

УДК 681.7.068

**А. К. Сандлер, доцент,**  
доцент кафедры теории автоматического управления и вычислительной техники  
Национальный университет «Одесская морская академия»  
ул. Дидрихсона, 8, г. Одесса, 65029, Украина  
e-mail: albertsand4@gmail.com

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА МАЯТНИКОВОГО ТИПА

Автором была исследована работа акселерометра маятниковой схемы для контроля высокочастотной вибрации в специальных условиях эксплуатации.

В разработанной схеме акселерометра представление оптического волокна в виде слоистой ступенчатой структуры позволяет составить и использовать дискретную расчетную схему. На основании модифицированной теории связанных мод в туннельно-связанных оптических волокнах был определен коэффициент связи мод излучения в коаксиальной структуре, создаваемой под влиянием колебательных процессов. Получила дальнейшее развитие модель волоконно-оптического акселерометра, что позволило разработать модель измерительного преобразователя для лабораторных измерений и реализовать моделирование устройств для их эффективного проектирования.

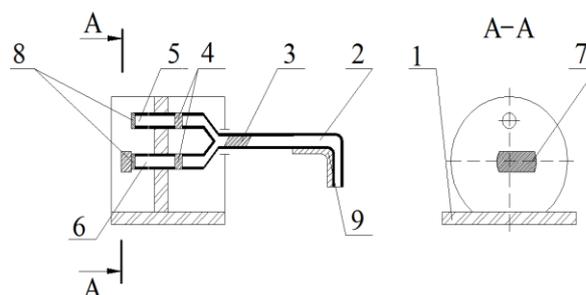
**Ключевые слова:** волоконно-оптический акселерометр, оптическое волокно, коэффициент связи мод излучения.

**Введение.** Анализ научно-технической литературы показал, что существует проблема недостаточного внимания к процессам в волоконно-оптических акселерометрах (ВОА), эксплуатируемых в условиях концентрированного воздействия дестабилизирующих факторов (ДФ), генерируемых компактно расположенным оборудованием энергетической установки [1, 2]. Не рассматриваются конструктивно-технологические особенности ВОА, и не дается оценка их метрологических и эксплуатационных характеристик в данных условиях. Соответственно, отсутствует систематизированное описание процессов в волоконных акселерометрах и, в целом подход в решении этого важного вопроса.

В [3–7] была исследована работа ВОА маятниковой схемы для контроля высокочастотной вибрации в специальных условиях эксплуатации (рис. 1).

Под воздействием механических деформаций, создаваемых вибрацией, и неконтролируемых ДФ в измерительном оптическом волокне (ОВ) происходит изменение диэлектрической проницаемости волокна и, соответственно, изменение его профиля показателя преломления (ППП).

В компенсирующем ОВ аналогичные изменения происходят только под влиянием неконтролируемых ДФ.



**Рисунок 1 – Волоконно-оптический акселерометр для специальных условий эксплуатации:**

- 1 – корпус; 2 – опорное оптическое волокно;
- 3 – C/G-линзы; 4 – оптический фильтр;
- 5 – измерительное оптическое волокно;
- 6 – компенсирующее волокно; 7 – эксцентриковая масса; 8 – отражающий слой;
- 9 – биметаллическая пластина

Изменение ППП измерительного и компенсирующего ОВ находит свое отражение в снижении величины интенсивности светового излучения, проходящего акселерометр в прямом и обратном направлении.

Изучение вопроса преобразования светового излучения в деформированных световодных элементах акселерометра и анализ результатов аналогичных исследований позволил сформировать следующие подходы к описанию изменения оптических параметров ОВ при приложении внешних нагрузок [7]:

все деформационные процессы находятся в пределах малых деформаций, т. е. не приводящих к разрушению материала волокон;

рассматриваются только упругие деформации;

изменения параметров ОВ рассматриваются с позиций закона Гука;

в качестве базовых моделей для расчётов берутся модели классической механики сплошной среды;

световодный элемент ВОА рассматривается как слоистая ступенчатая структура.

