

МЕТОДИКА ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ РАЗЪЕМОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ

© 2017 В.М. Гречишников, О.В. Теряева

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 21.02.2017

В статье приводятся результаты расчетов оптимальных конструктивных параметров оптических разъёмных соединителей. Постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо найти такие значения конструктивных параметров, при которых обеспечивается компромисс между стоимостью изготовления устройства и потерями, вносимыми отдельными конструктивными факторами. В качестве критерия оптимизации в данном исследовании рассматривался минимум стоимостного функционала. Анализ результатов оптимизации показал, возможность определения оптимальных конструктивных параметров оптической схемы, при которых уровень потерь не превышает допустимый.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, уровень энергопотерь, оптический разъём.

ВВЕДЕНИЕ

Мультисенсорные преобразователи бинарной информации (МСПИ) находят все большее применение в системах управления (СУ) сложными техническими объектами в робототехнике, станкостроении, авиастроении и других отраслях науки и промышленности [1]. Одними из наиболее ответственных элементов МСПИ, определяющими общий энергетический баланс их волоконно-оптической схемы, являются оптические разъёмные соединители (РОС). Стандартные РОС, серийно выпускаемые отечественными и зарубежными производителями [2] для оптических систем связи, состоят из оптической розетки и двух наконечников с установленными в них передающими приемными световодами. Наконечники присоединяются к розетке с помощью резьбового, байонетного или иных типов креплений. Такие РОС обладают низкими энергопотерями, однако их габариты не всегда отвечают требованиям их конструктивной интеграции с малогабаритной датчиковой аппаратурой. В связи с этим возникает **задача создания методов оптимального проектирования параметров специализированных малогабаритных РОС с учетом заданного уровня энергопотерь.**

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве критерия оптимизации чаще всего используется минимум стоимостного функ-

ционала, отображающего зависимость суммарных затрат C_{Σ} на изготовление РОС с учетом зависимостей стоимости изготовления C_i от значения конструктивного параметра x_i [3]. Типовая зависимость $C_i(x_i)$ имеет вид:

$$C_i = C_{0i} + \frac{A_i}{(x_i)^{p_i}},$$

где C_{0i} , A_i , p_i – параметры аппроксимирующей функции.

Графическая иллюстрация этой зависимости приведена на рис. 1,а.

С другой стороны энергетические потери B_i , вносимые i -тым фактором, также зависят от x_i :

$$B(x_i) = 10 \lg[F(x_i, b_1, \dots, b_k)],$$

где x_i, b_1, \dots, b_k – параметры аппроксимирующей функции, причем:

$$F(x_i, b_1, \dots, b_k) \Big|_{x_i^* = 0} = B_0,$$

где B_0 – составляющая общих потерь, независящая от точности изготовления РОС, например, потери ввода излучения от источника в центральный световод оптического демультиплексора с использованием стандартного оптического разъёма, погонные потери, определяемые длиной световода, которая задана в техническом задании на изготовление МСПИ и ряд других.

Типовая зависимость $B(x_i)$ приведена на рис. 1,б. Как видно из рис. 1,а и 1,б, зависимости $C_i(x_i)$ и $B(x_i)$ описывают взаимно противоречивые тенденции: увеличение аргумента этих функций приводит к уменьшению стоимости изготовления и увеличению энергетических потерь и наоборот.

Таким образом, задача оптимизации сводится к отысканию таких значений x_i , при которых обеспечивается компромисс между стоимостью изготовления устройства и потерями, вносимы-

Гречишников Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники. E-mail: gv@ssau.ru

Теряева Ольга Викторовна, аспирант кафедры электротехники. E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

