

Т.М. МАНСУРОВ, Г.И. ГУЛИЕВА, Э.Т. МАНСУРОВ

Азербайджанский технический университет, г. Баку

E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru

## РАЗРАБОТКА ФОТОННОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА КВАНТОВ И МЕТОДА РАСЧЕТА ЕГО ПАРАМЕТРОВ

*В работе обоснована необходимость согласованного включения выхода квантовой информационной системы с входом оптическим волокном, которая связана с решением проблемы по эффективному вводу максимально возможной мощности источника сигнала оптического излучения в оптическое волокно. На основе проведенного анализа разработан фотонный переключатель направления потока квантов, позволяющий сократить общее количество механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, упростить конструкцию предложенного переключателя, повысить точности процесса переключения за счет отсутствия люфтов, улучшить пусковые и тормозные характеристики пьезоэлектрического двигателя. Эксплуатационная надежность повышается за счет того, что оптические волокна каналов связи не подвергаются деформации, т.е. находятся в неподвижном состоянии, т.к. сканирование сигнала оптического излучения осуществляется путем его отражения зеркалом отражателем. Для реализации процесса переключения, связанного с перемещением зеркала отражателя с высокой скоростью, точностью, с меньшей оптической потерей и погрешностью, в качестве рабочего органа перемещения предложено применять пьезоэлектрический двигатель, обеспечивающий точное микрошаговое перемещение. Экспериментально установлено, что при вводе максимально возможной мощности сигнала оптического излучения в оптическое волокно разработанный фотонный переключатель направления потока квантов вносит оптической потери 0,8...3,0 дБ, что примерно на 45...55% меньше вносимой потери известными переключателями, при этом погрешность переключения меняется в пределах 0,0013...0.0071%. Разработанный фотонный переключатель направления потока квантов может быть применен в технике оптической связи, в системах с источником оптического излучения передаваемого сигнала и в частности в качестве устройства переключения сигналов оптического излучения.*

**Ключевые слова:** оптическое волокно, оптическое излучение, фотонный переключатель, излучения, фотоприемник, пьезоэлемент, пьезоэлектрический двигатель.

T.M. MANSUROV, G.I. GULIYEVA, E.T. MANSUROV

Azerbaijan Technical University, Baku

E-mail: tofiq-mansurov@rambler.ru

## DEVELOPMENT OF THE PHOTON DIRECTIONAL SWITCH OF THE FLOW OF QUANTA AND METHOD OF CALCULATION OF ITS PARAMETERS

*In work need of accordant connection of an exit of a quantum information system with an input optical fiber which is connected with a solution on effective input of the greatest possible power of a signal source of optical radiation in optical fiber is proved. On the basis of the carried-out analysis the photon directional switch of a flow of quanta allowing to reduce a total quantity of mechanical elements and nodes with irregular geometrical shape and a configuration, to simplify construction of the offered switch, to raise the accuracy of process of switching due to lack of backlashes, to improve starting and brake characteristics of the piezoelectric engine is developed. Operational reliability increases because optical fibers of communication channels are not exposed to deformation, i.e. are in a motionless status since scanning of a signal of optical radiation is carried out by its reflection by a mirror the reflector. For the implementation of process of switching connected with movement of a mirror of the reflector with a high speed, accuracy with smaller optical loss and an error, as an operating part of movement it is offered to use the piezoelectric engine providing exact microstep movement. It is experimentally established that at input of the greatest possible signal power of optical radiation the developed photon directional switch of a flow of quanta enters to optical fiber optical loss 0.8 ... 3.0 dB that approximately on 45 ... 55% are less than entered loss by the known switches, at the same time the error of switching changes within 0.0013 ... 0.0071%. The developed photon directional switch of a flow of quanta can be used in technology of optic communication, in systems with a source of optical radiation of the transmitted signal and in particular as the device of switching of signals of optical radiation.*

**Key word:** optical fiber, optical radiation, photon switch, radiations, photodetector, piezoelement, piezoelectric engine.

**Введение.** Необходимость согласованного включения выхода квантовой информационной системы (КИС) с оптическим волокном (ОВ) связана с решением проблемы по эффективному вводу мощности источника потока квантов в ОВ. В качестве технического средства ввода и вывода ПК в ОВ применяются различные устройства, в том числе и фотонные переключатели направления потока квантов (ФПК). Поэтому при разработке ФПК необходимо учитывать как характеристики источника и фотоприемника (ФП) потока квантов и ОВ, а также требований по обеспечению высокой скорости переключения, низкого уровня оптических потерь и перекрестных помех, слабой зависимости этих параметров от паразитных воздействий, низкого уровня потребляемой мощности, высокой надежности и технологичности. Как известно [10], ФПК разделяются на две группы, т.е. на механические, в которых переключение направление потока квантов происходит в результате движения ОВ, направляющих зеркал, призм, жидкостей и других элементов и на оптические, в которых изменение направления потока квантов происходит в результате изменения оптических параметров неподвижной среды распространения потока квантов. В настоящее время наиболее широкое применение нашли механические ФПК и в них для переключения направление потока квантов необходимо вращения зеркала отражателя с точностью порядка нескольких микро- и нанометров и менее, с

меньшей оптической потерю и с высокой скоростью. Поэтому при разработке ФПК для вращения зеркала отражателя потока квантов целесообразно применять пьезоэлектрический двигатель (ПЭД), который обеспечивает микрошаговое линейное перемещение с высокой точностью [9, 10]. С другой стороны целесообразность применения ПЭД связана с высоким разрешением с минимальной величиной шага, высокой жесткостью (толкающее усилие до 600 Н, удерживающее усилие достигает 800 Н), меньшими габаритами и массами по сравнению с электродвигателем, сохранением текущего положения в неподвижном состоянии с точностью в несколько нанометров, в том числе и при выключении питания, не созданием магнитного поля и не подверганием их воздействию, возможностью работы в условиях жесткого ультрафиолетового излучения, устойчивостью к перегрузкам и др.