В описанном схематическом решении ОВ измерительного канала испытывает деформации кручения.

В области малых деформаций, ограниченных пределом прочности оптического волокна, в соответствии с законом Гука линейная зависимость компонент напряжений и показателя преломления при кручении имеет вид [8]

$$n_{xz} = n_{yz} = C_4 \frac{\gamma E_i r_i}{2L(1 + \nu_i)},$$

где  $C_4$  – светоупругая постоянная;

$E_i$  – модуль упругости;

$\nu_i$  – коэффициент Пуассона;

$r_i$  – текущий радиус волокна.

На рис. 2 представлены модели изменения ППП волокна при кручении ОВ: *a* – волокна со ступенчатым ППП; *б* – волокна с градиентным ППП.

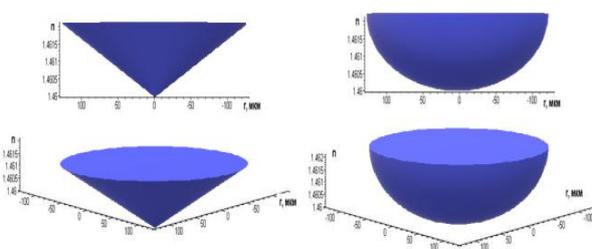


Рисунок 2 – Изменение ППП волокна при кручении оптического волокна

Если рассматривать полученные модели ОВ с изменённым при кручении ППП как слоистую структуру, то возможно следующее допущение. Взаимная связь процессов, происходящих в слоистых структурах сердцевин и оболочки, позволяет любую произвольную деформацию границы раздела сред аппроксимировать последовательностью малых скачков. В пределе при бесконечно большом числе скачков и нулевой высоте каждого скачка последовательностью скачков можно заменить любую произвольную функцию. Преобразова-

ние моды многими скачками является суперпозицией полей, порождаемых каждым индивидуальным скачком. Такая модель достаточно проста, удобна и применима к любому типу поля, в том числе и к более сложным полям круглого оптического волокна. Представление оптического волокна в виде слоистой ступенчатой структуры позволяет составить и использовать дискретную расчетную схему [9]. Согласно такой схеме:

волокно заменяется цилиндром, состоящим из ряда концентрических цилиндрических слоев, в пределах каждого из которых напряжение считается постоянным. В каждом слое показатель преломления постоянный, а поле описывается функцией  $\psi$ ;

для оценки величины показателя преломления в каждом слое может быть использован метод профилей равного объема;

задача согласования двух волноводных структур рассматривается как возбуждение приемной антенны некоторым заданным полем излучающей антенны.

Известно [10], что метод профилей равного объема предполагает нормировку профилей показателя преломления с одинаковым показателем преломления оболочки  $n_{cl}$  и параметрами высоты профиля.

Эффективный объем профиля  $\zeta$  определяется как интеграл по поперечному сечению от функции  $(1 - f)$  или как объем тела, полученного вращением кривой профиля вокруг оси ОВ, т. е.

$$\zeta = \int_{A_{\infty}} (1 - f) dA = 2\pi\rho^2 \int_0^{\infty} (1 - f) R dR.$$

где  $\rho$  – радиус сердцевин или характерный размер профиля;

$(1 - f)$  – функция, определяющая форму профиля и пропорциональная превышению  $n^2(R)$  над показателем  $n_{cl}$ .

Оценка с позиций метода равных объемов слоистой структуры с изменённым ППП позволяет аппроксимировать деформированное при кручении ОВ коаксиальной структурой, которую можно рассматривать в рамках теории связанных мод как туннельно-связанные ОВ.

**Анализ источников исследований и публикаций, в которых положено начало решения проблемы.** Большое разнообразие противоречивых подходов, формулировок и аппроксимаций при рассмотрении обычной теории связанных мод (ОТСМ) и модифицированной теории связанных мод (МТСМ)

в туннельно-связанных ОВ делает практически невозможной задачу согласования результатов, полученных разными авторами, с целью выработки единого физического взгляда на многообразные межмодовые взаимодействия в современной волноводной оптике.