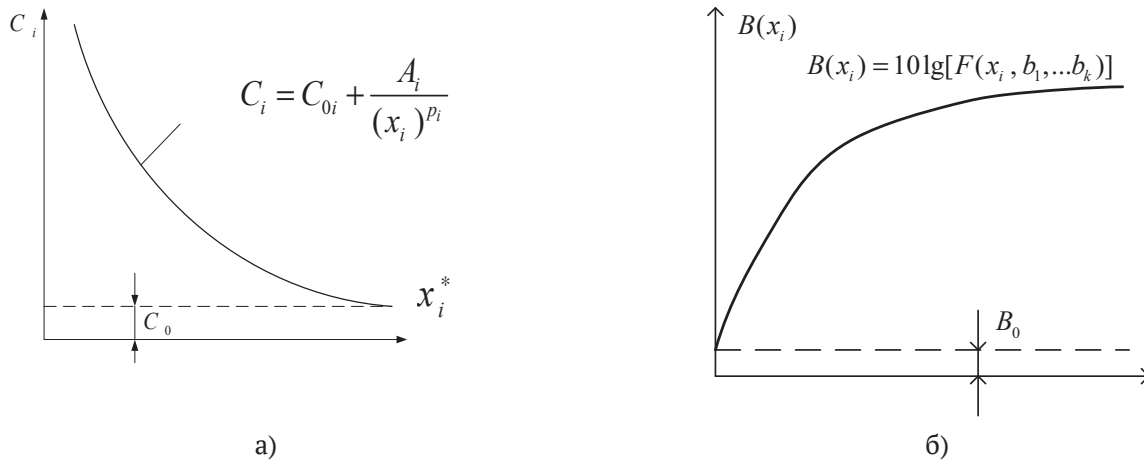


Рис. 1. Типовые зависимости $C_i(x_i)$ и $B(x_i)$

ми отдельными конструктивными факторами.

В общем случае суммарные энергопотери определяются большим числом факторов, поэтому расчет оптимальных значений влияющих факторов сводится к поиску условного экстремума функции многих переменных x_i . Как видно их приведенных графиков, функции $C_i(x_i)$ и $B(x_i)$ непрерывны вместе со своими частными производными в диапазоне изменения аргумента, что позволяет использовать для решения оптимизационной задачи метод множителей Лагранжа [4].

РЕШЕНИЕ

Рассмотрим методику расчета оптимальных значений x_i , предусматривающую обеспечение требуемого значения $B_{дон}$ при минимальном значении стоимости изготовления Φ . Для этого запишем минимизируемую функцию в виде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left(C_{0i} + \frac{A_i}{(x_i)^{p_i}} \right) + \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (a_i \cdot x_i - B_{дон}) \right), \quad (1)$$

где λ_i – множители Лагранжа, устанавливающие связь между стоимостью изготовления элемента и вносимыми им энергопотерями, $[\lambda_i] = \frac{y \cdot e}{\partial B}$, $B_{дон}$ – заданное допустимое значение суммарных потерь.

Как известно, для последовательной схемы включения оптических элементов МПИ суммарные энергетические потери равны сумме потерь от влияния отдельных факторов:

$$B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m B_i,$$

где B_i – энергетические потери, вносимые i -тым фактором, m – число таких факторов.

Следует отметить, что точное нахождение экстремума функционала (1) требует знания конкретных параметров входящих в него выражений для стоимости $C_i(x_i)$ и энергопотерь

$B(x_i)$, которые можно получить, например, экспериментально. Однако в этом случае значения этих параметров для конкретных элементов в значительной степени зависят от применяемого технологического, контрольно-измерительного оборудования и материалов, что приводит к существенному разбросу параметров зависимостей $C_i(x_i)$ и $B(x_i)$. К такому же эффекту приводит неточность рекомендуемых различными авторами математических формул для расчета энергопотерь, полученных с определенными допущениями и ограничениями [4]. Поэтому точное решение задачи оптимизации представляется малореальным.

Однако для случая малых отклонений оптико-механических параметров элементов x_i от номинальных (нулевых) значений, таких как осевые, боковые, радиальные зазоры, несоответствие диаметров, апертур световодов в соединениях и др., справедливо ввести следующие допущения:

$$p_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i = 1; \quad A_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m A_i;$$

$$C_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m C_{0i}. \quad (2)$$

Полученные с учетом введенных допущений значения x_i , строго говоря, являются квазиоптимальными. Однако принятые допущения, с одной стороны, позволяют существенно упростить решение задачи, а с другой – корректно применить полученные результаты для ряда практически важных частных случаев [5].

С учетом принятых допущений стоимостной функционал (1) можно представить в виде:

$$\Phi \approx \sum_{i=1}^m \left(C_{cp} + \frac{A_{cp}}{x_i} \right) + \lambda_{cp} \left(\sum_{i=1}^m a_i \cdot x_i - B_{дон} \right). \quad (3)$$

Уравнение связи представим в виде:

$$B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m a_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^m B_i \leq B_{дон}, \quad (4)$$

где $a_i = \frac{\partial B_{\Sigma}}{\partial x_i}$ – коэффициент влияния i -го фак-

тора на суммарные энергопотери.

