

УДК 621.391.63: 621.395 (075)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМ ЛУЧОМ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Т. М. Мансуров, зав. каф. Азербайджанского технического университета, д.т.н., tofig-mansurov@rambler.ru

Г. Б. Бейбалаев, генеральный директор ГП «Азерпочт» Министерства связи и информационных технологий Азербайджана, к.т.н.

Ключевые слова: оптическое волокно, система связи, световод, оптический сигнал, оптоэлектронный переключатель, разветвитель, пьезоэлектрический двигатель.

Введение. Бурное развитие оптоэлектроники, успехи в области создания стеклянных волокон с высокими оптическими характеристиками и перспективных оптических систем связи (ОСС) позволяют расширить услуги связи, снизить трудо- и материалоемкость в отрасли. Большое внимание к ОСС и оптическим кабелям вызвано их широкополосностью, высокой пропускной способностью, малым затуханием в широком диапазоне частот, высокой защищенностью от внешних электромагнитных помех, малогабаритностью, низкой трудоёмкостью прокладки по реальным трассам.

Одна из основных особенностей ОСС — необходимость использования устройств пространственного управления оптическим излучением является следствием высокой направленности излучения лазеров. Эта особенность обуславливает необходимость высокой точности позиционирования оптических лучей, т. е. ввода максимальной энергии выходного сигнала ОСС в оптическое волокно (ОВ) в местах механического соединения. Поэтому работа системы должна строиться на принципе слежения, что позволяет достичь максимально возможной точности позиционирования.

В современных ОСС в качестве устройств позиционирования оптического сигнала в основном используются оптические коммутаторы, оптоэлектронные устройства позиционирования, оптоэлектронные переключатели (ОП) направления излучения, дефлекторы и модуляторы с электрическим и оптическим управлением [1—4].

Постановка задачи. Одной из основных проблем, возникающих при передаче *выходных* сигналов по оптической линии, является исследование основных закономерностей ввода оптического сигнала в световод, юстировки оптических систем со световодами. Это позволяет расширить функциональные возможности устройств управления оптическим лучом, т. е. ОП. Проблема ввода энергии оптического сигнала осложняется отсутствием координат расположения передающего, приемного устройств и ОВ, т. е. существует угловое несовпадение положения между ними.

В процессе передачи информации задача поиска, наведения и слежения за лучом требует достаточно быстрого изменения направления луча по некоторому периодическому (поиск) или аperiodическому (слежение) закону. Поэтому возникает необходимость в разработке устройства и схемы управления, обеспечивающих автоматическое совмещение осей передатчика и приемника. Кроме того, необходимо упростить конструкцию (ОП), повысить точность позиционирования оптического луча, эксплуатационную

надёжность, а также расширить его функциональные возможности.

Методы и устройства управления оптическими сигналами. По характеру движения оптического луча различают *непрерывные* и *дискретные* методы управления, а по физическим принципам управления — *механические* и *электрические* [2].

Механические методы управления оптическим сигналом осуществляются путем механического перемещения управляющего элемента (зеркала, призмы и т.п.). Для этого используются электромагнитные, магнитоэлектрические и пьезоэлектрические ОП направления излучения.

Электрические методы управления оптическим сигналом реализуются путем изменения коэффициента преломления среды, через которую проходит луч при воздействии электрических (или магнитных полей). В настоящее время для этого применяются ультразвуковые (акустооптические), электрооптические, поляризационные (в том числе магнитооптические) и дисперсионные (инжекционные) дефлекторы.

Механические ОП обеспечивают большие отклонения луча (единицы радиан), практическое отсутствие потерь, минимальные искажения, высокую точность.

Пьезоэлектрические ОП относятся к устройствам с электромеханическим управлением. Для отклонения светового луча применяются небольшие легкие зеркала, механически перемещаемые с помощью обратного пьезоэлектрического эффекта, возникающего в некоторых кристаллах (титанат бария и др.) при воздействии на них управляющего электрического поля. Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в сжатии, растяжении или возникновении деформации сдвига в этих кристаллах при воздействии электрического поля в определенном направлении по отношению к электрической оси кристалла.