Для разработки ФПК проведен анализ существующих переключателей на основе показателей, характеризующих работу этих устройств. К этим показателям относятся время переключения (в существующих устройствах 2–10 мс), оптические потери (в существующих 3–10 дБ), переходное затухание (в существующих 15–55 дБ), коэффициент ослабления переключаемого потока квантов на выходе в режиме «выключено» по сравнению с режимом «включено» (варьируются от 40–50 дБ до 10–15 дБ в зависимости от типа переключателя) и др. [1, 2; 4–8].

Целью данной работы является разработка ФПК, обеспечивающего ввод максимально возможной выходной мощности источника потока квантов в ОВ, а из ОВ в ФП с минимальной оптической потерю. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи, связанные с разработками целевой функции на основе показателей, характеризующих работу ФПК, схемы организации оптической связи, ФПК со схемой управления и аналитического метода и экспериментального определения его параметров.

**Постановка задачи.** Быстродействие, погрешность процесса переключения потока квантов зависит от сложности конструкций и технологии изготовления ФПК. Недостатком известных устройств переключения в основном является отсутствие возможности обеспечения изменение направления потока квантов на  $180^{\circ}$ , а также плавного изменения направления распространения потока квантов на угол заворота до  $90^{\circ}$ , чем и ограничиваются их функциональные возможности. Поэтому возникает необходимость в разработке и моделировании пассивных компонентов линейного тракта оптической связи, т.е. разработке ФПК с упрощенной конструкцией и схемой управления, позволяющие уменьшить погрешность переключения ОВ, уменьшить потери на отражение потока квантов, потери, связанные с радиальным смещением и угловым рассогласованием источника потока квантов и ОВ, а также расширить его функциональные возможности.

**Разработка целевой функции.** Эффективность передачи потока квантов определяется многими факторами, к числу которых можно отнести повышение эффективности использования существующих линейных сооружений, уменьшение оптической потери и дисперсионных искажений, уменьшение числа промежуточных оптических усилителей, исследование основных закономерностей процесса ввода потока квантов в ОВ. Повышение эффективности процесса ввода потока квантов в ОВ заключается в решении двух основных задач, т.е. в разработке целевой функции и определении оптимальных значений ее аргументов, которые обеспечили бы работу ФПК при экстремальных значениях целевой функции [11, 12].

Руководствуясь вышеперечисленными принципами целевую функцию можно определить в следующем виде:

$$E_{ФПК} = \{ \min [t_{пер}, \delta_{пер}, a_{он}, t_{пуск}, t_{торм}], \max [V_{ПВ}, \eta = P_{ов} / P_{ин}] \}, \quad (1)$$

где  $t_{ком}$  – время переключения;  $\delta_{ком}$  – погрешность переключения;  $a_{он}$  – оптические потери;  $t_{пуск}$  – время пуска ПЭД;  $t_{торм}$  – время торможения ПЭД;  $V_{ПВ}$  – скорость перемещения вала ПЭД (скорость переключения);  $\eta = P_{ов} / P_{ин}$  – коэффициент ввода мощности источника потока квантов в ОВ, где  $P_{ов}$  – введенная мощность потока квантов в ОВ;  $P_{ин}$  – выходная мощность источника потока квантов.

**Схема организации оптической связи.** Схема организации оптической связи с применением фотонного переключателя направления потока квантов приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема организации оптической связи с фотонным переключателем направления потока квантов

Схема организации оптической связи состоит из передающего (ПОП) и приемного (ПрОП) оконечного пункта, промежуточного пункта (ПП) и оптического кабеля (ОК). В свою очередь, каждый оконечный пункт состоит из КИС, ФПК, а ППП из двух ФПК и волоконно-оптического усилителя (ВОУ). ВОУ, легированном ионами эрбия применяется на трассе ОК для восстановления уровня потока квантов. Преимуществом эрбиевых усилителей является отсутствие преобразования в электрический сигнал, возможность одновременного усиления сигналов с разными длинами волн, практически точное

соответствие рабочего диапазона эрбиевых усилителей области минимальных оптических потерь на основе кварцевого стекла, сравнительно низкий уровень шума и простота включения в КИС.

**Разработка ФПК.** Как показал анализ [2–6], известные переключатели включают в себя сравнительно большое количество механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, усложняющих их конструкцию. В связи с этим данные устройства не обеспечивают необходимую точность переключения направления потока квантов, т.к. из-за сравнительно большой массы вращающегося диска переключателя обладает инерционностью. С другой стороны, после остановки механического узла продвижения, ввиду имеющихся люфтов, точность переключения, сканирования потока квантов уменьшается, что приводит к частичной потере энергии потока квантов. Из-за того, что в известных конструкциях этих устройств ОВ, служащие каналом оптической связи, находятся в подвижном состоянии, что и уменьшает эксплуатационную надежность.

Известен разветвитель с расщеплением пучка оптического излучения [1], который содержит зеркало отражатель, расположенное под углом  $45^{\circ}$  к оси потока квантов, фокусирующую линзу, волоконные световоды, установленные под углом  $90^{\circ}$  относительно друг друга. Данный разветвитель не обеспечивает изменение направления потока квантов в противоположную сторону, а также плавное изменение направления на угол до  $90^{\circ}$ , чем и ограничиваются функциональные возможности.

Необходимость такого изменения направления потока квантов связана с тем, что при монтаже и прокладке ОК требуется изменение направления укладки на угол заворота до  $90^{\circ}$ . Оптические волокна, являющиеся световодом и составляющие основу ОК имеет достаточно хрупкую структуру материала ОВ. Поэтому при значениях угла заворота и изгибах ОК менее  $120^{\circ}$  способствует появлению микротрещин на ОВ, за счет чего увеличивается потери мощности потока квантов в целом. В известном устройстве минимальный угол заворота разветвителя составляет не менее  $120^{\circ}$  и при этом потери составляют  $0,5...1,2$  дБ.