Противоречия и спорные результаты, полученные разными авторами в рамках ОТСМ можно объяснить различными теоретическими подходами, методами исследования и использованными приближениями.

Некоторые авторы (Снайдер и Лав, Харди и Стрейфер, Когельник и др.) применяют уравнения Максвелла как исходные дифференциальные уравнения первого порядка для вывода уравнений связанных мод. Другие авторы (Маркузе, Ярив и Юх) используют для этой же цели уравнения второго порядка типа уравнения Гельмгольца, полученные из уравнений Максвелла. Второй подход требует так называемой параболической аппроксимации с тем, чтобы убрать вторые производные искомого амплитуд по  $z$ , которые просто не появляются при первом подходе [11].

Согласно [10], если волноводы расположены вблизи друг от друга, то полное поле можно приближенно представить в виде суперпозиции невозмущенных полей каждого волновода. Оптическая перекрестная связь будет заключаться в интерференции между полями мод, соответствующими скалярным решениям  $\psi_+$  и  $\psi_-$ . ОВ в этом процессе рассматривается как сложный волновод.

Фундаментальные решения  $\psi_+$  и  $\psi_-$  скалярного волнового уравнения определяются симметрией поперечного сечения волновода и могут быть приближенно записаны в виде

$$\psi_+ = \bar{\psi}_1 + \bar{\psi}_2; \quad \psi_- = \bar{\psi}_1 - \bar{\psi}_2, \quad (1.1)$$

где  $\bar{\psi}_1$  и  $\bar{\psi}_2$  – фундаментальные решения отдельного волновода.

Постоянные распространения, соответствующие решениям  $\psi_+$  и  $\psi_-$ , обозначаются  $\beta_+$  и  $\beta_-$ , а под  $\beta$  будем понимать общую постоянную распространения для решений  $\bar{\psi}_1$  и  $\bar{\psi}_2$ . В случае изолированных волноводов  $\beta_+ = \beta_- = \beta$ . При достаточно большом расстоянии между каналами можно считать  $\beta = \beta_{\pm}$ ,  $\psi = \psi_{\pm}$ ,  $n = n_{co}$ ,  $\psi = \bar{\psi}_1$ . Тогда, с учетом слабонаправляющего волновода, получим

$$\beta_+ = \beta + \kappa [(n - n_{co}) \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_+ dA / \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_+ dA],$$

где  $n$  – показатель преломления сложного волновода;

$n_{co}$  – показатель преломления сердцевинного волновода;

$A_{\infty}$  – бесконечное поперечное сечение;

$\kappa = 2\pi/\lambda$  – волновое число;

$\lambda$  – длина волны в вакууме.

Полученное выражение при подстановке в (1.1) значительно упрощается. Это связано с экспоненциально малой величиной  $\bar{\psi}_2$  в сердцевине невозмущенного волновода, в знаменателе интегралом от  $\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2$  можно пренебречь по сравнению с интегралом от  $\bar{\psi}_1^2$ . Во-вторых, основной вклад в интеграл в числителе вносит член  $\bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2$ , так как разность  $n - n_{co}$  отлична от нуля лишь вне сердцевинного волновода.

На основе классического подхода волновой оптики выполняется дальнейшее преобразование

$$\beta_{\pm} = \bar{\beta} \pm C,$$

где  $C$  – коэффициент связи, определяющий степень связи мод излучения или расстояние, на котором происходит заданный обмен мощностью между ними. Рассчитывается как интеграл перекрытия составляющих электрических полей связанных мод:

$$C = \kappa \left[ \int_{A_{\infty}} (n - n_{co}) \bar{\psi} \psi dA \right] / \int_{A_{\infty}} \bar{\psi}_1^2 dA. \quad (1.2)$$

При постоянной длине измерительного волокна в ВОА (рис. 1) коэффициент связи является основным вариативным параметром, влияющим на преобразование оптической мощности.

