

# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

УДК 621. 384.2

DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-7

## ЧАСТОТНОЕ СОГЛАСОВАНИЕ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ КОММУТАТОРОВ

М. Г. Гасанов, С. Г. Гардашов

### *Введение*

За сравнительно короткую историю развития оптических сетей было разработано огромное число различных типов коммутаторов оптических сигналов, основанных на самых различных физических принципах [1].

Главной задачей оптических коммутаторов является обеспечение максимально высокого быстродействия, достаточного для разрабатываемых терабитных оптических линий связи [2], эффективность [3] и обеспечение минимально возможной удельной стоимости, а также снижение потребляемой мощности по сравнению с существующими электронными аналогами. Решение этих задач возможно с применением традиционных механических, электрооптических, термооптических, жидкокристаллических, полупроводниковых, интегрально-оптических, микроэлектромеханических и других устройств.

В настоящее время наряду с другими микродвигателями благодаря простоте конструкции и дешевизне изготовления находят все большее применение твердотельные микропьезоэлектрические двигатели (МПД). Принцип действия МПД основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте (ОПЭ), в них энергия колебательных движений частиц пьезоэлемента (ПЭ), возбуждаемых переменным напряжением, подаваемым на его электроды от ультразвукового генератора (УЗГ) посредством ударного взаимодействия, передается контактирующей с ним подвижной части (ПЧ). Переменным напряжением от УЗГ в ПЭ возбуждаются только продольные колебания по его длине, а в результате его ударного взаимодействия с ПЧ в нем возбуждаются и поперечные (изгибные) колебания [4].

### *Многоканальный оптический коммутатор*

Одним из перспективных путей решения проблемы является применение пьезоэлектрических микроприводов [5], на основе которых возможно создание новых многоканальных, многофункциональных пьезоэлектрических коммутаторов оптических каналов.

Обобщенную схему многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов представим в следующем виде (рис. 1).

Как видно из рис. 1, мультиплексированный в единый оптический сигнал, поступающий из оптического волокна  $\sum \lambda_n$ , демультиплексируется своим составляющим  $\lambda_i$  посредством управляемого зеркала с помощью специального блока управления пьезоприводом вращательного движения. В данной схеме новизной является узел, созданный сочетанием управляемого зеркала оптического коммутатора с пьезоприводом линейного или вращательного движения.

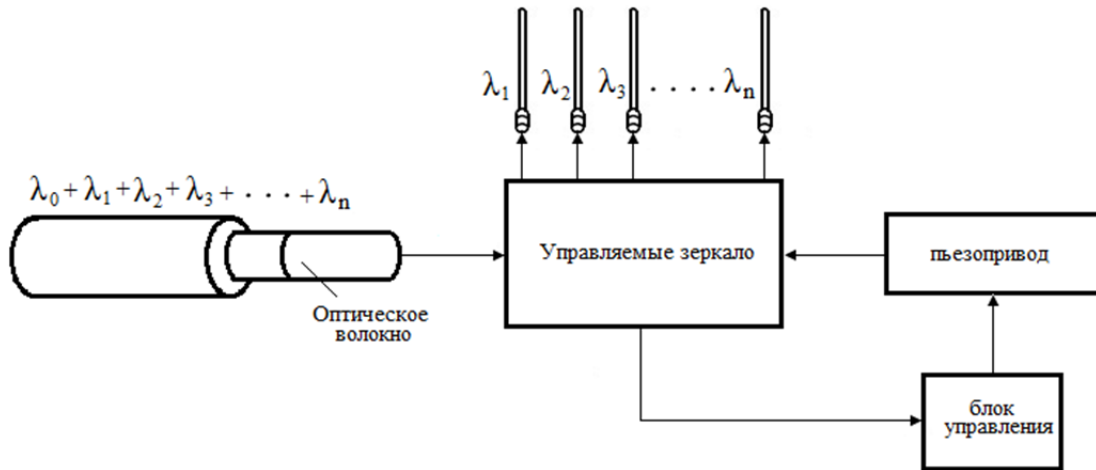


Рис. 1. Обобщенная схема многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов

Применение пьезоэлектрических многоканальных коммутаторов оптических каналов тесно связано с расчетом рабочих характеристик микропьезоэлектрических двигателей и оптимизацией параметров микропьезоэлектрических двигателей.