Для достижения поставленной цели в разветвитель, содержащий зеркало отражатель, расположенное под углом  $45^{\circ}$  к оси излучателя, фокусирующую линзу, ОВ, установленные под углом  $90^{\circ}$  относительно друг друга, дополнительно введены пьезоэлектрический двигатель, операционный усилитель (ОУ), счетное устройство (СУ), схема сравнения (СС), блок выборки (БВ), логический ключ (ЛК), генератор переменного тока (ГПТ), электронный ключ (ЭК), триггер (Т), светодиод (СД) и фотодиод (ФД), при этом отражатель потока квантов выполнен в виде плоского двухстороннего зеркала отражателя, закрепленного на оси вращения с цилиндрической поверхностью, к которой под углом  $45^{\circ}$  прижат пьезоэлемент для пошагового вращения, а сама цилиндрическая поверхность имеет сквозные радиальные отверстия, проходящие через центр оси вращения, причем с одной стороны отверстий установлен светодиод, а с другой стороны фотодиод, электрические контакты которого через операционный усилитель, счетное устройство, схему сравнения, логический ключ и триггер соединены с управляющим входом электронного ключа, сигнальный вход и выход которого соединены соответственно к выходу генератора переменного тока и к электродам пьезоэлемента, а выход блока выборки подключен ко второму входу схемы сравнения.

Выполнение отражателя потока квантов в виде плоского двухстороннего зеркала, закрепленного на оси вращения вала с цилиндрической поверхностью, к которой под углом  $45^{\circ}$  прижат пьезоэлемент пошагового вращения, а также наличие на цилиндрической поверхности валика сквозных радиальных отверстий, проходящих через центр оси вращения, с одной стороны которых установлен светодиод, с другой стороны фотодиод, электрические контакты которого соединены со схемой управления, выполняющей функцию подсчета импульсов при вращении валика, при совпадении числа импульсов от изменения местоположения отверстий валика и от блока выборки срабатывает схема сравнения, при этом происходит отключение питания пьезоэлектрического двигателя и торможение валика с зеркалом отражателем, и следовательно, его переключения на заданное изменение направления потока квантов [2].

На рис. 2 приведена схема конструкции фотонного переключателя потока квантов со схемой управления (СхУ), а на рис. 3 показан вид сверху фотонного переключателя потока квантов.

**Принцип работы.** Сравнение частоты импульсов на выходе счетного устройства 11 с образцовой частотой блока выборки 13 производится схемой сравнения 12 и при совпадении числа импульсов от изменения местоположения отверстий 23 вала 22 и блока выборки 13 на выходе схемы сравнения 12 формируется сигнал, поступающий через логический ключ 14 на второй управляющий вход триггера 17, который переводится в другое устойчивое состояние. При этом импульс напряжения с выхода триггера 17 воздействуя на управляющий вход электронного ключа 16 способствует прерыванию цепи генератора переменного тока 15 и прекращению подачи напряжения питания на электроды пьезоэлемента 9, которое приводит к мгновенному торможению и остановке ПЭД.

В предложенном ФПК (рис. 1) оптические кабели 2, 4, 5, 6, 7, 8 и 24 могут работать как в режиме передатчика, так и в режиме приемника потока квантов. Согласно положению зеркала отражателя 1 сигнал ОИ с оптического кабеля 2 через фокусирующую линзу 3 попадая на зеркало отражатель 1 через фокусирующую линзу 3 переключается в ОВ оптического кабеля 4. При необходимости изменения направления распространения потока квантов, его переключения с оптического кабеля 4 на оптический кабель 24, зеркало отражатель 1 (рис. 2) перемещается по часовой стрелке на угол  $90^{\circ}$  (новое положение направляющего зеркала 1 на рис. 3 условно показано пунктирными линиями) и ФПК изменяет направления потока квантов. Управление ФПК передаваемого потока квантов позволяет обеспечить изменение

направления потока квантов в противоположную сторону, а также плавное изменение направления на угол  $90^\circ$  и тем самым расширить функциональные возможности разработанного ФПК.

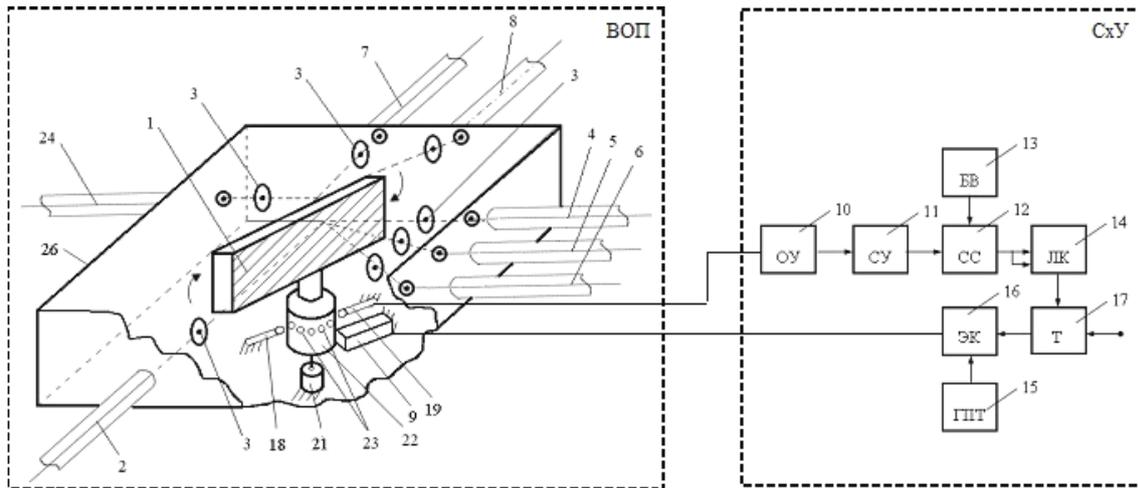


Рис. 2. Схема конструкции фотонного переключателя направления потока квантов со схемой управления