**Цель статьи.** Создание модели преобразования оптической мощности в коаксиальной структуре ВОА маятниковой схемы при воздействии механических колебательных процессов.

**Основная часть.** В (1.2) интеграл в знаменателе пропорционален параметру нормировки  $N$ , а само выражение совпадает с аналогичными формулами, полученными [9, 12] на основе ОТСМ при условии равенства величин диэлектрической проницаемости всех слоев коаксиальной структуры  $\epsilon_1 \approx \epsilon_2 \approx \epsilon_3 \approx \epsilon_4$ .

Подстановка выражений для  $\bar{\psi}_1$ ,  $\bar{\psi}_2$ ,  $N$  в (1.2) и переход к цилиндрическим координатам преобразовывает (1.2) к виду

$$C = (0,5\Delta)^{0,5} U^2 K_0(W) ((\pi \rho^3 V K_1^2(W) J_0(U))^{-1} \times \\ \times \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho} r_2 K_0(W r_1 \rho^{-1}) J_0(V r_2 / \rho) dr_2 d\varphi_2, \quad (1.3)$$

где  $\Delta$  – параметр высоты профиля;

$\rho$  – радиус сердцевинного стержня;

$W = \rho(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{0.5}$  – параметр моды в сердцевине (коаксиальная трубка);

$U = \rho(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{0.5}$  – параметр моды в сердцевине;

$K_0, K_1, J_0$  – функции Бесселя.

Пусть  $m = 0$ ;  $a = W\rho^{-1}$ , произведем подстановку в выражение для модифицированных функций Бесселя [10], тогда

$$K_0(Wr_1/\rho) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} (-1)^\rho K_\rho(Wd/\rho) \times \\ \times I_\rho(Wr_2/\rho) \cos(\rho\varphi_2). \quad (1.4)$$

Из (1.4) с учетом, что в (37.81) [10]  $m = 0$ ;  $a = W\rho^{-1}$ , получаем

$$K_0(Wr_1/\rho) = \int_0^\rho \int_0^{2\pi} r_2 K_0(Wr_1/\rho) \times \\ \times J_0(Ur_2/\rho) dr_2 d\varphi_2 = \quad (1.5) \\ = \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) \cdot \left[ \int_0^{2\pi} \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} (-1)^\rho \times \right. \\ \times K_\rho(Wd/\rho) I_\rho(Wr_2/\rho) \cos(\rho\varphi_2) d\varphi_2 \left. \right] dr_2 = \\ = \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) \cdot \left[ \int_0^{2\pi} (-1)^0 \times \right. \\ \times K_0(Wd/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) d\varphi_2 \left. \right] dr_2 = \\ = 2\pi K_0(Wd\rho^{-1}) \cdot \int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2/\rho) \times \\ \times I_0(Wr_2\rho^{-1}) dr_2 \quad (1.6)$$

Вычислим отдельно интеграл в последнем уравнении. Если в (37.99) [10] примем  $a = U\rho^{-1}, b = W\rho^{-1}, z = r_2$ , тогда

$$\int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2\rho^{-1}) I_0(Wr_2\rho^{-1}) = \\ = r_2 ((U\rho^{-1})^2 + (W/\rho)^2)^{-1} \cdot \{ (W\rho^{-1}) J_0(U\rho r_2) \times \\ \times I_1(W\rho r_2^{-1}) + \\ + (U\rho^{-1}) J_1(U\rho/r_2) I_0(W\rho/r_2) \} |_0^\rho. \quad (1.7)$$

Подставляя в (1.7) вместо  $r_2$  числа  $\rho$  и  $0$ , получаем

$$\int_0^\rho r_2 J_0(Ur_2/\rho) I_0(Wr_2\rho^{-1}) dr_2 = \\ = \rho^3 (U^2 + W^2)^{-1} \cdot \{ W\rho^{-1} J_0(U) I_1(W) + \\ + \rho^{-1} U J_1(U) I_0(W) \} = \rho^3 (U^2 + W^2)^{-1} \cdot \{ W J_0(U) I_1(W) + \\ + U J_1(U) I_0(W) \}. \quad (1.8)$$