**Частотное согласование размеров элементов пьезоэлектрического двигателя**

Показатели качества МПД, кроме прочих факторов, в основном зависят от характера взаимодействия ПЭ с ПЧ и от формы траектории контактирующего с ПЧ конца ПЭ. Известно, что наилучшие показатели качества – сила тяги, быстродействие и КПД. МПД можно получить, когда эта траектория имеет форму эллипса и ПЭ в течение каждого периода колебаний входит в контакт с ПЧ один раз. Для этого частоты продольных и изгибных колебаний ПЭ должны быть равными, фазовый сдвиг между ними должен быть 90°, частота изгибных колебаний ПЧ должна равняться частоте колебаний ПЭ. Выполнение этих условий требует частотного согласования размеров ПЭ и ПЧ определенным образом. В работе [6] приведены формулы для согласования размеров только ПЭ, обеспечивающие приблизительное равенство частот его продольных и изгибных колебаний без учета его взаимодействия с ПЧ, в результате чего при реальной работе (ПД) эффект согласования снижается.

В работе с целью применения в коммутаторах оптических систем передачи предлагается иная методика, учитывающая взаимодействие ПЭ с ПЧ, применение которой позволяет более точно определить согласованные размеры не только ПЭ, но и ПЧ.

Принципиальная схема рассматриваемого МПД самой простой конструкции показана на рис. 2.

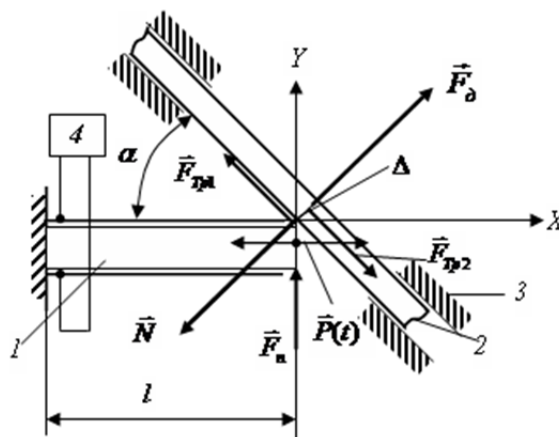


Рис. 2. Принципиальная схема рассматриваемого МПД самой простой конструкции: 1 – пьезоэлемент; 2 – подвижная часть; 3 – направляющие опоры; 4 – ультразвуковой генератор

Один конец ПЭ заделан, а другой свободный конец прижат силой  $\overline{F}_n$  под углом  $\alpha$  к ПЧ, имеющей возможность двигаться поступательно в направляющих опорах. ПЭ и ПЧ имеют прямоугольные сечения шириной  $a$ ,  $a_1$  и толщиной  $b$ ,  $b_1$  соответственно, длина ПЭ  $l$ , расстояние между направляющими опорами  $l_1$ .

Динамика взаимодействия ПЭ и ПЧ описывается системой дифференциальных уравнений в операторной форме [7]:

$$\begin{cases} u(t) = L_u(l,s)[P(t) - \Phi_x(u, w, su, sw)]; \\ w(t) = -L_w(l,s)[P_n(t) - \Phi_y(u, w, su, sw)]; \end{cases} \quad (1)$$

где  $u$ ,  $w$  – относительные смещения контактирующих точек ПЭ и ПЧ соответственно по осям  $x$  и  $y$ , отсчитываемые от их начального неподвижного состояния,  $P(t) = a_p \sin \omega t$  – сила, возникающая в результате ОПЭ, приложенная к свободному концу ПЭ,  $\omega = 2\pi f$  круговая частота,  $s = \partial/\partial t$ ;  $\Phi_x$ ,  $\Phi_y$  – проекции нелинейной силы  $\overline{\Phi}$  ударного взаимодействия между ПЭ и ПЧ, на осях  $x$  и  $y$ :

$$\overline{\Phi} = \overline{N} + \overline{F}_{\text{Тр}1}; \quad (2)$$

$$\overline{N} = -\overline{F}_\partial, \quad \overline{F}_{\text{Тр}1} = -\overline{F}_{\text{Тр}2},$$

где  $\overline{F}_\partial$  – сила давления на ПЧ,  $\overline{F}_{\text{Тр}1}$ ,  $\overline{F}_{\text{Тр}2}$  – силы трения, действующие соответственно на ПЭ и ПЧ.

