оптических систем передачи информации выполнены по гибриднему (гетерогенному) принципу. Они включают в себя волоконно-оптические каналы и оптико-электронно-оптические коммутаторы (ОЕО, optical-electro-optical).

В таких системах информация, получаемая в виде выходного электрического сигнала датчиков или органов управления, сначала преобразуется светодиодами или полупроводниковыми лазерами в оптическое излучение. Затем передается в виде световых волн по оптическому кабелю до ближайшего коммутатора, где преобразуется при помощи электронных элементов обратно в электрический ток, обрабатывается и коммутируется электронными устройствами по заданному алгоритму. Выходные электрические сигналы ОЕО коммутатора преобразуются его электронными элементами снова в световой поток.

При преобразовании вида сигнала из оптического в электронный, и обратно, всегда происходит его искажение. Следовательно, в системе неизбежно происходит потеря передаваемой информации. К тому же скорость переключения электронного коммутатора значительно ниже скорости распространения оптического сигнала в ВОЛС. Еще десять лет назад эти потери быстродействия были незаметны, но теперь они могут стать критическими. Серьезный прорыв был возможен только при исключении многоступенчатого оптико-электро-оптического преобразования, для чего необходимо было сделать сеть полностью оптической.

Прогресс наметился лишь после появления так называемых полностью оптических коммутаторов (ПОК или АО, all-optical), которые ак-

тивно разрабатывались в последние годы. ПОК получают световые импульсы из входящих оптоволоконных кабелей и перенаправляют их на выход с помощью дефлекторов, отклоняющих световой поток, без преобразования оптических сигналов в электронные. Для коммутации оптических сигналов используются дефлекторы излучения, основанные на различных физических принципах. Наиболее часто встречаются матричные коммутаторы, состоящие из подвижных управляемых микроскопических зеркал, изготовленных по МЭМС-технологии. Пучок света, выходя из ВОЛС, падает на одно из зеркал и, отражаясь в нужном направлении, попадает в другой волоконно-оптический канал. При таком варианте искажение сигнала и время задержки несопоставимо малы по сравнению с гетерогенными системами передачи. Скорость коммутации в полностью оптической системе составляет 0,5 миллисекунд, что примерно на порядок меньше, чем в электронных устройствах. На конференции Lucent Technologies была продемонстрирована матрица для оптического коммутатора размером 256x256 зеркал, каждое диаметром полмиллиметра, благодаря которой, пропускная способность выросла до 10 терабит в секунду. Кроме Lucent к разработке ПОК приступили компании Alcatel, Marconi Communications, Nortel Networks, NEC, Siena, Sycamore Networks, Tellium и другие.

Основой таких коммутаторов являются микроминиатюрные зеркала, изготовленные с высочайшим оптическим качеством, что включает в себя, прежде всего, отражательную способность, близкую к 100 %, малую дисперсию и абберацию. Эти зеркала передвигаются или вращаются с помощью актуаторов-приводов. Основным критерием при выборе типа актуатора является максимальное быстродействие при минимальной потребляемой мощности. К таким актуаторам можно отнести, например, широко известные оптические гальванометры, применяемые в светолучевых осциллографах, ставших классикой измерительной техники. Широкое разнообразие физических принципов, на которых может быть основано действие актуатора, позволяет выбрать среди них наиболее оптимальный по заданным критериям.

Кроме гальванических актуаторов в ПОК могут быть использованы электростатические, электромагнитные и магнитоэлектрические, пьезоэлектрические, магнитострикционные и даже пневматические приводы.

Особого внимания заслуживают пьезоэлектрические актуаторы, к достоинствам которых относят твердость и монолитность, обеспечивающие высокую надежность и долговечность, а также очень высокое входное сопротивление, что позволяет свести практически к ну-

лю входные токи и, соответственно, потребляемую коммутатором мощность.

Примером простейшего пьезоэлектрического актуатора для зеркала ПОК может служить изгибная биморфная пьезоэлектрическая пластина 1 (рис. 1), состоящая из двух жестко скрепленных между собой поперечно поляризованных пьезоэлементов.