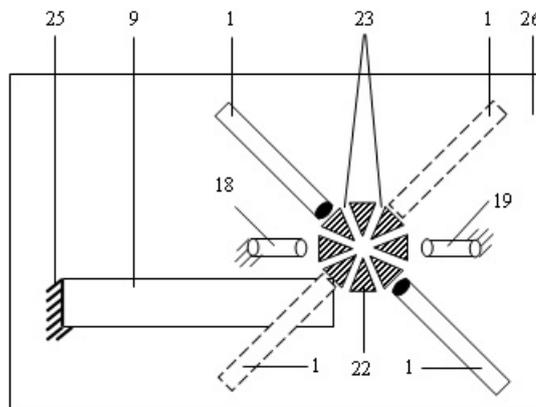


Рис. 3. Вид сверху фотонного переключателя направления потока квантов

Так как в конструкции предусмотрено жесткое крепление зеркала отражателя 1 потока квантов на валу -22 пьезоэлектрического двигателя 9 в предложенном устройстве точность изменения направления потока квантов определяется точностью юстировки установки ОВ, отверстий 23 вала 22, а точность переключения направления распространения потока квантов зависит от точности остановки вала 22 пьезоэлектрического двигателя -9 после его торможения. В работе разработан аналитический метод определения параметров ПЭД и полученные результаты проверены экспериментальным исследованием.

**Аналитический метод определения параметров ФПК.** Номинальный момент на валу пьезоэлектрического двигателя можно определить по формуле:

$$M_H = F_T \cdot R, \quad (\text{Н}\cdot\text{м}) \quad (1)$$

где  $F_T$  – максимальное тангенциальное усилие на пьезоэлемент, действующее на вал пьезоэлектрического двигателя (Н);  $R$  – радиус вала пьезоэлектрического двигателя и равен  $14 \cdot 10^{-3}$  (м).

Максимальное тангенциальное усилие на пьезоэлемент определяется следующим выражением:

$$F_T = U_{\text{возб}} \cdot l_2 \cdot d_{31} \cdot E_{\text{ю}} \cos \alpha. \quad (\text{Н}) \quad (2)$$

где  $U_{\text{возб}} = 200\text{В}$  – напряжение питания генератора переменного тока;  $l_2 = 1 \cdot 10^{-2}$  м – толщина пьезоэлемента;  $d_{31} = 160 \cdot 10^{-12}$  (м/В) – пьезоэлектрический модуль пьезокерамики;  $E_{\text{ю}}$  – модуль Юнга (модуль продольной упругости), т.е. физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться растяжению, сжатию при упругой деформации и для пьезокерамики марки ЦБТС-3 равен  $0,7 \cdot 10^{11}$  (Н/м<sup>2</sup>);  $\alpha = 45^\circ$  – угол наклона пьезоэлемента к валу вращения пьезоэлектрического двигателя.

Учитывая уравнение (2) в уравнении (1) получим следующее выражение:

- для пьезокерамики

$$M_1 = U_{\text{возб}} \cdot l_2 \cdot d_{31} \cdot E_{\text{ю}} \cos \alpha \cdot R, \quad (\text{Н}\cdot\text{м}) \quad (3)$$

- для пружин

$$M_2 = F_{\text{np}} \cdot R, \quad (\text{Н}\cdot\text{м}) \quad (4)$$

где  $F_{np}$  – прижимное усилие пружин (Н).

Общий момент, создаваемый тангенциальной силой и силой пружин, действующий на вал пьезоэлектрического двигателя определяется следующим образом:

$$M = M_1 + M_2, \text{ (Н·м).}$$

Амплитуда смещения рабочего конца пьезоэлемента в форме призмы с учетом допустимого уровня возбуждения определяется по следующей формуле:

$$\Delta = \frac{2T_u l_1}{\pi E_{ю}}, \text{ (м)} \quad (4)$$

где  $l_1 = 4,1 \cdot 10^{-2}$  м – длина пьезоэлемента;  $T_u$  – максимально допустимое механическое напряжение (Н/м<sup>2</sup>).

Максимально допустимое механическое напряжение определяется следующим выражением:

$$T_u = U_{дон} \cdot d_{31} \cdot Q_m \cdot E_{ю}, \quad (5)$$

где  $U_{дон} = 12500$  В/м – допустимое значение напряженности электрического поля;  $Q_m$  – механическая добротность пьезоэлемента, т.е. количественная характеристика резонансных свойств колебательных систем, указывающая во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний на частоте много ниже резонансной при одинаковой амплитуде возбуждающей силы,  $Q_m = 200$  ед – для пьезоэлемента марки ЦБТС-3 в свободном (незакрепленном) состоянии и  $Q_m = 40$  ед – в закрепленном состоянии ввиду механических потерь.

Учитывая уравнение (5) в уравнении (4) для определения амплитуды смещения рабочего конца пьезоэлемента получим следующее уравнение:

$$\Delta = \frac{2U_{дон} \cdot d_{31} \cdot Q_m \cdot l_1}{\pi}, \text{ (м).} \quad (6)$$

Скорость перемещения вала пьезоэлектрического двигателя в шаговом режиме работы определяется следующим образом:

$$V_{ВП} = \Delta \cdot f_p \cdot \cos \alpha \cdot K, \text{ (м/с)} \quad (7)$$

где  $f_p = 42 \cdot 10^3$  Гц – резонансная частота питающего напряжения,  $K = 0,14 \div 0,26$  – поправочный коэффициент скорости перемещения вала пьезоэлектрического двигателя (определяется экспериментальным путем с учетом проскальзывания рабочего конца пьезоэлемента относительно поверхности вала пьезоэлектрического двигателя).