$L_u(l,s)$ ,  $L_w(l,s)$  – операторы суммарных динамических податливостей контактирующих элементов ПЭ и ПЧ, определяемые при единичной гармонической силе ( $a_p = 1$ ), действующей к свободному концу ПЭ

$$\begin{cases} L_u(l,s) = \frac{l}{ES\xi_u} \left( tg\xi_u - j \frac{\chi}{4\pi} \frac{0.5 \sin 2\xi_u}{\cos^2 \xi_u} \right), \\ L_w(l,s) = \frac{EI}{l^3} (A + jB) \end{cases} \quad (3)$$

где

$$A = \frac{ch\xi_w \sin \xi_w - sh\xi_w \cos \xi_w}{\xi_w^3 (1 + ch\xi_w \cos \xi_w)}; \quad (4)$$

$$B = \frac{\chi \left[ \frac{\xi_w}{2} (ch2\xi_w - \cos 2\xi_w) + 2\xi_w sh\xi_w \sin \xi_w + (1 + ch\xi_w \cos \xi_w)(ch\xi_w \sin \xi_w - sh\xi_w \cos \xi_w) \right]}{\xi_w^3 (1 + ch\xi_w \cos \xi_w)}, \quad (5)$$

где  $E$  – модуль упругости ПЭ;  $S$  – площадь поперечного сечения ПЭ;  $\chi$  – коэффициент поглощения;  $I = \frac{1}{12} ab^3$  – момент инерции поперечного сечения ПЭ,  $\xi_u = \frac{\omega l}{\gamma}$ ,  $\gamma = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ,  $\xi_w = l \sqrt[4]{\frac{\rho \omega^2 S}{EI}}$ ;  $\rho$  – плотность ПЭ.

Отыскивая решения системы уравнений (1) в виде

$$u(t) = m_u + u^0(t) = m_u + a_u \sin(\omega t - \phi_u), \quad (6)$$

$$w(t) = m_w + w^0(t) = m_w + a_w \sin(\omega t - \phi_w), \quad (7)$$

где  $m_u$ ,  $m_w$  и  $u^0$ ,  $w^0$  – постоянные и переменные составляющие  $u(t)$  и  $w(t)$ , производим гармоническую линеаризацию силы ударного взаимодействия [8]:

$$\Phi_x(u, su) \approx m_{Fu}(m_u, a_u) + k_u(m_u, a_u)u^0 + \beta_u(m_u, a_u)su^0; \quad (8)$$

$$\Phi_y(w, sw) \approx m_{F_u}(m_w, a_w) + k_w(m_w, a_w)w^0 + \beta_w(m_w, a_w)sw^0, \quad (9)$$

$m_{F_u}, m_{F_w}, k_u, k_w, \beta_u, \beta_w$  – коэффициенты гармонической линеаризации:

$$m_{F_u} = \frac{a_u}{2\pi} c \sin \alpha [D_u (2 \arcsin D_u - \pi) + 2 \sin \alpha \sqrt{1 - D_u^2}]; \quad (10)$$

$$k_u = \frac{1}{\pi} \left\{ [c \sin \alpha \cos \phi_u (\sin \alpha - 2) - \mu \omega \cos^2 \alpha \sin \phi_u] D_u \sqrt{1 - D_u^2} + 0,5(c \sin^2 \alpha \cos \phi_u + \mu \omega \cos^2 \alpha \sin \phi_u)(\pi - 2 \arcsin D_u) \right\}; \quad (11)$$

$$\beta_u = \frac{1}{\pi \omega} \left\{ [c \sin \alpha \sin \phi_u (2 - \sin \alpha) - \mu \omega \cos^2 \alpha \cos \phi_u] D_u \sqrt{1 - D_u^2} + 0,5(\mu \omega \cos^2 \alpha \cos \phi_u - c \sin^2 \alpha \sin \phi_u)(\pi - 2 \arcsin D_u) \right\}; \quad (12)$$

$$m_{F_w} = \frac{a_w}{2\pi} c \cos \alpha [D_w (2 \arcsin D_w - \pi) + 2 \sin \alpha \sqrt{1 - D_w^2}]; \quad (13)$$

$$k_w = \frac{1}{\pi} \left\{ [c \cos \alpha \cos \phi_w (\cos \alpha - 2) - \mu \omega \sin^2 \alpha \sin \phi_w] D_w \sqrt{1 - D_w^2} + 0,5(c \cos^2 \alpha \cos \phi_w + \mu \omega \sin^2 \alpha \sin \phi_w)(\pi - 2 \arcsin D_w) \right\}; \quad (14)$$

$$\beta_w = \frac{1}{\pi \omega} \left\{ [c \cos \alpha \sin \phi_w (2 - \cos \alpha) - \mu \omega \sin^2 \alpha \cos \phi_w] D_w \sqrt{1 - D_w^2} + 0,5(\mu \omega \sin^2 \alpha \cos \phi_w - c \cos^2 \alpha \sin \phi_w)(\pi - 2 \arcsin D_w) \right\}, \quad (15)$$

