

07;12

©1994 г.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ФАЗОВЫЕ МОДУЛЯТОРЫ НА НИЗКИЕ ЧАСТОТЫ

В.Г.Коваленко, А.И.Сазонов

Институт радиотехники и электроники РАН,
141120, Фрязино, Россия
(Поступило в Редакцию 31 января 1994 г.)

Созданы и исследованы две конструкции волоконно-оптических фазовых модуляторов на резонансные частоты, существенно более низкие, чем низшие резонансы распределенных колебательных систем подобного размера — колец, цилиндров и т.п. Фазовая модуляция является результатом упругооптического эффекта при растяжении световода, намотанного по периметру модулятора. Снижение резонансной частоты достигнуто значительным уменьшением жесткости упругих элементов. Показано, что резонансная частота решающим образом зависит от упругих свойств световода. Жесткость растягиваемых волоконных отрезков составила от половины до 0.75 от общей жесткости в модуляторе. Получены резонансные частоты в диапазоне 1.3–6.5 кГц с возможностью грубой и тонкой подстройки. Добротности резонансных пиков были в пределах 30–120. Модуляторы имели эффективность фазовой модуляции от 30 до 68 рад/В, а эффективность модуляции на 1 см растягиваемой длины световода равнялась 0.7–1.5 рад/В·см.

В датчиках на основе волоконных кольцевых интерферометров (ВКИ), например в гироскопах, фазовые модуляторы служат для создания невзаимной разности фаз между встречными волнами. Наиболее распространенными являются модуляторы, представляющие собой механический резонатор, на который намотан с натяжением волоконный световод [1]. С помощью пьезокерамики, на которую подается переменное напряжение, в резонаторе возбуждаются колебания, приводящие к изменению длины витков световода, а следовательно, к фазовой модуляции (ФМ). В ВКИ две световые волны распространяются по одному и тому же волоконному контуру навстречу друг другу и фазовый модулятор, стоящий на одном из концов контура, действует на них неодинаково вследствие запаздывания τ — времени пробега волны по контуру. Создаваемая между волнами невзаимная разность фаз (динамическая подставка) φ_k связана с амплитудой ФМ (девиацией фазы) φ_m самого модулятора следующим соотношением:

$$\varphi_k = 2\varphi_m \sin(\Omega_m \tau / 2) = 2\varphi_m \sin(\pi f_m / 2f_{opt}), \quad (1)$$

где $\Omega_m = 2\pi f_m$ — частота фазовой модуляции; f_{opt} — “оптимальная” частота ФМ, при выборе которой синус равен единице.

В ряде схем цельноволоконных гироскопов используется гармоническая фазовая модуляция на двух частотах [2]. Первый (основной) модулятор работает на "оптимальной" частоте, при которой снижается вклад рэлеевского рассеяния и других факторов в шум ВКИ [3]. Она равна 100 кГц для типичной длины контура 1 км и достигается при низшем радиальном резонансе таких форм, как цилиндры, диски, кольца [1]. Частота второго модулятора должна быть низкой, порядка 1-5 кГц, а создаваемая им в контуре динамическая подставка φ_k — около 5 рад. Как следует из вышеприведенного соотношения, сам модулятор должен создавать девиацию φ_m в десятки, а то и больше сотни радиан. Нередко этого достигают, наматывая на пьезоцилиндр очень много витков волокна и возбуждая колебания высоким напряжением на частоте, которая гораздо ниже частоты первого радиального резонанса. Большие напряжения сопряжены с нелинейностью пьезокерамики, наводками и другими нежелательными явлениями.

Этих недостатков лишены резонансные системы. При колебаниях простого или составного вибратора на частоте низшего резонанса напряжение, необходимое для получения требуемой оптической модуляции, снижается примерно в Q раз, где Q — добротность резонанса. Однако использовать низшие радиальные резонансы таких форм, как цилиндры, диски, кольца, уже нельзя. Например, для частоты 3 кГц пьезокольцо должно иметь диаметр ≈ 50 см.