Разработка ОП. Как показал анализ [2, 3], ОП состоят из сравнительно большого количества механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, усложняющих их конструкцию. Они не обеспечивают высокой точности позиционирования лучевого сигнала, поскольку ввиду сравнительно большой массы вращающего диска имеют большую инерционность. После остановки механического узла продвижения из-за имеющихся люфтов точность позиционирования сканирования луча уменьшается, приводя к частичной потере энергии излучения передаваемого сигнала. Из-за того, что оптические жилы световодов, служащие каналом связи, находятся в подвижном состоянии эксплуатационная надёжность такой конструкции невысока.

Известен разветвитель с расщеплением пучка излучения [4], который содержит зеркало-отражатель, расположенное под углом 45° к оси излучателя, фокусирующую линзу, во-

локонные световоды, установленные под углом 90° относительно друг друга. Недостатком данного устройства является то, что он не может обеспечить изменение направления излучения в противоположную сторону, а также плавное изменение направления на угол 90° . Это ограничивает функциональные возможности разветвителя.

Требуемое изменение направления излучения связано с тем, что в ряде случаев на практике при необходимости монтажа и прокладки оптических кабелей следует изменить направления укладки кабелей на угол заворота до 90° . Стекловолокно, являющееся световодом и составляющее основу указанных кабелей, имеет достаточно хрупкую структуру материала стекловолокна. Поэтому угол заворота и изгиба менее 120° способствует появлению микротрещин на стекловолокне, выполняющем функцию световода. За счет этого увеличиваются потери мощности излучения в целом. В известном устройстве минимальный угол заворота разветвителя составляет не менее 120° , а потери — от 0,5 до 1,2 дБ [4].

Цель статьи — исследование ОП с расширенными функциональными возможностями. При этом ОП, содержащий зеркало-отражатель, расположенное под углом 45° к оси излучателя, фокусирующую линзу, волоконные световоды, установленные под углом 90° относительно друг друга, снабжен шаговым двигателем, операционным усилителем, счетным устройством, схемой сравнения, блоком выборки, логическим ключом, генератором переменного тока, электронным ключом, триггером, светодиодом и фотодиодом.

Отражатель оптического луча выполнен в виде плоского двухстороннего зеркала, закрепленного на оси вращения с цилиндрической поверхностью, к которой под углом 45° прижат пьезокерамический элемент шагового двигателя, а сама цилиндрическая поверхность имеет сквозные радиальные отверстия, проходящие через центр оси вращения. С одной стороны отверстий установлен светодиод, с другой — фотодиод, электрические контакты которого через операционный усилитель, счетное устройство, схему сравнения, логический ключ и триггер присоединены к управляющему входу электронного ключа. Сигнальный вход и сигнальный выход ключа соединены соответственно с выходом генератора переменного тока и с электродами пьезокерамического элемента, а выход блока выборки подключен к второму входу схемы сравнения.

Отражатель оптического излучения выполнен в виде плоского двухстороннего зеркала, закрепленного на оси вращения валика с цилиндрической поверхностью. Под углом 45° к ней прижат пьезокерамический элемент шагового двигателя. На цилиндрической поверхности валика находятся сквозные радиальные отверстия, проходящие через центр оси вращения. С одной стороны отверстий установлен светодиод, с другой — фотодиод. Его электрические контакты соединены с электронной схемой управления, выполняющей функцию подсчета импульсов при вращении валика. При совпадении числа импульсов от изменения местоположения отверстий валика и блока выборки срабатывает схема сравнения. Происходит отключение питания шагового двигателя и торможение валика с зеркалом и, следовательно, его позиционирование на заданное изменение направления излучения [4].

На рис. 1 приведена схема конструкции и взаимного расположения элементов ОП, соединенная со структурной схемой управления, а на рис. 2 показан вид ОП сверху.