где  $c$  – коэффициент жесткости ПЧ;  $\mu$  – коэффициент трения между ПЭ и ПЧ,

$$D_u = \frac{\Delta - m_u \sin \alpha}{a_u}, \quad D_w = \frac{\Delta - m_w \cos \alpha}{a_w}, \quad (16)$$

$\Delta$  – зазор (натяг) между ПЭ и ПЧ.

Решив систему (1) с учетом (3)–(15), получена система трансцендентных уравнений, определяющая неизвестные параметры искомого решения  $m_u, m_w, a_u, a_w, \phi_u, \phi_w$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_u = \frac{a_p}{\sqrt{U_u^2 + V_u^2}} \\ \phi_u = \arctg \frac{V_u}{U_u} \\ U_w = 0 \\ V_w = 0 \\ m_u = -\frac{l}{ES} m_{F_u} \\ m_w = \frac{l^3}{EI} (F_n - m_{F_w}) \end{array} \right. , \quad (17)$$

где

$$U_u = \frac{ES}{l} (\zeta_u \operatorname{ctg} \zeta_u + k_{ul}); \quad (18)$$

$$V_u = \frac{ES}{l} \left( \omega \beta_{ul} + \frac{\chi \zeta_u}{4\pi} \frac{\zeta_u + 0,5 \sin 2\zeta_u}{\sin^2 \zeta_u} \right); \quad (19)$$

$$U_w = \frac{EI}{l^3} \left( \frac{A}{A^2 + B^2} + k_{wl} \right); \quad (20)$$

$$V_w = \frac{EI}{l^3} \left( \frac{B}{A^2 + B^2} + \omega \beta_{wl} \right); \quad (21)$$

$$k_{ul} = \frac{l}{ES} k_u; \beta_{ul} = \frac{l}{ES} \beta_u; k_{wl} = \frac{l^3}{EI} k_w; \beta_{wl} = \frac{l^3}{EI} \beta_w, \quad (22)$$

где  $U_u, U_w$  и  $V_u, V_w$  – вещественные и мнимые части соответственно суммарных динамических жесткостей  $W_U, W_W$  контактирующих элементов ПЭ и ПЧ:

$$\begin{cases} W_U = L_U^{-1}(l, s) + k_u + \beta_u s; \\ W_W = L_W^{-1}(l, s) + k_w + \beta_w s. \end{cases} \quad (23)$$

Для согласования размеров ПЧ выведены следующие формулы:

$$c = 3,2 E_1 a_1 \left( \frac{b_1}{l_1} \right)^3; \quad (24)$$

$$f = 0,68 \frac{b_1}{l_1^2} \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}}, \quad (25)$$

где  $c, f$  – жесткость и собственная частота изгибных колебаний ПЧ;  $E_1, \rho_1$  – модуль упругости и плотность материала ПЧ.

Предлагается следующий порядок частотного согласования размеров ПЭ и ПЧ:

1) выбираем материалы для ПЭ и ПЧ;  
2) изменяя в формулах (24), (25) размеры  $a_1, b_1$  и расстояние  $l_1$  между опорами, определяем интервалы допустимых из конструктивных соображений значений жесткости ( $c_{\min} \div c_{\max}$ ) и собственной частоты изгибных колебаний ( $f_{\min} \div f_{\max}$ ) ПЧ;

3) для конкретного значения  $c$ , взятого из указанного в п. 2 интервала, согласуем размеры ПЭ, т.е. изменяя размеры  $a, b, l$  ПЭ, добиваемся равенства собственных частот продольных и изгибных колебаний по длине ПЭ. С этой целью используем уравнения, определяющие совокупность этих собственных частот:

$$\begin{cases} U_u = U'_u(f, l) + U''_u(f, a, b, l, D_u, c) = 0; \\ U_w = U'_w(f, l) + U''_w(f, a, b, l, D_w, c) = 0. \end{cases} \quad (26)$$

Рекомендуется решать систему уравнений (26) графически, построением с помощью компьютера в одной системе координат графиков функций  $U'_u(f)$  и  $-U''_u(f)$ , а в другой – графиков  $U'_w(f)$  и  $-U''_w(f)$ , на которых будут наглядно видны все моды собственных частот.