Время, необходимое для пуска и установления механических колебаний пьезоэлемента определяется следующим образом:

$$t_{пуск} = 1,47 \cdot \frac{Q_m}{f_p} = 1,47 \cdot \frac{40}{42000} = 1,4 \cdot 10^{-4}, \text{ (с).}$$

**Экспериментальное исследование.** Схема экспериментальной установки исследования параметров ФПК фотонного переключателя направления потока квантов приведена на рис. 4.

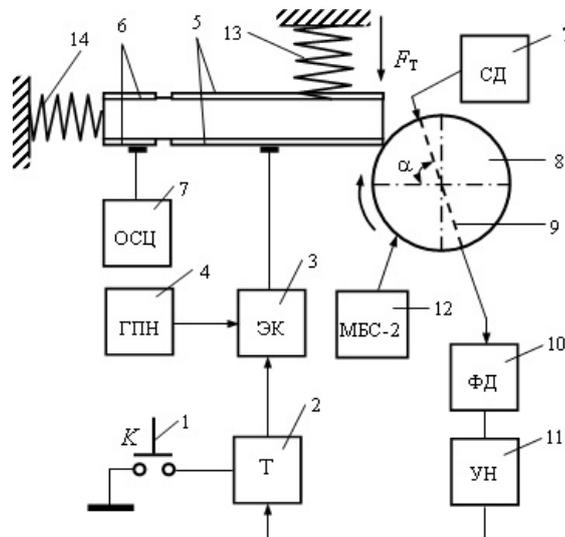


Рис. 4. Схема экспериментальной установки исследования параметров ФПК

Запуск ПЭД осуществляется с помощью кнопки “Пуск” (К) 1, в результате чего триггер (Т) 2 переводится в другое устойчивое состояние и открывается электронный ключ (ЭК) 3, при этом переменное

напряжение с резонансной частотой  $f_p$  с выхода генератора переменного напряжения (ГПН) 4 поступает на первую секцию электродов 5 возбуждения (рис. 4). После запуска ПЭД за время  $t_{пуск}, i = \overline{1,5}$  (рис. 5) механические колебания первой секции 5 подаются на вторую секцию 6 электродов. Вторая секция 6 электродов работает в режиме датчика и формирует сигналы, которые подаются на вход осциллографа (ОСЦ) 7.

Вал 8 пьезоэлектрического двигателя начинает вращаться до попадания потока квантов с выхода светодиода (СД) 7 через сквозное радиальное отверстие 9 на валу 8 на фотодиод (ФД) 10. При этом электрический сигнал с выхода фотодиода 10 через усилитель напряжения (УН) 11 поступает на управляющий вход триггера 2 и переводит его в другое устойчивое состояние и электронный ключ 3 отключает подачу напряжения питания с выхода генератора переменного напряжения 4 и секция электродов 5 возбуждения обесточиваются.

**Результаты экспериментальных исследований.** Во время проведения экспериментов для построения зависимости питающего напряжения от времени пуска и торможения вала при скорости вращения вала в диапазоне  $5 \cdot 10^{-3} \dots 88 \cdot 10^{-3}$  м/с и силы прижима на вал ПЭД в пределах 1,3...4,1 Н (соответственно момента прижима 0,248...0,288 Н·м). В этом случае точность остановки вала фиксировалась с бинокулярным стереоскопическим микроскопом 12 типа МБС-12, применяемым в различных областях науки и техники. В этом случае после остановки ПЭД максимальное отклонение составляет 0,5...1,0 мкм, а погрешность переключения – 0,13...0,71%. Поскольку диаметр одномодового ОВ составляет 8...10 мкм, т.е. 70...80% сканируемого потока квантов, отражаемого от зеркала отражателя вполне приемливо по точности остановки вала ПЭД и достигается за счет безлюфтности, а также регулирования силы прижима пружин 13, 14 и напряжения возбуждения пьезоэлемента. Потери, связанные с гистерезисом пьезокерамики незначительны, т.к. работа ПЭД осуществляется в микрошаговом режиме с остановками при минимальных скоростях перемещения.

По результатам проведенных экспериментальных исследований получены численные значения исследуемых параметров ПЭД, которые приведены в табл. 1

Таблица 1

**Численные значения параметров ПЭД**

№	Характеристики	Численные значения				
		1,3	2,7	3,3	3,7	4,1
1.	Сила прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД, $F_{пр}$ (Н)	1,3	2,7	3,3	3,7	4,1
2.	Момент, создаваемый тангенциальной силой, $M_1$ (Н·м)	0,23				
3.	Момент, создаваемый силой пружин, $M_2$ (Н·м)	0,018	0,038	0,046	0,052	0,058
4.	Момент, создаваемый тангенциальной силой и силой пружин, действующий на вал ПЭД, $M$ (Н·м)	0,248	0,268	0,276	0,282	0,288
5.	Время пуска ПЭД, $t_{пуск} \cdot 10^{-3}$ (с)	1,4				
6.	Время торможения ПЭД, $t_{торм} \cdot 10^{-3}$ (с)	18	8	1,2	0,5	0,07

По результатам проведенных экспериментальных исследований построены зависимости изменения питающего напряжения от времени пуска и торможения вала при различных значениях момента прижима пьезоэлемента на рабочий орган, действующих на вал ПЭД, которые показаны на рис. 5. Как видно из построенных зависимостей после запуска ПЭД минимальное время торможения вала ПЭД соответствует зависимости  $u_5 = f(t_{торм5})$ , при котором момент прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД соответствует значению  $M_{общ5} = 288 \cdot 10^{-3}$  (Н·м).