Находя частные производные функционала (3) по переменным x_i и приравнивая их к нулю, получим с учетом $p_{cp} = 1$ систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Phi}{dx_1} &= -\frac{A_{cp}}{x_1^2} + \lambda_{cp} a_1 = 0 \\ \frac{d\Phi}{dx_i} &= -\frac{A_{cp}}{x_i^2} + \lambda_{cp} a_i = 0 \\ \frac{d\Phi}{dx_m} &= -\frac{A_{cp}}{x_m^2} + \lambda_{cp} a_m = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Из первого уравнения системы (5) находим:

$$\lambda_{cp} = \frac{A_{cp}}{a_1 \cdot x_1^2}. \quad (6)$$

Из второго уравнения системы (5) получим:

$$\frac{A_{cp}}{a_i x_i^2} = \frac{A_{cp}}{a_1 x_1^2}. \quad (7)$$

Приравняем выражения (7) и (6):

$$\frac{A_{cp}}{a_i x_i^2} = \frac{A_{cp}}{a_1 x_1^2}. \quad (8)$$

Тогда:

$$x_i^2 = x_1^2 \cdot \frac{a_1}{a_i}.$$

Откуда:

$$x_i = x_1 \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a_i}}. \quad (9)$$

С учетом уравнения связи (4) можно записать:

$$B_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^n x_1 \cdot \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_i}} \cdot a_i = x_1 \cdot \sqrt{a_1} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i}.$$

Откуда

$$x_1 \leq \frac{B_{don}}{\sqrt{a_1} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i}}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (9) получаем расчетную формулу:

$$x_i \leq \frac{B_{don}}{\sqrt{a_1} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i}}. \quad (11)$$

Для проверки правильности полученной формулы осуществим проверку с использованием уравнения связи (4):

$$\begin{aligned} B_{\Sigma} &= \sum_{i=1}^n a_i \cdot x_{i\text{опт}} \leq B_{don} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\sqrt{a_i} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{a_i}} = B_{don} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{a_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{a_i}} = \\ &= \left\{ \begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{a_i}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{a_i}} &= \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2} + \dots + \sqrt{a_n}} + \frac{\sqrt{a_2}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2} + \dots + \sqrt{a_n}} + \dots + \frac{\sqrt{a_n}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2} + \dots + \sqrt{a_n}} = \\ &= \frac{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2} + \dots + \sqrt{a_n}}{\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2} + \dots + \sqrt{a_n}} = 1 \end{aligned} \right\} = B_{don} \end{aligned} \quad (12)$$

Следовательно, методика верна.

ПРИМЕР ОПТИМАЛЬНОГО РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОС

Пусть в каждом оптическом канале МПИ содержится n одинаковых последовательно включенных РОС. Доминирующими источниками энергетических потерь в них являются осевое смещение h , радиальное смещение l , угловое смещение Θ осей световодов (см. рис. 2). Оптические потери каждого РОС равны:

$$B_{OP} = B_h + B_l + B_{\Theta},$$

где B_h – потери за счет осевого смещения, B_l – потери за счет радиального смещения, B_{Θ} – потери за счет углового смещения. Тогда для случая последовательного соединения n разъемов:

$$B_{\Sigma} = n \cdot (B_h + B_l + B_{\Theta}).$$

Пусть $n = 3$, допустимое значение суммарных энергопотерь для трех разъемов $B_{don\Sigma} = 1 \text{ дБ}$,

причем, $B_h = B_l = B_{\Theta} = \frac{B_{don\Sigma}}{3}$. Тогда, применяя

формулу (11), полагая что $a_i = a_h$, получим:

$$x_{h\text{опт}} \leq \frac{B_{don}}{\sqrt{a_h} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{a_h} \right)} = \frac{B_h}{3a_h}.$$

Аналогично:

$$x_{l\text{опт}} = \frac{B_l}{3a_l}, \quad x_{\Theta\text{опт}} = \frac{B_{\Theta}}{3a_{\Theta}}.$$

Вычислим значения $x_{h\text{опт}}$, $x_{l\text{опт}}$, $x_{\Theta\text{опт}}$, если диаметр волокна $d = 50 \text{ мкм}$, а относительный показатель преломления $\Delta = 0,01$. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

В рассмотренном примере выражение (11) используется для расчета однотипных потерь, что соответствует введенным выше допущениям (2). Таким образом, используя вышеприведенную методику расчета, можно определить оптимальные конструктивные параметры оптической схемы, при которых уровень потерь не превышает допустимого. Указанная методика может быть использована также и для других видов потерь (например, из-за рассогласования числовой апертуры, или изгибов волокна) [1, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена методика оптимального выбора конструктивных параметров МПИ и их отклонений от номинальных значений по минимуму функции стоимости изготовления. Указанная методика учитывает различия зависимости стоимости от точности изготовления механических и электронных элементов МСПИ и позволяет избежать неоправданных энергетических потерь и экономических затрат. Данная методика позволяет выбрать оптимальные конструктивные параметры, не прибегая к дорогостоящим экспериментам. Отметим, что достоверность результатов расчета зависит от корректности аналитических