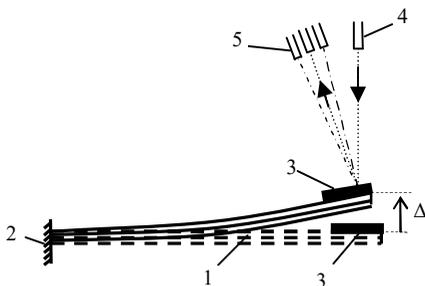


Рис. 1. Конструкция ПОК на основе плоского биморфного пьезоэлектрического актуатора

Один конец изгибного биморфа 1 жестко закреплен в неподвижном основании 2, а на другом, свободном конце биморфной пластины закреплено миниатюрное зеркало 3. Под действием постоянного напряжения, приложенного к обкладкам пьезоэлементов, они оба изменят свои линейные размеры: один – в сторону увеличения, а второй – в сторону уменьшения. Суммарное действие приложенного напряжения вызовет изгибную деформацию в биморфной пластине, а величина изгиба Δ будет пропорциональной приложенному управляющему напряжению $U_{упр}$. При этом величина изгиба Δ биморфной пластины 1 [1]

$$\Delta = k_{op} \cdot B \cdot U_{упр},$$

где k_{op} – электромеханический коэффициент; B – коэффициент анизотропии; $U_{упр}$ – управляющее напряжение.

Зеркало 3 отражает световой луч, падающий из входного световода 4. Изгиб биморфа 1 приводит к повороту зеркала 3 на определенный угол. Это позволяет перенаправлять отраженный световой поток, поступающий из входного световода 4, в любой из нескольких выходных световодов 5. При этом образуется простейший коммутатор структуры «1 × n», позволяющий осуществлять поочередную коммутацию нескольких оптических каналов.

При очевидных достоинствах, заключающихся в простоте и функциональности, такой простейший оптический коммутатор имеет один важный недостаток. Его изгиб осуществляется в одной плоскости, что не позволяет реализовать на одном биморфе оптический коммутатор объемной структуры $n \times m$, где n и m – число входных и выходных каналов. При параллельном расположении нескольких плоских биморфных актуаторов конструкция получается весьма громоздкой, а также динамически чувствительной.

Устройство и принцип работы актуаторов на основе плоских биморфных пластин, их достоинства и недостатки рассмотрены в работе [1], где также намечены пути совершенствования ПОК на основе простейших плоских актуаторов.

Одним из перспективных направлений является использование актуаторов пространственных оптических коммутационных устройств на основе сканирующих пьезоэлектрических элементов, созданных с помощью МЭМС-технологий. Так, например, технология производства трубчатых пьезоэлектрических элементов (ТПЭ) с успехом применяющаяся в электронной микроскопии [2], может быть использована в новом качестве в многоканальных оптических коммутаторах.

Основным достоинством ТПЭ (рис. 2) является возможность получения изгибных пространственных деформаций в двух координатах при относительно небольших управляющих напряжениях. ТПЭ представляют собой тонкостенные полые цилиндры 1 из титаната бария (ТБК) или цирконата титаната свинца (ЦТС-19) с линейными размерами порядка 12 – 18 мм и диаметром 0,8 – 1,5 мм, на внешнюю и внутреннюю поверхности которых методом напыления нанесены электроды 2 с проволочными или ленточными выводами 3 для подключения ТПЭ к схеме управления. Электрод на внутренней поверхности ТПЭ обычно выполняется сплошным, а внешний электрод продольно разделен на четыре части по-квадрантно (см. рис. 2).