На основе полученных экспериментальных данных построены зависимости  $t_{торм} = f(M_{общ})$  – зависимость времени торможения ПЭД от общего момента прижима пьезоэлемента на рабочий орган (рис. 6). На основе полученных экспериментальных данных построены зависимости  $t_{торм} = f(M_{общ})$  – зависимость времени торможения ПЭД от общего момента прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД (рис. 6).

Из рис. 6 видно, что при увеличении момента прижима пьезоэлемента к рабочему органу ПЭД до значения  $M_{общ} = 1,62$  Н·м время торможения ПЭД имеет минимальное значение, т.е.  $t_{торм} = 0,07 \cdot 10^{-3}$  с, затем при последующем увеличении момента прижима происходит резкое снижение скорости, время торможения имеет минимальное значение, т.к. усилие воздействия на рабочий орган со стороны пьезоэлемента в режиме торможения и остановки имеет максимальное значение.

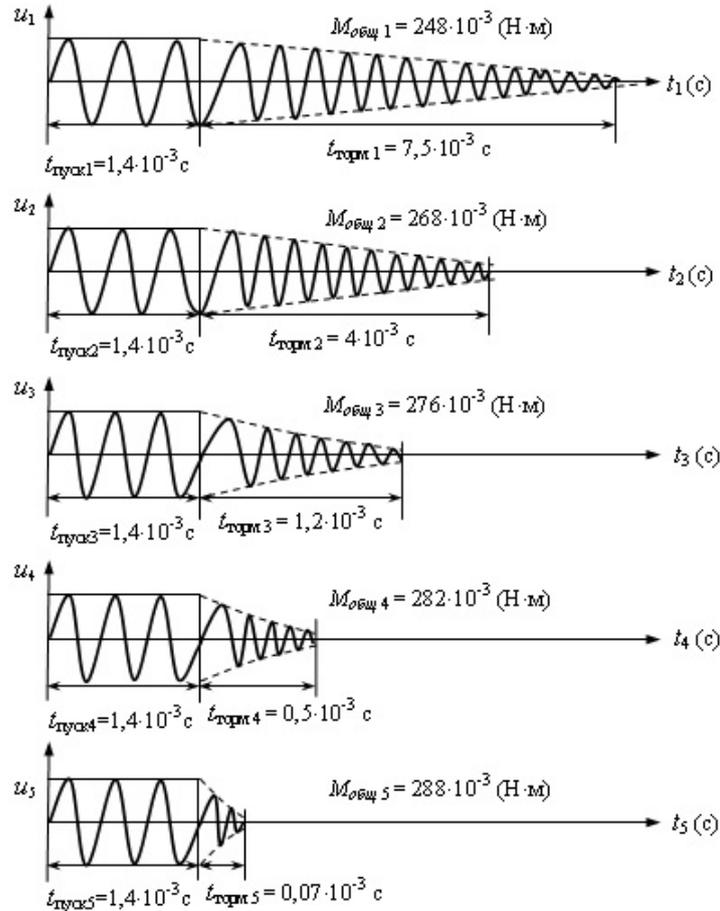


Рис. 5. Зависимости изменения напряжения от времени пуска и торможения вала при различных значениях момента прижима пьезоэлемента на вал ПЭД

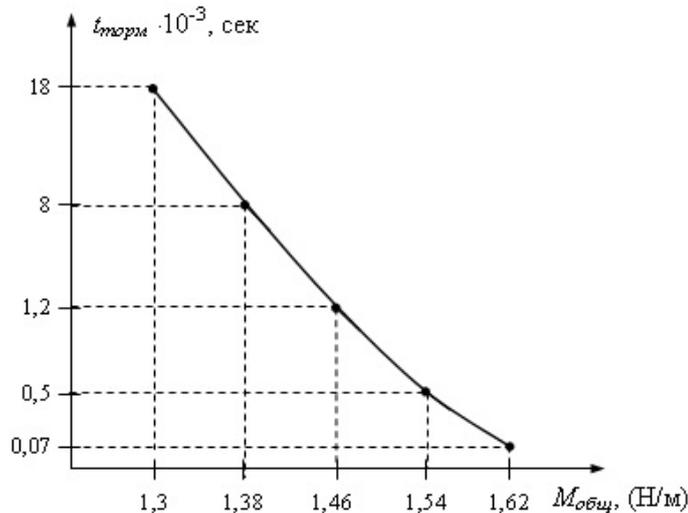


Рис. 6. Зависимость времени торможения ПЭД от общего момента прижима пьезоэлемента на рабочий орган

При проведении экспериментов по определению скорости перемещения вала ПЭД в зависимости от общего момента прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД значение момента изменялось в диапазоне от 0,3 Н/м до 1,6 Н/м. По результатам проведенных экспериментальных исследований получены значения скорости перемещения вала ПЭД и приведены в табл. 2

Таблица 2

**Численные значения скорости перемещения вала пьезоэлектрического двигателя**

№	Характеристики	Численные значения						
		0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,6	1,68
1.	Момент прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД, $M_{общ}$ (Н·м)	0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,6	1,68
2.	Скорость перемещения вала ПЭД, $V_{ПВ} \cdot 10^{-3}$ (м/с)	100	88	71	55	37	7	0

На основе полученных экспериментальных данных построена зависимость скорости перемещения вала от действующего момента на вал ПЭД, которая представлена на рис. 7.