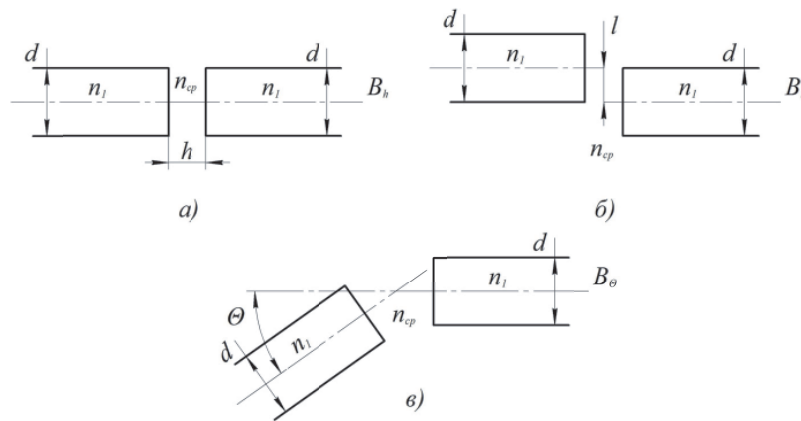


Рис. 2. Доминирующие источники энергетических потерь в ОР:
а – потери при осевом смещении; б – потери при радиальном смещении; в – потери при угловом смещении

Таблица 1. Результаты вычислений значений x_{hOPT} , x_{lOPT} , $x_{\theta OPT}$,

Энергетические потери, вносимые i -ым фактором	Коэффициент влияния i -ого фактора, a_i	Оптимальное значение i -ого параметра, x_{iOPT}
$B_h = 2,46 \frac{h}{d} \sqrt{\Delta}$	0,0049	22,7 мкм
$B_l = 2,77 \frac{l}{d}$	0,055	2 мкм
$B_\theta = 2,77 \frac{\theta}{\sqrt{2 \cdot \Delta}}$	19,6	0,0057 рад

выражений для энергопотерь, вид которых зависит от типа оптического волокна и технологии изготовления РОС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубилевич А.Л., Колесников В.А., Труханов А.В. Потери в соединениях оптических волокон // Технологии информационного общества. 2013. № 8. С. 51-53.
2. Гречишников В.М. Схемотехника волоконно-оптических устройств [Электронный ресурс]: электрон, учеб. Пособие. Минобрнауки России, Самар, гос. аэрокосм, ун-т им. С. П. Королева (нац. ис-след. ун-т). Электрон. текстовые и граф. дан. (17,1 Мбайт). Самара, 2012. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
3. Ларин Р.М., Плясунов А.В., Пяткин А.В. Методы оптимизации. Примеры и задачи: уч. пособие. Новосибирский университет. Новосибирск, 2003.
4. Волоконная оптика и приборостроение / М.М. Бутусов, С.Л. Галкин, С.П. Оробинский, Б.П. Пал [под ред. М.М. Бутусова]. Л. : Машиностроение, 1987. 328 с.
5. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. Fiber-optical converter onboard sensors mechanization of aircraft mechanization devices // Russian Aeronautics. 2016. Vol. 59. No. 3. P. 426-432.
6. Бутусов М.М., Верник С.М. и др. Волоконно-оптические системы передачи. М.: Радио и связь, 1992. 416 с.

METHOD OF OPTIMUM CHOICE OF DESIGN FACTORS OF SPECIAL OPTIC CONNECTORS FOR SENSOR EQUIPMENT

© 2017 V.M. Grechishnikov, O.V. Teryaeva

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article describes the results of forecasting of the optimal values of working process parameters of a sixth generation turbofan by means of numerical simulation. The problem statement: the optimal values of working process parameters of a separate-flow three-spool performed for each combination of the optimizable values. The results of optimization show that with an increase in the working process parameters, bypass ratio and flight range the regions of locally-optimal values are widening for a given value of criterion concession. The values of specific fuel consumption of the sixth generation turbofan engines intended for the subsonic passenger airplanes are predicted at the level of 42..45 kg per kN per hour.

Keywords: GAS turbine engine, numerical simulation, optimization, working process parameters.

Vladimir Grechishnikov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Electrical Engineering Department. E-mail: gv@ssau.ru
Olga Teryaeva, Postgraduate Student at the Electrical Engineering Department. E-mail: arefeva_olga@inbox.ru