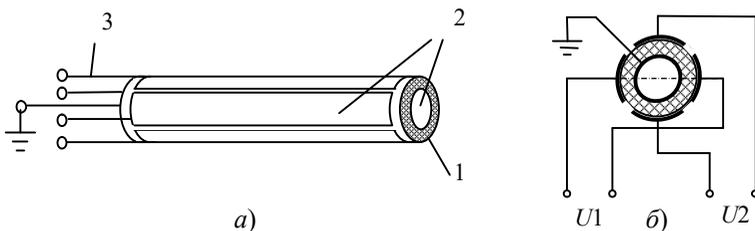


Рис. 2. Трубчатый пьезоэлемент (а) и схема подключения его электродов (б):
1 – трубчатый элемент; 2 – плоские электроды; 3 – выводы

Под действием напряжения, приложенного к электродам, пьезоэлемент изменяет свои геометрические размеры. Механическое напряжение, возникающее в ТПЭ вследствие обратного пьезоэффекта может быть описано в общем виде уравнением [2]:

$$u_{ij} = d_{ijk} \cdot E_k,$$

где u_{ij} – тензор деформаций; E_k – компоненты электрического поля; d_{ijk} – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов. При этом отличными от нуля являются только три коэффициента: d_{33} , d_{31} и d_{15} , характеризующие продольные, поперечные и сдвиговые деформации. Поперечными и сдвиговыми деформациями в ТПЭ в данном случае можно пренебречь. Тогда величина продольной деформации в ТПЭ под действием электрического поля остаточной поляризации может быть представлена в виде:

$$\delta = d_{33} \cdot l_1 \cdot E_{\text{ост}},$$

где l_1 – длина ТПЭ в недеформированном состоянии; $E_{\text{ост}}$ – напряженность поля остаточной поляризации пьезоматериала.

Тогда абсолютное значение продольной деформации ТПЭ

$$\Delta = d_{33} \cdot \frac{l_1}{l_2} U_{\text{упр}},$$

где l_2 – толщина стенки трубки; $U_{\text{упр}}$ – приложенное напряжение управления.

Очевидно, что при одном и том же напряжении $U_{\text{упр}}$ удлинение трубки будет тем больше, чем больше ее длина и чем меньше толщина ее стенки.

Так как вектор поля остаточной поляризации имеет в ТПЭ радиальный характер, то механические деформации на участках, находящихся под диаметрально противоположными электродами, будут иметь противоположные знаки. В этом случае деформация ТПЭ приобретает изгибный характер. Величина углового отклонения конца ТПЭ от продольной оси определяется целым рядом факторов, не всегда поддающихся аналитическому описанию, среди которых следует упомянуть толщину, материал и способ нанесения электродов, жесткость закрепления ТПЭ в корпусе и т.д. В большинстве практических применений ТПЭ величина их изгибного отклонения от продольной оси при вышеуказанных размерах не превышает 3 ... 5 % от линейного размера при напряженностях приложенного электрического поля $E \leq 5 \cdot 10^4$ В/м.

Для использования ТПЭ в качестве мультиплексирующего оптического коммутатора один из концов такого трубчатого пьезоэлемента 1 должен быть консольно закреплен в неподвижном основании 2, как показано на рис. 3.

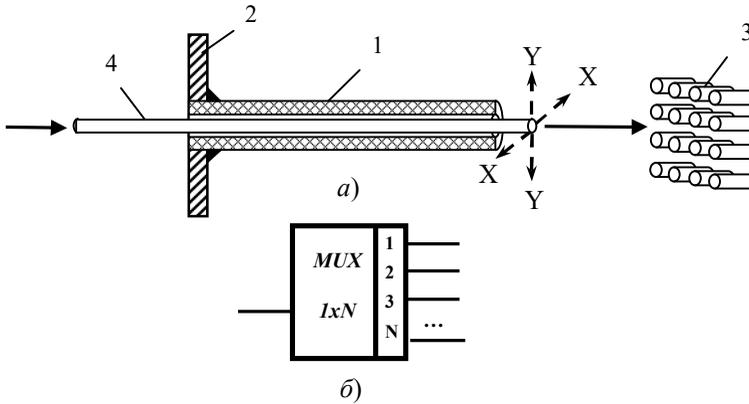


Рис. 3. Оптический мультиплексор на основе ТПЭ: *а* – конструкция; *б* – эквивалентная функциональная схема

Второй конец остается свободным и направляется в сторону пучка выходных световодов, торцы которых, снабженные коллимирующими линзами (на рисунке не показаны), образуют двухкоординатную матрицу 3.