Из таблицы 14.3 [10] и (1.8) с помощью характеристического уравнения

$$\frac{U J_1(U)}{J_0(U)} = \frac{W K_1(W)}{K_0(W)}, \\ U^2 + W^2 = V^2,$$

имеем

$$U J_1(U) = \frac{W J_0(U)}{K_0(W)} K_1(W),$$

тогда

$$K_0\left(\frac{Wr_1}{\rho}\right) = \sum_{\rho=-\infty}^{\infty} (-1)^\rho K_\rho\left(\frac{Wd}{\rho}\right) I_\rho\left(\frac{Wr_2}{\rho}\right) \cos(\rho\varphi_2).$$

а

$$\rho^2 V^2 \{ W J_0(U) I_1(W) + \\ + W J_0(U) K_1(W) I_0(W) (K_0(W)^{-1}) \} = \\ = \rho^2 W J_0(U) (V^2 K_0(W))^{-1} \cdot \{ I_1(W) K_0(W) + \\ + K_1(W) I_0(W) \}. \quad (1.9)$$

с учетом рекуррентного соотношения  $K_0(z) I_1(z) + K_1(z) I_0(z) = 1z^{-1}$  получаем преобразование (1.9) к виду

$$\left( \frac{\rho^2 W I_0(U)}{V^2 K_0(W) W} \right) = \frac{\rho^2 I_0(U)}{V^2 K_0(W)}. \quad (1.10)$$

Теперь

$$\int_0^\rho \int_0^{2\pi} r_2 K_0(Wr_1\rho^{-1}) J_0(Ur_2\rho^{-1}) d\varphi_2 r_2 = \\ = 2\pi K_0(Wd\rho^{-1}) \rho^2 J_0(U) \cdot (V^2 K_0(W)^{-1}). \quad (1.11)$$

Вернемся к выражению (1.3)

$$C = (\pi\rho^{-3} (\Delta\lambda^{-1})^{0.5} (U^2 K_0(W) 2\pi\rho^2 \times \\ \times K_0(Wd\rho^{-1}) J_0(U) \times \\ \times ((VK_1(W) J_0(U) V^2 K_0(W))^{-1} = \\ = 2\Delta^{0.5} \rho^{-1} U^2 K_0(Wd\rho^{-1}) \cdot (V^2 K_0(W)^{-1}). \quad (1.12)$$

Из  $K_1(z) \approx (\pi/2z)^{0.5} e^z \{ 1 + (4v^2 - 8z^{-1}) \}$  с учетом подстановки

$v = 0, z = (Wd\rho^{-1})$  получаем

$$K_0(Wd\rho^{-1}) \approx (\pi\rho(2Wd^{-1}))^{0.5} \times \\ \times \exp\{Wd\rho^{-1}\} [1 - (\rho(8Wd^{-1}))] \approx \\ \approx (\pi\rho(2Wd^{-1}))^{0.5} \exp\{Wd\rho^{-1}\}, \quad (1.13)$$

тогда

$$C = (2\Delta)^{0.5} U^2 K_0(Wd/\rho) / (\rho V^3 K_1^2(W)) = \\ = (\Delta\pi(\rho Wd)^{-1})^{0.5} U^2 \exp\{-Wd\rho^{-1}\} \cdot (V^3 K_1^2(W)^{-1}). \quad (1.14)$$

Выражение (1.14) описывает зависимость величины коэффициента связи от геометрических параметров коаксиальной структуры стержень–трубка в статическом режиме.