Оптический переключатель содержит зеркало-отражатель 1, расположенное под углом 45° к оси излучателя 2,

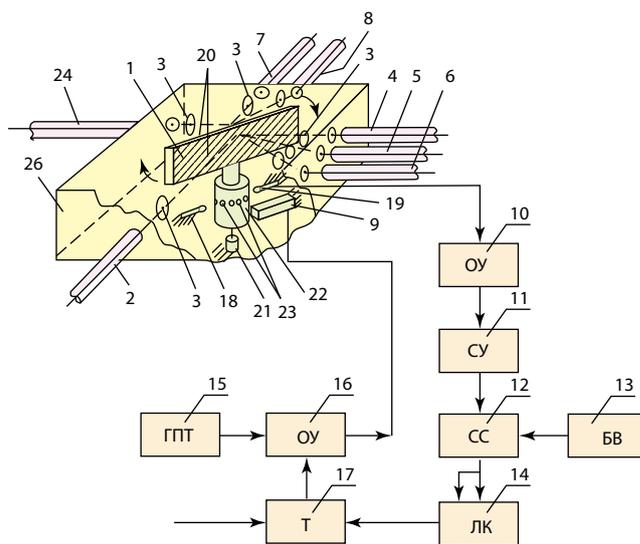


Рис. 1

фокусирующую линзу 3, волоконные световоды 4—8, установленные под углом 90° относительно друг друга. ОП снабжен шаговым двигателем с пьезокерамическим элементом 9, операционным усилителем (ОУ) 10, счетным устройством (СУ) 11, схемой сравнения (СС) 12, блоком выборки (БВ) 13, логическим ключом (ЛК) 14, генератором переменного тока (ГПТ) 15, электронным ключом (ЭК) 16, триггером (Т) 17, светодиодом 18 и фотодиодом 19.

Отражатель оптического луча выполнен в виде плоского двухстороннего зеркала 20, закрепленного на оси вращения 21 валика 22 с цилиндрической поверхностью, к которой под углом 45° прижат пьезокерамический элемент шагового двигателя. Цилиндрическая поверхность валика имеет сквозные радиальные отверстия 23, проходящие через центр оси вращения. С одной стороны этих отверстий установлен световод, с другой — фотодиод, электрические контакты которого последовательно соединены через ОУ, СУ, СС, ЛК и Т с управляющим входом ЭК, сигнальный вход и выход которого соединены, соответственно, с выходом ГПТ и электродами пьезокерамического элемента. Выход блока выборки подключен к второму входу СС. В ОП общее число принимающих оптических кабелей не ограничено, поэтому к ОП кабеля 2 под углом 45° расположено ОП кабеля 24. Пьезокерамический элемент шагового двигателя с одной стороны жестко закреплен на основании 25. Все элементы конструкции ОП расположены в корпусе 26.

В соответствии с заданными требованиями изменения направления излучения сначала устанавливают значение образцовой частоты кварцевого генератора БВ 13, соответствующее необходимому углу отклонения излучения зеркала-отражателя 1 (рис. 1 и 2). ОП запускается в работу с помощью Т 17, который, воздействуя на сигнальный вход ЭК 16, способствует прохождению напряжения ультразвуковой частоты от ГПТ 15 к обкладкам пьезокерамического элемента. Последний приводит к плавному вращению валика 22. Его вращение (валик имеет цилиндрическую поверхность со сквозными радиальными отверстиями 23) вызывает периодическое поочередное открывание отверстий. В результате происходит прямое попадание оптического луча светодиода 18, воспринимаемого фотодиодом 19. При этом одновременно осуществляется непрерывный счет числа импульсов, которые после усиления ОУ 10 подаются на вход СУ 11.

При сравнении частоты импульсов СУ 11 с образцовой частотой БВ 13, определяемой СС 12, на ее выходе формиру-