Так как ТПЭ является полым стержнем, то через его центральную ось может быть пропущено одномодовое оптическое волокно 4 без защитных покровов, по которому в коммутатор будут поступать входные оптические сигналы.

Подавая одновременно два управляющих напряжения на противоположные пары электродов ТПЭ, можно изгибать пьезоэлемент в двух координатах, осуществляя сканирование торца входного световода в плоскости выходных портов коммутатора, как показано на рис. 2. Тем самым реализуется возможность пространственной коммутации оптического сигнала путем направления его с помощью ТПЭ в заданный порт. Очевидно, что данная конструкция на основе трубчатого пьезоэлектрического актуатора выполняет функцию мультиплексирующего $(1 \times N)$ коммутатора оптических сигналов. Инвертируя оптические входы и выходы можно получить демультиплексирующий оптический коммутатор $(N \times 1)$ без изменения конструкции устройства.

Дальнейшее развитие предложенной конструкции позволяет реализовать полнофункциональный сканирующий оптический коммутатор матричной структуры $(N \times M)$, позволяющий обеспечить любой заданный алгоритм коммутации, на основе двух ТПЭ с отрезком световода, выполняющим функцию подвижного оптического патч-корда (рис. 4).

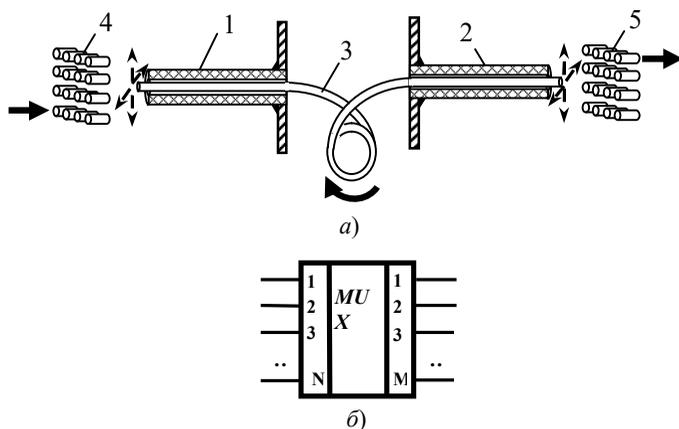


Рис. 4. Полнофункциональный ПОК на основе двух ТПЭ: а – конструкция; б – эквивалентная функциональная схема

Однако очевидный недостаток таких сборных конструкций – технологическая сложность в массовом производстве, обусловленная необходимостью обеспечения общей надежности и стабильности механических характеристик устройства в целом.

Гораздо эффективнее использовать в качестве сканирующего актуатора для оптического коммутатора не сборное изделие на основе ТПЭ, а монолитный пьезоэлемент из оптически прозрачного материала. Широко применяемые в технике кристаллы естественного кварца обладают великолепной прозрачностью, но весьма дороги. Поэтому в настоящее время в электрооптических устройствах получили распространение такие искусственные прозрачные пьезоматериалы как ниобат лития [3].

Основой монолитного сканирующего коммутатора является цилиндрический стержень 1 из прозрачного пьезоэлектрического материала, центрально закрепленный в неподвижном основании 2 (рис. 5).

Нанеся электроды на внешнюю поверхность прозрачного пьезоэлемента и прикладывая к ним два управляющих напряжения, можно осуществлять пространственную оптическую коммутацию по любому заданному алгоритму.

Основными достоинствами сканера, выполненного из монолитного прозрачного пьезокристалла, являются простота, технологичность и надежность конструкции. Кроме того улучшаются точность и по-

вторяемость позиционирования, временная и температурная стабильность параметров, уменьшаются значения гистерезиса и дрейфа вследствие остаточных пластических деформаций пьезоэлемента.

