И.А. Соколов, *канд. техн. наук, генеральный директор;*
Д.М. Инденбаум, *директор по производству;*
С.М. Вилков, *д-р техн. наук, технический эксперт;*
С.А. Шун, *ст. инженер-технолог;*
С.В. Сироткин, *ст. инженер-технолог;*
ООО «Оптен-Кабель»

РАСЧЕТ геометрических характеристик кабелей с учетом зазоров между элементами повива

При конструировании кабелей на основе однонаправленного повива используется выражение, которое устанавливает связь между количеством элементов повива (далее ЭП) n, их диаметром $d = 2r$, шагом скрутки H и диаметром центрального тела (центрального силового элемента или оптического сердечника – далее ЦТ) $d_0 = 2r_0$ [1]. Это выражение, которое носит чисто геометрический характер, впервые было получено профессором П.П. Нестеровым [2] и для диаметра ЦТ имеет вид:

$$\mathbf{d_0 = d\left[\sqrt{1+\frac{ctg^2\frac{\pi}{n}}{\sin^2\theta}}-1\right]}, \qquad (1)$$

где $\theta = \mathrm{arctg}\dfrac{H}{\pi(d+d_0)}$.

При этом считается, что все ЭП плотно, без зазоров прилегают друг к другу, то есть рассматривается «идеальная» модель повива.

Выражение (1) может быть применимо ко всем структурам, состоящим из одинаковых цилиндрических элементов, навитых по спирали вокруг центрального цилиндрического элемента. К конструкциям оптических кабелей оно может быть применено как для расчета скрутки оптического сердечника, так и для расчета бронеповива.

Однако известно, что на практике при изготовлении кабеля возможны отклонения геометрических размеров его элементов от «номинала». Кроме того, приходится использовать дискретные значения диаметров ЦТ и ЭП (например, стеклопластикового прутка). Наиболее неприятным оказывается такое сочетание отступлений геометрических размеров, когда диаметр ЭП (например, проволоки) имеет положительный допуск, а ЦТ – отрицательный. В этом случае возможен выход проволоки из повива.

Практика изготовления оптических кабелей на заводе «Оптен-Кабель» показывает, что только с введением зазоров между ЭП, компенсирующих возможные отклонения от их номинальных размеров, на этапе конструирования кабеля можно добиться высокого качества продукции. Причем величина зазоров должна выбираться с таким расчетом, чтобы, с одной стороны, ЭП не «наваливались» друг на друга, выходя из повива, с другой – ЦТ не «выходило» из повива (например, выход центрального силового элемента из повива скрутки).

Очевидно, для учета таких зазоров между ЭП необходимо внести коррективы в формулу (1). Иными словами, нужно получить зависимость, которая бы устанавливала связь между количеством ЭП, их диаметром, величиной зазора между ними Δ, шагом скрутки и диаметром ЦТ (зазоры между ЭП и их диаметры считаем одинаковыми).

На рис. 1 показан фрагмент сечения повива плоскостью, перпендикулярной оси кабеля. Очевидно, что сечение ЭП такой плоскостью представляет собой эллипс.

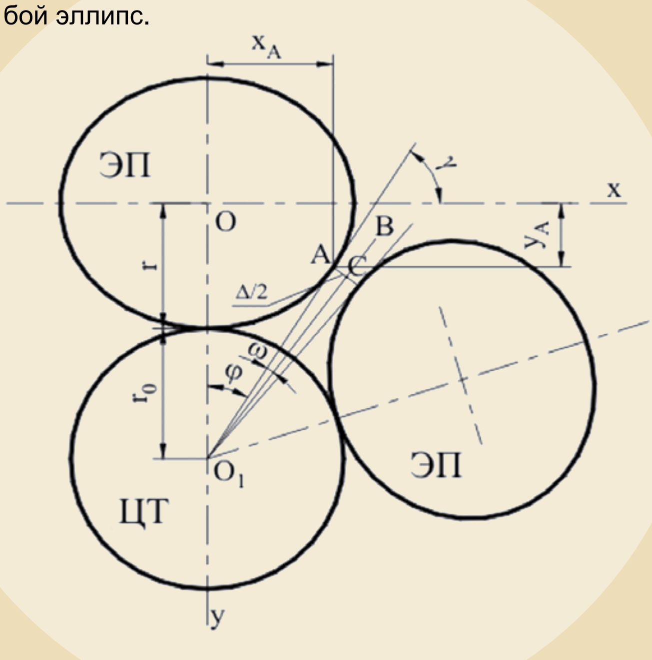

Рис. 1. *Фрагмент сечения повива кабеля*

После некоторых преобразований с учетом малости угла ω (рис. 1) можно получить искомую зависимость вида:

$$\mathrm{ctg}\frac{\pi}{n} = \frac{(2d+d_0)d_0\sqrt{1+\left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}-\Delta d\sqrt{1+\left(\frac{\pi(d+d_0)}{H}\right)^2}}{\sqrt{2dd_0+d_0^2}\left[\Delta+d\sqrt{1+\left(\frac{\pi(d+d_0)}{H}\right)^2}\sqrt{1+\left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}\right]}. \qquad (2)$$

Выражение (2) устанавливает связь величины зазора между ЭП (Δ) с параметрами однонаправленного повива n, d, d_0 и H.