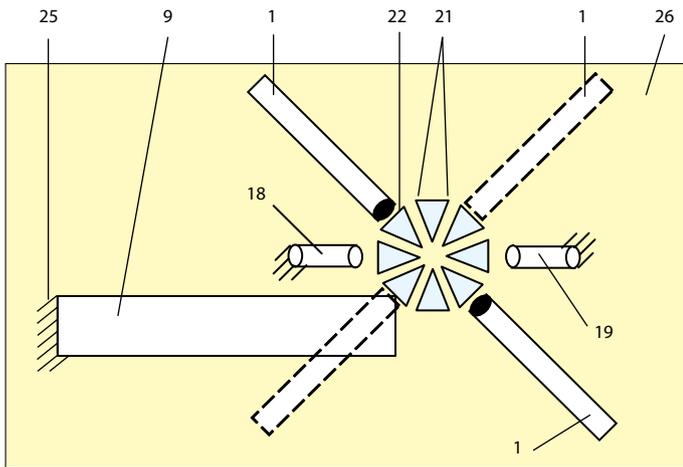


Рис. 2

ется сигнал, поступающий через ЛК 14 на второй управляющий вход Т 17. После чего он переводится в другое устойчивое состояние. При этом импульс напряжения с выхода Т 17, воздействуя на управляющий вход ЭК 16, способствует прерыванию цепи ГПТ 15 и прекращению подачи напряжения питания на пьезокерамический элемент 9, приводят к мгновенному торможению и остановке шагового двигателя.

В ОП в соответствии с рис. 1 оптические кабели 2, 4—8, и 24 могут работать в режимах передачи и приема оптического сигнала излучения. Согласно положению зеркала-отражателя 1, сигнал излучения с оптического кабеля 2 через фокусирующую линзу 3, попадая на зеркало-отражатель 1, направляется через фокусирующую линзу 3 на ОВ оптического кабеля 4.

При необходимости изменения направления оптического сигнала излучения, он переводится с оптического кабеля 4 на 24, а зеркало-отражатель 1 (см. рис. 1) перемещается по часовой стрелке на угол 90° (новое положение зеркала-отражателя 1 на рис. 2 условно показано пунктирными линиями).

Устанавливаются ОП на трассе прохождения оптических кабелей с дистанционным управлением изменения направления излучения оптического сигнала. Дистанционное управление ОП передаваемым оптическим сигналом позволяет обеспечить изменение направления излучения в противоположную сторону, а также плавное изменение направления на угол 90°, расширяя тем самым функциональные возможности разработанного ОП.

Характеристики двигателя. Поскольку в конструкции предусмотрено жесткое крепление зеркала-отражателя луча на валу пьезоэлектрического двигателя (ПД), в предложенном устройстве точность позиционирования луча определяется точностью юстировки установки ОВ и отверстий вала, т. е. точность позиционирования луча зависит от точности остановки вала двигателя после его торможения. Рабочие характеристики двигателя определялись расчетным и экспериментальным путем [4].

Номинальный момент на валу ПД можно вычислить по формуле [5,6]:

$$M = F_T R, \text{ Нм}, \tag{1}$$

где $R = 14 \cdot 10^{-3}$, м — радиус вала.

Максимальное тангенциальное усилие, действующее со стороны пьезоэлемента на вал, определяется соотношением [5,6]:

$$F_T \sim U_{\text{возб}} l_2 d_{31} E_{\text{ю}} \cos \alpha, \text{ Н}. \tag{2}$$

С учетом соотношения (2), уравнение (1) запишем в виде:

- для пьезокерамики

$$M_1 \sim U_{\text{возб}} l_2 d_{31} E_{\text{ю}} \cos \alpha R, \text{ Н}; \tag{3}$$

- для пружин

$$M_2 = F_{\text{пр}} R, \text{ Нм}; \tag{4}$$

$$M_{\text{общ}} = M_1 + M_2,$$

где $\sim U_{\text{возб}} = 200$ В — напряжение питания ГПТ; $l_2 = 1 \cdot 10^{-2}$ м — толщина пьезоэлемента; $d_{31} = 160 \cdot 10^{-12}$ м/В — пьезоэлектрический модуль для пьезокерамики марки ЦБТС-3; $F_{\text{пр}}$ — прижимное усилие пружин, Н; $M_{\text{общ}}$ — момент, создаваемый тангенциальной силой и силой пружин, действующий на пьезоэлемент, Нм; $E_{\text{ю}} = 0,7 \cdot 10^{11}$ Н/м — модуль Юнга для пьезокерамики марки ЦБТС-3; $\alpha = 40^\circ$ — угол наклона пьезоэлемента к валу ПД.