С учетом условия  $\phi_u - \phi_w = 90^\circ$ ,  $\phi_u = 90^\circ$  графики  $U'_u(f)$  и  $U''_w(f)$  представляют собой прямые, угловые коэффициенты которых при заданных  $c, \mu, \alpha$  зависят соответственно только от  $D_u$  и  $D_w$ . Так как  $|D_u| \leq 1$  и  $|D_w| \leq 1$ , эти уравнения решаем только для значений:  $D_u = -1, D_u = 1$  и  $D_w = -1, D_w = 1$ . Решение для других значений  $D_u$  и  $D_w$  будут между полученными выше решениями. Довольно легко достигается равенство первой моды собственных частот продольных колебаний и второй моды собственных частот изгибных колебаний. Фиксируем  $D_u$  и  $D_w$ , при которых  $f = f_u = f_w$ . Полученная частота должна входить в допустимый интервал (п. 2). В противном случае, изменив  $c, a, b, l$ , необходимо повторить расчет по п. 2, 3;

4) подставив частоту  $f = f_u = f_w$  в выражения  $a_u = |L_u(l, s)|$  и  $a_w = |L_w(l, s)|$ , определяем начальные приближенные значения  $a_u, a_w$ ;

5) решаем систему из четырех уравнений, полученную из (17) с учетом  $f = f_u = f_w$ , начальные значения  $a_u, a_w, \phi_u = 90^\circ, \phi_w = 0, U_u = 0, U_w = 0$  и  $a_p = 1$  относительно  $a_u, m_u, a_w, m_w$ ;

6) используя результаты п. 5, по (16) уточняем  $D_u$  и  $D_w$ , согласно п. 3 скорректируем частоту  $f = f_u = f_w$ ;

7) согласуем размеры ПЧ. Подставив  $f = f_u = f_w$  из п. 6 в (25), определяем отношение  $\frac{b_1}{l_1^2}$ .

Задаваясь значением  $b_1 \leq a_1$ , определяем  $l_1$ . Наконец из формулы (24) определяем  $a_1$ . С точки зрения наилучшей передачи энергии от ПЭ к ПЧ, желательно выполнение условия

$$a \leq a_1.$$

### Заключение

В соответствии с изложенным можно заключить, что согласованные по этой методике размеры пьезоэлемента и подвижной части полностью обеспечивают вышеуказанный режим работы микропьезоэлектрических двигателей с наилучшими показателями качества с целью применения в коммутаторах оптических каналов.

### Библиографический список

1. Гайворовская, Г. С. Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях / Г. С. Гайворовская, А. В. Рябцов // *Applicable Information Models*. – 2011. – № 22. – Р. 169–181.
2. Гайворовская, Г. С. Особенности коммутации оптических сигналов при использовании различных режимов переноса информации / Г. С. Гайворовская, А. В. Рябцов. – 2015. – С. 1–7. – URL: <http://journals.urau.ru/reftech/article/viewFile/51945/52999>
3. Гасанов, М. Г. Эффективность пьезоэлектрического дефлектора светового луча в технике связи / М. Г. Гасанов // *Известия АзГУ*. – 2010. – № 2 (66). – С. 44–46.
4. Hasanov, M. H. Application of piezoelectric light beam deflector in optical commutators of fiber-optical communication networks / M. H. Hasanov, V. A. Maharramov // *The international science-technical journal HEARD of the Azerbaijan Engineering Academy*. – 2017. – Vol. 9, № 2. – Р. 116–121.
5. А.С. СССР № 1827708. Пьезоэлектрический реверсивный привод / Гасанов М. Г., Вишневский В. С. – 1995.
6. Джагулов, Р. Г. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике / Р. Г. Джагулов, А. А. Ерофеев. – Л. : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 165 с.
7. Постановка и выбор метода решения задачи исследования динамики виброударного взаимодействия в пьезоэлектрическом двигателе / С. Г. Гардашов, Т. Б. Гурбанов, Х. Г. Гардашова, Э. Т. Газарханов, Т. И. Кяримли // *Елми мяжмуяляр*. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 36–40.
8. Гардашов, С. Г. Гармоническая линеаризация силы ударного взаимодействия в ПД / С. Г. Гардашов, Т. Б. Гурбанов, Х. Г. Гардашова // *Елми ясярляр – Фундаментал елмляр*. – 2003. – № 3, том II (7). – С. 20–24.