С учетом уравнения движения подвижной системы маятникового акселерометра и полученных результатов для задачи о крутильных колебаниях ОБ, зависимость показателя преломления от крутильных колебаний для стержня и трубки ОБ со ступенчатым ППП определяется как [8, 13]

$$n_{xz}^c = C_4 \frac{Z(A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t) E_c r_c}{2L(1 + \nu_c)};$$

$$n_{xz}^{o\delta} = C_4 \frac{Z(A_k \cos \omega_k t + B_k \sin \omega_k t) E_{o\delta} r_{o\delta}}{2L(1 + \nu_{o\delta})}, \quad (1.15)$$

где  $A_k, B_k$  – произвольные постоянные;

$E_c, E_{o\delta}$  – модули упругости сердцевин и оболочки;

$\nu_c, \nu_{o\delta}$  – коэффициенты Пуассона стержня и трубки;

$r_c, r_{o\delta}$  – текущие радиусы стержня и трубки;

$\omega_k$  – частота собственных форм колебаний ОВ;

$L$  – длина ОВ.

Подстановка (1.15) в (1.14) дает выражение, описывающее зависимость величины коэффициента связи от геометрических параметров коаксиальной структуры стержень-трубка в режиме динамической деформации.

$$C = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{\sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2) d \rho^2}}} \frac{(\rho \sqrt{\sqrt{(k^2 n_{xzco}^2 - \beta^2)}})}{(k \rho (n_{xzco}^2 - n_{xzcl}^2))^2} \times$$

$$\times \frac{\exp(-\sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2) d})}{K_1^2(\rho \sqrt{(\beta^2 - k^2 n_{xzcl}^2) d})}.$$

Тогда, мощность в стержневой структуре будет определяться как

$$P_R(z) = \left[ 1 - \frac{\sin^2 CL \sqrt{1 + [((\beta_R + \beta_\varepsilon + \beta_H) - (\beta_T + \beta_\varepsilon + \beta_H))/2C]^2}}{1 + [((\beta_R + \beta_\varepsilon + \beta_H) - (\beta_T + \beta_\varepsilon + \beta_H))/2C]^2} \right] P_0,$$

где  $P_0$  – суммарная мощность, введенная в коаксиальную структуру;

$\beta_\varepsilon$  – приращение постоянной распространения из-за возникающей эллиптичности коаксиальной структуры;

$\beta_H$  – приращение постоянной распространения из-за возмущений, нарушающих циркулярную симметрию коаксиальной структуры.

**Выводы.** Получила дальнейшее развитие модель ВОА, что позволило разработать модель измерительного преобразователя для лабораторных измерений и реализовать моделирование устройств для их эффективного проектирования. Развитие модели волоконно-измерительного преобразователя маятниковой схемы на коаксиальных структурах позволяет создать устройства с заданными конструктивными размерами и чувствительностью, которые учитывают особенности

технологического процесса контроля высокочастотной вибрации. Достоверность полученных результатов подтверждена при натурных испытаниях в условиях центральной заводской лаборатории ПАО «Одесский кабельный завод «Одескабель».

Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности проектирования чувствительных элементов волоконных акселерометров на коаксиальных структурах.

### Список литературы

1. Комиссаров С. С. Разработка и исследование волоконно-оптической интерферометрической системы с микромеханическим преобразователем: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.11.07 / С.Пб гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ». Санкт-Петербург, 2016. 18 с.
2. Бадеева Е. А. Научная концепция проектирования волоконно-оптических датчиков давления с открытым оптическим каналом для ракетно-космической и авиационной техники. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* 2016. № 4 (40). С. 102–113.
3. Сандлер А. К., Логишев И. В., Сандлер А. А. Инвариантный волоконный акселерометр. *Энергетика судна: эксплуатация та ремонт: матеріали наук.-техн. конф.* Одеса: ОНМА. 2011. С. 277–279.
4. Сандлер А. К., Сандлер О. А. Инвариантный волоконный акселерометр: Декларационный патент Украины № 62437, МПК G01M 11/00; заявл. 02.02.2011; опубл. 26.10.2011, Бюл. № 18.
5. Сандлер А. К. Волоконно-оптический акселерометр для диагностирования судовых газовых турбин. *Автоматика-2012: матеріали XIX Міжнар. конф. з автомат. упр.* (26–28 верес. 2012 р.). Київ: НУХТ, 2012. С. 336.
6. Сандлер А. К., Логишев И. В. Контроль положения валов судовых механизмов волоконно-оптическими устройствами. *Суднові енергетичні установки: експлуатація та ремонт: матеріали наук.-техн. конф.* Одеса: ОНМА, 2013. С. 110–113.
7. Сандлер А. К., Логишев И. В. Разработка волоконного акселерометра для контроля высокочастотной вибрации судовых механизмов. *Річковий та морський флот: експлуатація та ремонт: матеріали наук.-техн. конф.* Одеса: НУ «ОМА», 2017. Т. 2. С. 14–17.