Амплитуда смещения Δ рабочего конца пьезоэлектрического элемента (в форме призмы) с учетом допустимого уровня возбуждения $\sim U_{\text{возб}}$ определим по формуле:

$$\Delta = \frac{2T_{\text{ц}} l_1}{\pi E_{\text{ю}}}, \text{ м}, \tag{5}$$

где $l_1 = 41 \cdot 10^{-2}$ м — длина пьезоэлемента;

$$T_{\text{ц}} \sim U_{\text{доп}} d_{31} Q_M E_{\text{ю}}, \text{ Н}, \tag{6}$$

где $\sim U_{\text{доп}} = 12500$ В/м — допустимое значение напряженности электрического поля.

С учетом (6) уравнение (5) примет вид:

$$\Delta = \frac{2 \sim U_{\text{доп}} d_{31} Q_M E_{\text{ю}} l_1}{\pi}, \text{ м}. \tag{7}$$

Скорость перемещения вала ПД в шаговом режиме работы:

$$V_{\text{в.п}} = \Delta f_p \cos \alpha K, \text{ м/с}, \tag{8}$$

где $f_p = 42 \cdot 10^3$ Гц — резонансная частота питающего напряжения; $K = 0,14—0,26$ — поправочный коэффициент скорости перемещения вала ПД (определяется экспериментально с учетом проскальзывания рабочего конца пьезоэлемента относительно поверхности вала ПД).

На рис. 3 приведена скоростная характеристика перемещения вала ПД в зависимости от момента.

В соответствии с (2) определим:

$$F_T = 200 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 160 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7 \cdot 10^{11} \cdot 0,73 = 9,81 \text{ Н};$$

$$M_1 = 9,81 \cdot 14 \cdot 10^{-3} = 0,13 \text{ Нм};$$



Рис. 3

$$M_2 = 104 \cdot 14 \cdot 10^{-3} = 1,45 \text{ Нм};$$

$$M_{\text{общ}} = 0,13 + 1,45 = 1,58 \text{ Нм}.$$

С учетом (5) находим:

$$\Delta = \frac{2 \cdot 12500 \cdot 160 \cdot 10^{-12} \cdot 70 \cdot 41 \cdot 10^{-2}}{3,14} = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 3,8 \text{ мкм}.$$

В соответствии с (8) вычисляем:

$$V_{\text{в.п}} = 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot 0,73 \cdot 0,2 = 98 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}.$$

Время необходимое для пуска и установления механических колебаний пьезоэлемента на 98%:

$$t_{\text{пуск}} = 1,47 \frac{Q_m}{f_p} = \frac{40}{42000} = 0,0014 = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

где $Q_m = 200$ ед — механическая добротность для пьезоэлемента марки ЦБТС-3 в свободном (незакрепленном) состоянии, а в закрепленном (из-за механических потерь) $Q_m = 40$ ед.

На рис. 4 приведены осциллограммы зависимости напряжения $u = f(t)$ при различных значениях момента на валу ПД по схеме, показанной на рис. 5. Исследования проводились в следующей последовательности.

Запуск ПД производится с помощью кнопки (К) 1 «пуск». В результате триггер (Т) 2 переводится в другое устойчивое состояние и открывается электронный ключ (ЭК) 3, при этом переменное напряжение резонансной частоты f_p с выхода генератора переменного напряжения (ГПН) 4 поступает на первую секцию электродов 5 возбуждения. После пуска ПД за время $t_{\text{пуск}}$ (см. рис. 4) механические колебания первой секции 5 передаются ко второй секции 6 электродов, работающей в режиме датчика и формирующей сигналы, подводимые на вход осциллографа (ОСЦ) 7. Вал 8 ПД начинает перемещаться. Это происходит до тех пор пока через сквозное радиальное отверстие 9 на валу 8 луч света попадет на фотодиод (ФД) 10. Электрический сигнал с его выхода через усилитель напряжения (УН) 11 подводится к управляющему входу Т 2, переводя его в другое устойчивое состояние. Электронный ключ 3 отключает подачу напряжения питания с ГПН 4 и электроды 5 возбуждения обесточиваются.