Для снижения резонансных частот обычно переходят от систем с распределенными параметрами типа цилиндров и колец к резонаторам с сосредоточенными параметрами, где "масса" и "жесткость" (упругость) сконцентрированы в отдельных элементах конструкции. Как известно, в системе с сосредоточенными постоянными $F_0 = \sqrt{K/M}$, где M — ее масса, K — эффективная жесткость. Для угловых колебаний есть аналогичное соотношение

$$F_0 = \sqrt{K_\varphi/J}, \quad (2)$$

где J — момент инерции относительно оси колебаний, K_φ — угловая жесткость относительно той же оси.

Линейная жесткость K упругого элемента, расположенного на расстоянии r от оси, пересчитывается в угловую K_φ по формуле $K_\varphi = K \times r^2$. Частоту резонанса F_0 снижают главным образом путем значительного уменьшения жесткости системы.

В данной работе описаны две конструкции резонансных низкочастотных (НЧ) фазовых модуляторов, основанных на растяжении намотанного по периметру волокна.

Наиболее проста в изготовлении первая разработанная конструкция НЧ модулятора типа "камертон" (рис. 1,а). Она сделана на основе двух колец: металлического и пьезокерамического, причем внешний диаметр пьезокольца должен быть равен внутреннему диаметру металлического. Металлическое кольцо разрезано в одном месте и получившиеся концы загнуты внутрь. В пьезокольце удален сегмент \approx в 120° и затем получившийся пьезоэлемент 3 вклеен в охватывающую его "подкову" 1 из металла. В результате образован биморфный пьезопреобразователь с одной активной обкладкой (пьезоэлемент) и одной пассивной (металл).

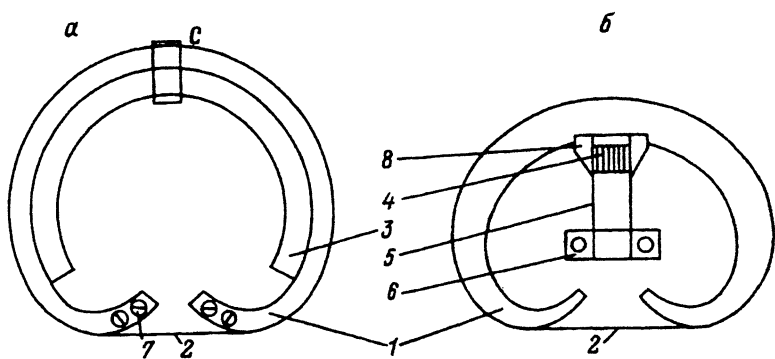


Рис. 1. Волоконно-оптические фазовые модуляторы с резонансом на низкой частоте.

a — “камертон”, *б* — *C*-кольцо. 1 — металлическая “подкова”, 2 — растягиваемые отрезки намотанного волокна, 3 — пьезоэлемент, 4 — пьезостолбик, 5 — пластинки крепления модулятора, 6 — крепящая деталь, 7 — шпильки для подстройки частоты резонанса F_0 , 8 — упоры.

На боковую поверхность “подковы” намотан стягивающий ее световод 2. Для плавного перехода от заклеенных участков намотанного волокна к прямолинейным растягиваемым отрезкам концы металлической “подковы” загнуты на оправке с максимально возможным радиусом кривизны. Весь “камертон” закреплен в равноудаленном от концов месте *C*, являющемся узлом изгибных колебаний конструкции. Момент инерции можно менять, вкручивая шпильки 4 в отверстия, сделанные в загнутых металлических концах.

Первый образец модулятора типа “камертон” имел высоту 5 мм, внешний диаметр $D = 46$ мм, массу 26 г и сделан был из латунного кольца $\varnothing 46 \cdot \varnothing 40 \cdot 5$ мм и вклеенной внутрь “пьепоподковы”, сделанной из пьезокольца $\varnothing 40 \cdot \varnothing 32 \cdot 5$ мм с вырезанным сегментом в 120° (рис. 1, *a*). Минимальный радиус изгиба волокна на латунной “подкове” был 10 мм, растягивалось 13 отрезков длиной по 25 мм, волокно было закреплено цапон-лаком.