#### **Гасанов Мехман Гусейн оглы**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра многоканальных  
телекоммуникационных систем,  
Азербайджанский технический университет  
(Az1148, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25)  
Email: mhasanovnew@gmail.com

#### **Гардашов Садраддин Гудбиддин оглы**

старший преподаватель,  
кафедра электромеханики  
и электрического оборудования,  
Азербайджанский технический университет  
(Az1148, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25)  
Email: sqardashov52@mail.ru

#### **Hasanov Mehman Huseyn**

candidate of technical sciences, associate professor,  
sub-department of multi-channel  
telecommunication systems,  
Azerbaijan Technical University  
(Az1148, 25 G. Javida avenue, Baku, Azerbaijan)

#### **Gardashov Sadraddin Gudbiddin**

senior teacher,  
sub-department of electrical engineering  
and electrical equipment,  
Azerbaijan Technical University  
(Az1148, 25 G. Javida avenue, Baku, Azerbaijan)

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Основной задачей оптических коммутаторов является обеспечение максимально высокого быстродействия, достаточного для разрабатываемых терабитных оптических линий связи, эффективность и обеспечение минимально возможной удельной стоимости, а также снижение потребляемой мощности по сравнению с существующими оптоэлектронными аналогами. *Материалы и методы.* Одним из перспективных путей решения проблемы является применение пьезоэлектрических микроприводов, на основе которых предложено создание многоканального, многофункционального пьезоэлектрического коммутатора оптических каналов. Применение пьезоэлектрических многоканальных коммутаторов оптических каналов тесно связано с расчетом рабочих характеристик микропьезоэлектрических двигателей и оптимизацией параметров микропьезоэлектрических двигателей. *Результаты.* Согласованные по этой методике размеры пьезоэлемента и подвижной части полностью обеспечивают режим работы микропьезоэлектрического двигателя с наилучшими показателями качества с целью применения в коммутаторах оптических каналов. *Выводы.* Представлена обобщенная схема многоканального коммутатора с применением микропьезоэлектрических приводов для переключения оптических каналов. Предложена методика частотного согласования размеров элементов микропьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов.

**Ключевые слова:** оптический коммутатор, пьезоэлектрический эффект, продольные и изгибные колебания, микропьезоэлектрический привод, многоканальный коммутатор, управляющее устройство, оптические волокно, пьезоэлемент.

УДК 621.384.2

Гасанов, М. Г.

**Частотное согласование размеров элементов пьезоэлектрического двигателя для оптических коммутаторов** / М. Г. Гасанов, С. Г. Гардашов // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 49–55. DOI 10.21685/2307-4205-2017-4-7.

**Abstract.** *Background.* The main task of optical switches is to ensure the highest possible speed for the terabit optical communication lines being developed, the efficiency and the provision of the lowest possible unit cost, as well as the reduction of power consumption in comparison with existing optoelectronic analogues. *Materials and methods.* One of the promising ways to solve the problem is the use of piezoelectric microdrives, on the basis of which the creation of a multichannel multifunctional piezoelectric switch for optical channels is proposed. The use of piezoelectric multichannel switches for optical channels is closely related to the calculation of the performance of micro-piezoelectric motors and the optimization of the parameters of micro-piezoelectric motors. *Results.* The sizes of the piezoelement and the moving part coordinated in this way fully provide the operating mode for micro-piezoelectric motors with the best quality indicators for the purpose of using optical channels in switches. *Conclusions.* A generalized scheme of a multichannel commutator with the use of micro-piezoelectric drives for switching optical channels is presented. A technique for frequency matching of the sizes of elements of a micro-piezoelectric engine for optical commutators is proposed.

**Key words:** optical commutator, piezoelectric effect, longitudinal and bending vibrations, micro-piezoelectric drive, optical commutator, multichannel switch, control device, optical fiber, piezoelectric element.