При изменении скорости перемещения вала в диапазоне от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $30 \cdot 10^{-3}$ м/с и соответственно при максимальных значениях момента от 1,3 до 1,6 Н/м точность

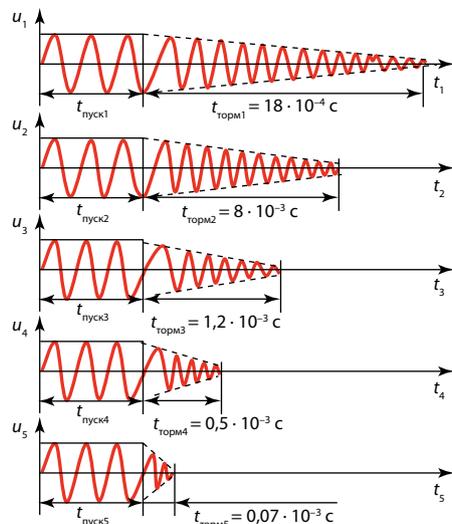


Рис. 4

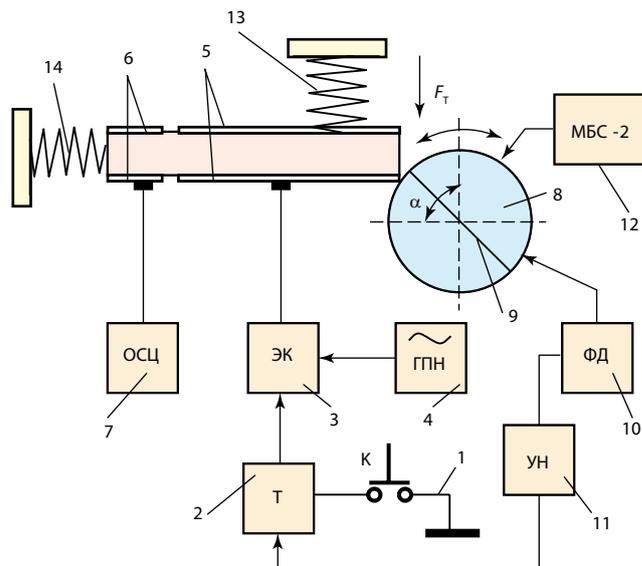


Рис. 5

остановки вала фиксировалась с помощью микроскопа 12 (тип МБС-2). После запуска ПД согласно зависимостям $u_4 = f(t_{\text{торм4}})$ и $u_5 = f(t_{\text{торм5}})$ (см. рис. 4), соответствующих минимальному времени торможения, максимальное отклонение вала после остановки ПД составляет от 2 до 5 мкм, а погрешность позиционирования — 0,014%. Диаметр ОВ оптического кабеля составляет 8—10 мкм, т.е. 70—80% сканируемого луча, отражаемого от зеркала, вполне достаточно для остановки вала ПД, достигаемого за счет безлюфтности, а также регулирования силы прижима пружин 13, 14 и напряжения возбуждения пьезоэлемента.

Потери, связанные с гистерезисом пьезокерамики, незначительны, так как ПД работает в шаговом режиме с остановками при минимальных скоростях перемещения.

Заключение. Разработанный ОП позволяет сократить общее количество механических элементов и узлов со сложной геометрической формой и конфигурацией, упростить конструкцию оптоэлектронного коммутатора, повысить точность позиционирования за счет отсутствия люфтов, улучшить пусковые и тормозные характеристики пьезоэлектрического двигателя. Эксплуатационная надежность ОП повысится за счет того, что ОВ каналов связи не подвергаются деформации, т.е. находятся в неподвижном состоянии. Лучевой сигнал сканируется путем его отражения адаптивным зеркальцем через зеркало-отражатель к отверстиям планки коммутирующих ОВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. — М.: Радио и связь, 1990.
2. Алишев Я.В. Многоканальные системы передачи оптического диапазона. — Минск: Вышэйшая школа, 1986.
3. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999.
4. Бейбалаев Г.Б. Оптоэлектронный переключатель направления излучения. Официальный бюллетень «Промышленная собственность». — Баку, 2007. — № 1. — С. 19.
5. Лавриненко В., Карташев И.А., Вишневский В.В. Пьезоэлектрические двигатели. — М.: Энергия, 1980.
6. Смажеская Б.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. — М.: Сов. радио, 1971.

Получено после доработки 6.05.09