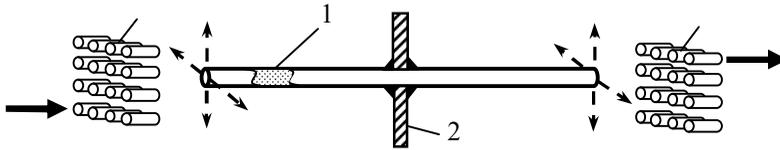


Рис. 5. Полнофункциональный ПОК на основе кристалла ниобата лития

Уменьшение температурных флуктуаций угла отклонения актуатора обеспечивается выбором материалов с минимально возможным температурным коэффициентом линейного расширения, который, в частности для пьезокерамики ЦТС-19, составляет $6 \cdot 10^{-6} \dots 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ [4]. Можно предложить также термостатирование всей конструкции коммутатора. Кроме того термостабильность актуатора можно повысить путем введения в конструкцию сканера или его держателя элементов, измеряющих и компенсирующих тепловые деформации, например, как предложено в работе [5].

Быстродействие коммутатора в значительной мере зависит от фазочастотных характеристик пьезоэлектрического актуатора. Консольное закрепление сканирующего пьезоэлемента предполагает наличие в характеристике резонансных пиков, что требует снижения рабочей частоты переключения коммутатора ниже частоты основного резонанса. Таким образом, быстродействие коммутатора будет определяться в основном линейными размерами актуатора и ограничиваться его нижней резонансной частотой.

Размеры актуатора определяют также долговременную стабильность параметров коммутатора. При больших (свыше $5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$) напряженностях приложенного электрического поля в пьезокерамике появляются признаки переполяризации, что приводит к постепенному ухудшению точности позиционирования сканера из-за снижения коэффициента пьезочувствительности материала. Простое снижения величины управляющего напряжения в данном случае неприемлемо, так как при этом уменьшается диапазон сканирования по обеим координатам, а, следовательно, и максимально достижимая размерность оптического коммутатора. Решение этой проблемы лежит в использовании сканирующих актуаторов, выполненных из недавно созданных композитных материалов, в частности, из неполярных полимеров на

основе диблоков полистирена, в которых обратный пьезоэффект проявляется в десятки раз сильнее, чем во всех известных естественных пьезокристаллах и искусственных пьезокерамиках [6]. Это позволит в десятки раз снизить размеры актуаторов при сохранении прежних величин его угловых отклонений, тем самым увеличив на порядок быстроедействие оптических коммутаторов.

Рассмотренные конструкции пьезоэлектрических коммутаторов оптических сигналов обладают существенными преимуществами перед известными электромеханическими и магнитоэлектрическими отклоняющими системами. К числу достоинств можно отнести малую потребляемая мощность, высокую механическую прочность, надежность и технологичность, а также малые габариты и стоимость.

Таким образом, сканирующие ПОК на основе пьезоэлектрических актуаторов можно с успехом применить для создания надежных и долговечных оптических коммутационных устройств в полностью оптических линиях связи судовых систем передачи информации.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. Гайворонская Г.С., Рябцов А.В. Коммутаторы оптических сигналов // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – № 2 (118). – Одеса: ОГАХ. – С. 74 – 82.

2. Неволин В.К. Основы туннельно-зондовой нанотехнологии. – М.: МГИЭТ. – 1996. – 91 с.

3. А. с. СССР № 1136636. Пьезооптическое сканирующее устройство. Авторы: Абрамов Г. А., Джагунов Р.Г., Ковригин В.А., Рябцов А.В., Якубов Р.А. Зарегистрировано 22.09.84.

4. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: справочник / Р.Г. Джагунов, А.А. Ерофеев. – СПб.: Политехника. – 1994. – 607 с.

5. А. с. СССР № 1645807. Устройство для измерения перемещений. Авторы: Джагунов Р.Г., Рябцов А.В. – Оpubл. 30.04.91. – БИ № 16.

6. Overton G. New polymer from ORNL has 10 times the piezoelectric effect of crystals and ceramics // Laser Focus World. – November 2011. – Volume 47. – Issue 11.

Аннотация – Рассмотрены вопросы использования коммутаторов оптических сигналов в судовых автоматизированных системах для повышения помехоустойчивости передаваемой информации.