8. Черненко В. Д. Оптомеханика волоконных световодов. Санкт-Петербург: Политехника, 2010. 291 с.
9. Маркузе Д. Оптические волноводы. Москва: Мир, 1974. 576 с.
10. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. Москва: Радио и связь, 1987. 656 с.
11. Барыбин А. А. Электродинамика волнующих структур. Теория возбуждения и связи волн. Москва: Физматлит, 2007. 512 с.
12. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.
13. Новицкий П. В., Левшина Е. С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Ленинград: Энергия, 1975. 576 с.
5. Sandler, A. K. (2012). A fiber-optical accelerometer for diagnosing of ship gas turbines. *Avtomatyka-2012: materials of the XIX Internat. conf. on automatic control* (Sept., 26–28). Kyiv: NUHT, pp. 336 [in Russian].
6. Sandler, A. K., Logishev, I. V. (2013). Monitoring of provision of ship mechanisms shafts by fiber-optical devices. *Sudnovi enerhetychni ustanovky: ekspluatatsiya ta remont: materials of sci.-tech. conf.* Odesa: ONMA, pp. 110–113 [in Russian].
7. Sandler, A. K., Logishev, I. V. (2017). Development of a fiber accelerometer for monitoring of high-frequency vibration of ship mechanisms. *Richkovyy ta morskyy flot: ekspluatatsiya ta remont: materials of sci.-tech. conf.* Odesa: NU “OMA”, vol. 2, pp. 14–17 [in Russian].
8. Chernenko, V. D. (2010). Optomechanics of fiber light guides. St. Petersburg: Politehnika, 291 p. [in Russian].
9. Markuze, D. (1974). Optical wave guides. Moscow: Mir, 576 p. [in Russian].
10. Snider, A., Lav, D. (1987). Theory of optical wave guides. Moscow: Radio i svyaz, 656 p. [in Russian].
11. Barybin, A. A. (2007). Electrodynamics of waveguide structures. Theory of excitation and wave coupling. Moscow: Fizmatlit, 512 p. [in Russian].
12. Busurin, V. I., Nosov, Yu. R. (1990). Fiber optic sensors: principal bases, questions of calculation and application. Moscow: Energoatomizdat, 256 p. [in Russian].
13. Novitsky, P. V., Levshina, E. S., etc. (1975). Electric measurements of nonelectrical quantities. Leningrad: Energiya, 576 p. [in Russian].

### References

1. Commissarov, C. C. (2016). Development and research of a fiber-optical interferometric system with micromechanical converter: author's abstract for Ph.D. in Engineering: 05.11.07. S.Pb State Electrotechnical University “LETI”. St. Petersburg, 18 p. [in Russian].
2. Badeeva, E. A. (2016). Scientific concept of projection of fiber optic sensors of pressure with an open optical channel for space-rocket and aircraft equipment. *Izvestiya vysshyyh uchebnyh zavedenii. Povolzhskii region. Technicheskiye nauki*, No. 4 (40), pp. 102–113 [in Russian].
3. Sandler, A. K., Logishev, I. V., Sandler, A. A. (2011). Invariant fiber accelerometer. *Enerhetyka sudna: ekspluatatsiya ta remont: materials of sci.-tech. conf.* Odesa: ONMA, pp. 277–279 [in Russian].
4. Sandler, A. K., Sandler, O. A. (2011). Invariant fiber accelerometer: Declarative Patent of Ukraine No. 62437, MPK, G01M 11/00. 02.02.2011. publ. 26.10.2011, Bulletin No. 18 [in Ukrainian].