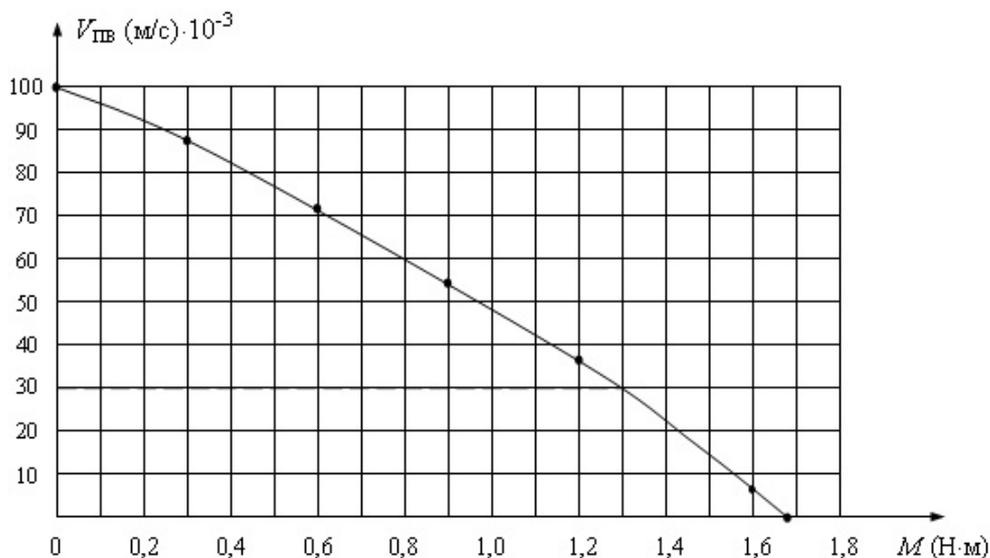


Рис. 7. Зависимость скорости перемещения вала в зависимости от момента, действующего на вал ПЭД

По результатам проведенных экспериментальных исследований получены численные значения погрешности соответственно в зависимости от силы прижима пьезоэлемента на рабочий орган пьезоэлектрического двигателя, которые даны в табл. 3.

Таблица 3

**Значения погрешности от силы прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД**

№	Характеристики	Численные значения				
		1,3	2,7	3,3	3,7	4,1
1.	Сила прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД, $F_{np}$ (Н)					
2.	Погрешность ФПК, $\delta$ (%)	0,0071	0,0067	0,0054	0,0031	0,0013

Для определения точности переключения на основе полученных экспериментальных данных построены зависимости  $\delta = f(F_{np})$  – зависимость относительной погрешности процесса переключения от силы прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД (рис. 8).

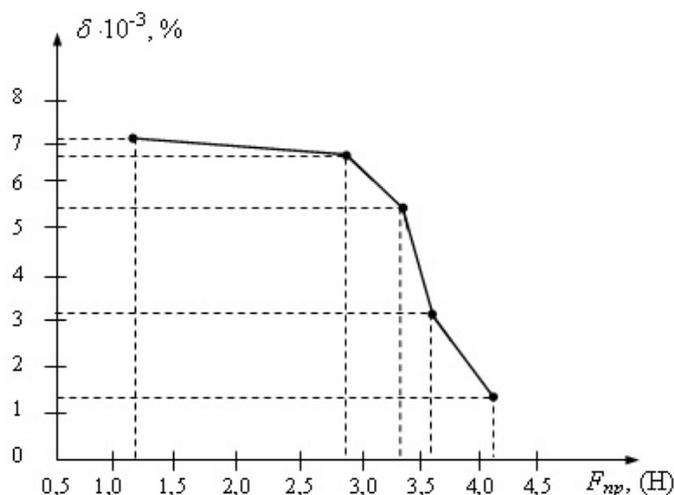


Рис. 8. Зависимость относительной погрешности процесса переключения от силы прижима пьезоэлемента на рабочий орган ПЭД

Из рис. 8 видно, что по мере увеличения силы прижима пьезоэлемента к рабочему органу ПЭД до значения  $F_{np} = 4,1$  Н, при этом погрешность процесса переключения имеет минимальное значение, т.е.  $\delta = 0,0013\%$ , затем при последующем увеличении силы прижима происходит резкое снижение скорости, точность процесса переключения имеет максимальное значение, т.к. усилие воздействия на рабочий орган со стороны пьезоэлемента в режиме торможения и остановки имеет максимальное значение.

Из полученных экспериментальных результатов видно, что основные характеристики

пьезоэлектрического двигателя, т.е. амплитуда смещения, скорость перемещения конца рабочего органа пьезоэлемента, силы прижима, момент прижима, скорость перемещения вала, время пуска и торможения, погрешность переключения рабочего органа сходится с теоретическими результатами и расхождение с экспериментом имеет минимальное значение.

**Заключение.** Таким образом, на основе проведенного анализа разработан волоконно-оптический переключатель, позволяющий сократить общее количество механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, упростить конструкцию предложенного переключателя, повысить точности процесса переключения за счет отсутствия люфтов, улучшить пусковые и тормозные характеристики пьезоэлектрического двигателя. Эксплуатационная надежность повышается за счет того, что оптические волокна каналов связи не подвергаются деформации, т.е. находятся в неподвижном состоянии, т.к. сканирование сигнала оптического излучения осуществляется путем его отражения зеркалом отражателем.

Для реализации процесса переключения, связанной с перемещением зеркала отражателя с высокой скоростью, точностью, с меньшей оптической потерей и погрешностью, в качестве рабочего органа перемещения предложено применять пьезоэлектрический двигатель, обеспечивающий точное микрошаговое перемещение.

Экспериментально установлено, что при вводе максимально возможной мощности потока квантов в оптическое волокно разработанный волоконно-оптический переключатель вносит оптической потери 0,8...3,0 дБ, что примерно на (45...55)% меньше вносимой потери известными переключателями, при этом погрешность переключения меняется в пределах 0,0013...0,0071%.