Возрастание размеров судов приводит к удлинению линий связи,

что вызывает увеличение в них электромагнитных помех и наводок. Традиционные методы защиты от помех становятся неэффективными. Поэтому на судах применяют ВОЛС, где информация распространяется в виде модулированных импульсов света, что теоретически позволяет исключить влияние помех на передаваемую информацию и повысить помехоустойчивость судовых систем на магистральных участках судовых линий связи. Однако прочие участки судовых коммуникаций остаются проводными, и по-прежнему подвергаются действию помех. Использование ВОЛС на всех участках судовых линий связи пока невозможно из-за высокой стоимости оптоэлектронного коммутационного оборудования, где используется принцип двойного преобразования.

Решение заключается в применении полностью оптических коммутаторов на основе дефлекторов светового потока. Пучок света, выходя из ВОЛС, отклоняется дефлектором в нужном направлении, и попадает в другой волоконно-оптический канал. Скорость коммутации в полностью оптической системе составляет 0,5 миллисекунд, что на порядок меньше, чем в оптоэлектронных устройствах.

Проанализированы различные виды дефлекторов, применяемых для коммутации оптических сигналов. Предложены конструкции одиночных и матричных оптических коммутаторов на основе управляемых пьезоэлектрических актуаторов, изготовленных по МЭМС-технологии.

Анотація – Розглянуті питання використання комутаторів оптичних сигналів в судових автоматизованих системах для підвищення надійності інформації яка передається.

Зростання розмірів судів призводить до подовження ліній зв'язку, що викликає збільшення в них електромагнітних перешкод і наведень. Традиційні методи захисту від перешкод стають неефективними. Тому на судах застосовують ВОЛЗ, де інформація поширюється у вигляді модульованих імпульсів світла, що теоретично дозволяє виключити вплив перешкод на передачу інформацію і підвищити стійкість перед перешкодами судових систем на магистральних ділянках судових ліній зв'язку. Однак інші ділянки судових комунікацій залишаються провідними, і як і раніше піддаються дії перешкод. Використання ВОЛЗ на всіх ділянках судових ліній зв'язку поки неможливо через високу вартість оптоелектронного комутаційного обладнання, де використовується принцип подвійного перетворення.

Рішення полягає в застосуванні повністю оптичних комутаторів на основі дефлекторів світлового потоку. Пучок світла, виходячи з

ВОЛЗ, відхиляється дефлектором в потрібному напрямку, і потрапляє в інший волоконно-оптичний канал. Швидкість комутації в повністю оптичній системі становить 0,5 мілісекунд, що на порядок менше, ніж в оптоелектронних пристроях.

Проаналізовані різні види дефлекторів, що застосовуються для комутації оптичних сигналів. Запропоновано конструкції одиночних і матричних оптичних комутаторів на основі керованих п'єзоелектричних актуаторів, виготовлених за MEMS-технологією.

Annotation – The article is devoted to the usage of optical switches in ship's automated systems to increase the noise immunity of transmitted information.

Ship's sizes enlargement leads to the lengthening of communication lines. This causes the increase of noises and electromagnetic interference to the signals in cable lines. Traditional methods of interference protection are becoming ineffective. Therefore, fiber-optic communication lines (FOCL) are used onboard the ships, where information is distributed in the form of modulated light pulses. Theoretically it makes possible to eliminate the interference at all. Also it increases the noise immunity of transmitted information in the main communication lines of ship's systems. However, other sections of ship communications remain wired and are still subjected to interference. The usage of FOCL in all sections of ship communication lines is still impossible due to the high cost of optoelectronic switching equipment, where the principle of double conversion is used.

The best solution is an application of All-Optical Switches based on luminous flux deflectors. A beam of light, which is leaving the FOCL, deviates by a deflector in the desired direction, and it enters into another fiber-optic channel. The switching speed in an all-optical system is 0.5 milliseconds, which is less than in known optoelectronic devices.

The article discusses various types of deflectors used for optical signals switching. Designs of single and matrix optical switches based on controlled piezoelectric actuators manufactured by MEMS technology are proposed.