Как правило, при конструировании кабеля приходится по заданным величинам зазора, диаметра и числа ЭП, а также шага скрутки подбирать диаметр ЦТ. Однако такая зависимость вида $d_0 = F(\Delta, d, n, H)$, полученная на основе выражения (2) с помощью алгебраических преобразований, оказывается громоздкой и неудобной для практических расчетов.

Можно получить решение уравнения (2) относительно d_0 численно. Но и этот путь также представляется неудобным для практического применения.

Построим приближенное решение уравнения (2), вводя некоторые упрощения.

Для удобства выкладок введем следующие обозначения:

$$A = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}, \quad B = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi (d + d_0)}{H}\right)^2}, \quad C = \frac{1}{2}\sqrt{2 d d_0 + d_0^2}. \qquad (3)$$

Возведем в квадрат обе части равенства (2). В результате с учетом выражения (3) получим:

$$\mathrm{ctg}^2\frac{\pi}{n} = \frac{4A^2C^4 - 2\,\Delta\, d\, A\, B\, C^2 + \Delta^2\left(\frac{d}{2}\right)^2 B^2}{C^2\left[\Delta^2 + 2\,\Delta\, d\, A\, B + d^2A^2B^2\right]}. \qquad (4)$$

Анализ этого выражения показывает, что члены, содержащие множитель Δ^2, существенно меньше остальных (суммарная величина зазора в повиве ($n\Delta$), как правило, не превышает радиус r ЭП), поэтому ими можно пренебречь. В результате имеем:

$$\mathrm{ctg}^2\frac{\pi}{n} = \frac{2\left(2\,A\,C^2 - \Delta\, d\, B\right)}{d\, B\left(2\Delta + d\, A\, B\right)}. \qquad (5)$$

Разрешая это уравнение относительно диаметра ЦТ, с учетом выражения (3) после преобразований окончательно получим:

$$d_0 = d\left[\sqrt{\frac{\left(1 + \mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n}\right)}{\left[\mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n} - \left(\frac{\pi d}{H}\right)^2\right]}\left[1 + \frac{2\Delta}{d}\,\frac{\mathrm{tg}\frac{\pi}{n}\sqrt{1 + \left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}}{\sqrt{\mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n} - \left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}}\right]} - 1\right]. \qquad (6)$$

Практический опыт, накопленный на заводе «Оптен-Кабель», показывает, что для различных маркоразмеров кабелей зазор можно принять равным $\Delta = r / n$. Для такого зазора погрешность от замены численного решения (например, методом касательных [3]) уравнения (2) приближенным (6) не превышает 0,5 %. Таким образом, для определения диаметра ЦТ с учетом зазоров между ЭП вместо выражения (2) можно использовать более простую зависимость (6).

В случае если зазоры между ЭП отсутствуют ($\Delta = 0$), формула (6) приобретает вид:

$$d_0\big|_{\Delta=0} = d\left[\sqrt{\frac{1 + \mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n}}{\mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n} - \left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}} - 1\right]. \qquad (7)$$

Можно показать, что формулы (1) и (7) полностью совпадают. Однако формула (1) представляется менее удобной для практических расчетов, поскольку из-за зависимости величины θ от d_0 требуется проведение итераций.

Заметим, что выражениями (6) и (7) можно пользоваться формально при выполнении условия $\frac{H}{\pi d}\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{n}\right) > 1$ или более жесткого условия $H > nd$.

Возможен другой, упрощенный путь определения диаметра ЦТ с учетом зазоров, если принять, что ЭП прилегают друг к другу без зазоров, но при этом их большие полуоси увеличиваются на $\frac{\Delta}{2}$ (в действительности это приращение будет несколько больше). В этом случае можно записать приближенное равенство:

$$\pi d_0 = \pi\left(d_0\big|_{\Delta=0} + x\right) \approx \pi d_0\big|_{\Delta=0} + n\Delta, \qquad (8)$$

где x – увеличение диаметра ЦТ из-за введения зазоров между ЭП.

Теперь вместо формулы (6) можно записать:

$$d_0 \approx d\left[\sqrt{\frac{1 + \mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n}}{\mathrm{tg}^2\frac{\pi}{n} - \left(\frac{\pi d}{H}\right)^2}} - 1\right] + \frac{\Delta n}{\pi}. \qquad (9)$$

Расчеты показывают, что погрешность от замены формулы (6) формулой (9) не превышает 3 % и быстро падает с ростом числа ЭП. Поэтому формула (9) может быть рекомендована для практических расчетов.

Выводы

1. При изготовлении оптического кабеля всегда имеют место отступления от идеальной геометрии элементов повива, поэтому конструирование кабеля без учета зазоров может привести к снижению его качества.

2. Получены формулы для определения диаметра ЦТ с учетом зазоров между ЭП, которые не требуют проведения итерационных процедур.

Литература

1. *Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В.* Волоконно-оптические кабели и линии связи. М.: Эко-Трендз, 2002. 283 с.
2. *Нестеров П.П.* Основы конструирования шахтных подъемных канатов. М.-Л.: Углетехиздат, 1949. 211 с.
3. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. М.: ООО «Большая Медведица», 2000. 864 с.