Разработанный волоконно-оптический переключатель может быть применен в технике оптической связи, в системах с источником излучения передаваемого сигнала и в частности в качестве устройства переключения сигналов оптического излучения. Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда развития науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № EIF-BGM-3-BRFTF-2+/2017-15/07/1.

### Литература

1. Mansurov T.M. Design and modeling of passive components of linear path of optical communication / T.M. Mansurov, Ch.P. Aliev, S.A. Dzhebrailova // Thomson Reuters ENDNOTE. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 6<sup>th</sup> November 2016. – Vol. 5, Iss. 11. – P. 226–233. – ISSN 2277-9655.
2. Оптоэлектронный переключатель направления излучения : патент на изобретение № І 2007 0216, 27.11.2007. МКР G02V 6/00, G02V, 6/38; G02F 3/00; N03K 3/42 / Т.М. Мансуров, Г.Б. Бейбалаев // Промышленная собственность : официальный бюллетень Государственного комитета по стандартизации, метрологии и патенту. – Баку, 2007. – № 1. – 19 с.
3. Оптоэлектронный переключатель направления излучения : патент на изобретение № І 2014 0062, 23.10.2014. МКР G02V 6/00, G02V, 6/38; G02F 3/00; N03K 17/79 / Т.М. Мансуров, И.А. Мамедов // Промышленная собственность : официальный бюллетень Государственного комитета по стандартизации, метрологии и патенту. – Баку, 2013. – № 4. – 12 с.
4. АС СССР № 1322850 А1. МКИ G02B -6/38 от 22.04.85. Электромеханический переключатель оптических волокон.
5. АС СССР № 1351416, кл. G 02 В - 6/02, 1986. Оконечное устройство.
6. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи / Гроднев И.И. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1990. – 224 с.
7. Алишев Я.В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона / Алишев Я.В. – Минск : Высшая школа, 1986. – 236 с.
8. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / Иванов А.Б. – М. : Компания Сайрус системс, 1999. – 664 с.
9. Смажеская В.Г. Пьезоэлектрическая керамика / Смажеская В.Г., Фельдман Н.В. – М. : Сов. радио, 1971. – 200 с.
10. Бутусов М.М. Волоконная оптика и приборостроение / Бутусов М.М., Галкин С.Л., Орбинский С.П. – Л. : Машиностроение, 1987. – 328 с.
11. Зеневич А.О. Квантовые информационные системы / Зеневич А.О., Мансуров Т.М. – Минск : Изд-во БГАС, 2019. – 280 с.
12. Mansurov T.M. Criteria for evaluation of characteristics of photon switchboards of optical signals and optical fibers for the quantum systems of transfer of confidential information / T.M. Mansurov, Ch.P. Aliyev, E.T. Mansurov // IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PIC S&T-2018), Kharkov (Ukraine), 9–12 October 2018. – P. 378–382.

## References

1. Mansurov T.M. Design and modeling of passive components of linear path of optical communication / T.M. Mansurov, Ch.P. Aliev, S.A. Dzhebrailova // Thomson Reuters ENDNOTE. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 6th November 2016. – Vol. 5, Iss. 11. – R. 226–233. – ISSN 2277-9655.
2. Optoelektronnyj pereklyuchatel napravleniya izlucheniya : patent na izobrenenie № I 2007 0216, 27.11.2007. MKP G02V 6/00, G02V, 6/38; G02F 3/00; N03K 3/42 / T.M. Mansurov, G.B. Bejbalaev // Pro-myshlennaya sobstvennost : oficialnyj byulleten Gosudarstvennogo komiteta po standartizacii, met-rologii i patentu. – Baku, 2007. – № 1. – 19 s.
3. Optoelektronnyj pereklyuchatel napravleniya izlucheniya : patent na izobrenenie № I 2014 0062, 23.10.2014. MKP G02V 6/00, G02V, 6/38; G02F 3/00; N03K 17/79 / T.M. Mansurov, I.A. Mamedov // Pro-myshlennaya sobstvennost : oficialnyj byulleten Gosudarstvennogo komiteta po standartizacii, met-rologii i patentu. – Baku, 2013. – № 4. – 12 s.
4. AC SSSR № 1322850 A1. MKI G02V -6/38 ot 22.04.85. Elektromehaničeskij pereklyuchatel optičeskikh volokon.
5. AS SSSR № 1351416, kl. G 02 V - 6/02, 1986. Okonečnoe ustrojstvo.
6. Grodnev I.I. Volokonno-optičeskie linii svyazi / Grodnev I.I. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Radio i svyaz, 1990. – 224 s.
7. Alishev Ya.V. Mnogokanalnye sistemy peredachi optičeskogo diapazona / Alishev Ya.V. – Minsk : Vyshej-shaya shkola, 1986. – 236 s.
8. Ivanov A.B. Volokonnaya optika: komponenty, sistemy peredachi, izmereniya / Ivanov A.B. – M. : Kompaniya Sajrus systems, 1999. – 664 s.
9. Smazhevskaya V.G. Pezoelektričeskaya keramika / Smazhevskaya V.G., Feldman N.V. – M. : Sov. radio, 1971. – 200 s.
10. Butusov M.M. Volokonnaya optika i priborostroenie / Butusov M.M., Galkin S.L., Orobinskij S.P. – L. : Mashinostroenie, 1987. – 328 s.
11. Zenevich A.O. Kvantovye informacionnye sistemy / Zenevich A.O., Mansurov T.M. – Minsk : Izd-vo BGAS, 2019. – 280 s.
12. Mansurov T.M. Criteria for evaluation of characteristics of photon switchboards of optical signals and optical fibers for the quantum systems of transfer of confidential information / T.M. Mansurov, Ch.P. Aliyev, E.T. Man-surov // IEEE International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PIC S&T-2018), Kharkov (Ukraine), 9–12 October 2018. – R. 378–382.

Рецензія/Peer review : 15.05.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. В.А. Касымов