**A. K. Sandler**, *associate professor*,

*associate professor of the Department of Automatic Control Theory and Computer Engineering, National University “Odessa Maritime Academy”, 8, Didriskhson str., Odessa, 65029, Ukraine*

### MODELING OF FIBER-OPTIC ACCELEROMETER OF PENDULUM TYPE

*Analysis of scientific literature has shown that there is a lack of attention to the processes used in fiber-optic accelerometers, which operate under concentrated impact of destabilizing factors generated by compactly arranged equipment of power unit. Constructive and technological features of accelerometers are not considered, and there is no assessment of their metrological and operational characteristics in these conditions. Accordingly, there is no systematic description of the processes in fiber accelerome-*

ters and, in general, the approach to the solution of this important issue. The author studies the work of pendulum scheme accelerometer to control high frequency vibration in special conditions.

In the developed scheme of the accelerometer the performance of optical fiber in the form of laminated layered structure allows to create and use discrete design diagram. According to this diagram:

a fiber is replaced by a cylinder, consisting of a series of concentric cylindrical layers, within each of which the voltage is considered to be constant. In each layer the refractive index is constant and the field is described by the  $\psi$  function;

to estimate the magnitude of the refractive index in each layer the method of equal volume sections can be used;

the task of coordination of two waveguide structures is considered as an excitation of the receiving antenna by some given field of the radiating antenna.

Based on the modified theory of related modes in tunnel-coupled optical fibers, the coefficient of radiation modes coupling in a coaxial structure, created under the influence of oscillatory processes, has been determined.

The model of fiber-optic accelerometer, which has allowed to develop a measuring converter model for laboratory measurements and realize the devices modeling for their effective design, is further developed.

**Keywords:** fiber-optic accelerometer, optical fiber, coefficient of radiation modes coupling.

**А. К. Сандлер, доцент,**  
доцент кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки  
Національний університет «Одеська морська академія»  
вул. Дідріхсона, 8, м. Одеса, 65029, Україна  
e-mail: albertsand4@gmail.com

### МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА МАЯТНИКОВОГО ТИПУ

Аналіз науково-технічної літератури показав, що недостатньо уваги приділяється процесам у волоконно-оптичних акселерометрах, які працюють в умовах концентрованого впливу дестабілізуючих факторів, що генеруються компактно розташованим обладнанням енергетичного пристрою. Не розглядаються конструктивно-технологічні особливості акселерометрів, і не проводиться оцінювання їх метрологічних та експлуатаційних характеристик у цих умовах. Відповідно, не існує систематизованого опису процесів у волоконних акселерометрах і, загалом, підходу до вирішення цього важливого питання. Автор досліджує роботу акселерометра маятникового типу для контролю високочастотної вібрації в особливих умовах.

У розробленій схемі акселерометра продуктивність оптичного волокна у вигляді шаруватой ступінчастої структури дає можливість створювати і використовувати дискретну розрахункову схему. Відповідно до цієї схеми:

волокно замінюється на циліндр, що складається з ряду концентричних циліндричних шарів, усередині кожного з яких напруга вважається постійною. У кожному шарі показник заломлення є постійним, а поле описується функцією  $\psi$ ;

для оцінювання величини показника заломлення в кожному шарі може бути використано метод профілів рівного об'єму;

завдання координації двох хвилевідних структур розглядається як збудження приймаючої антени деяким заданим полем випромінюючої антени.

На основі модифікованої теорії пов'язаних мод у тунельно-пов'язаних оптичних волокнах було визначено коефіцієнт зв'язку мод випромінювання в коаксіальній структурі, що створюється під впливом коливальних процесів.

Отримала подальший розвиток модель волоконно-оптичного акселерометра, що дало можливість розробити модель вимірювального перетворювача для лабораторних вимірювань і реалізувати моделювання пристроїв для їх ефективного проектування.

**Ключові слова:** волоконно-оптичний акселерометр, оптичне волокно, коефіцієнт зв'язку мод випромінювання.