Был также сделан и испытан образец “камертона” тех же размеров, но удвоенной высоты — 10 мм. Внутри него были вклеены два, вышеописанных пьезоэлемента. Длина растяжки волокна 26 мм, радиусы изгиба 6 мм.

Конструкция НЧ ФМ типа “камертон” предельно проста в изготовлении и вполне удовлетворяет обычным лабораторным требованиям. Вместе с тем исходя из приборных требований была разработана вторая конструкция НЧ модулятора, типа *C*-кольцо. Она более сложна в изготовлении, но позволяет обеспечить больший диапазон перестройки резонансной частоты, а также улучшить акустическую развязку между корпусом и шасси. Вид ее показан на рис. 1, *б*. На разрезанное металлическое “кольцо” 1 *C*-образной формы намотано волокно 2. В верхней части этого кольца с внутренней стороны между уголками 3, впаянными в паз в кольце, находится пьезостолбик 4.

При подаче на пьезостолбик гармонического сигнала в кольце 1 возникают изгибные колебания. Частота этих колебаний, как будет показано ниже, определяется размерами кольца, жесткостью и количеством витков намотанного волокна, а также местоположением пьезостолбика в пазе.

Выбор С-образной формы "кольца" обусловлен необходимостью иметь большую длину растягиваемых волокон и максимально возможный радиус изгиба волокна (при заданных размерах модулятора). Первое условие необходимо для получения большей эффективности модуляции и снижения резонансной частоты, второе — для уменьшения потерь и паразитных видов модуляции, в сильной степени зависящих от кривизны изгиба волокна.

"Кольцо" 1 было изготовлено следующим образом. Был выточен диск с необходимым внешним диаметром D . Затем в диске было выточено отверстие диаметром d со сдвигом δ относительно центра диска. Полученное кольцо растягивалось перпендикулярно своей оси симметрии до получения размера D_{\max} . Затем был вырезан участок в нижней части и сверху паз для уголков. После этого концы были загнуты на оправке.

Крепление модулятора осуществлялось через деталь b , связанную с модулятором двумя тонкими гибкими пластинками 5 . Эти пластинки припаяны как к детали b , так и к уголкам 3 . Крепление модулятора через тонкие пластинки вызвано необходимостью обеспечить хорошую взаимную развязку модулятора как колебательной системы и элементов той конструкции, на которой он закреплен.

Модуляторы данной конструкции были выполнены в двух вариантах: на частоту 2.6 и 6 кГц. Модулятор на 2.6 кГц имел следующие размеры: $D = 44$ мм, $d = 36$ мм, $D_{\max} = 48$ мм, $\delta = 2$ мм. Длина растягиваемых частей волокна $l = 18$ мм. Минимальный радиус изгиба волокна $R_{\min} = 14$ мм. На модуляторе было намотано 19 витков волокна диаметром 75 мкм. Масса модулятора $M = 22$ г.

Модулятор на 6 кГц соответственно имел $D = 34$ мм, $d = 28$ мм, $D_{\max} = 38$ мм, $\delta = 2$ мм, $l = 18$ мм, $R_{\min} = 11$ мм и массу $M = 18$ г. Было намотано 22 витка волокна диаметром 125 мкм.

Оба модулятора имели одинаковую толщину 6 мм, выполнены из латуни и возбуждались одним и тем же пьезостолбиком 4. Он был склеен из 20 пластинок пьезокерамики ПТС-19 толщиной 0.3 мм и имел размер $4.5 \times 4.5 \times 6$ мм.

Пьезостолбик мог быть передвинут между уголками с небольшим усилием. Для этого паз под уголки и сами уголки были изготовлены с необходимой точностью. После намотки волокна пьезостолбик оказывался зажатым сильно и, чтобы вставить, вынуть или передвинуть пьезостолбик, необходимо было каким-либо распором несколько развести загнутые концы модулятора. Передвижение пьезостолбика использовалось для грубой настройки частоты F_0 .

Для определения оптических характеристик модуляторы вставлялись в кольцевой интерферометр Саянъяка, описанный в [4], на одном из концов волоконного контура. Методика измерений описана в [4]. Частотные характеристики самих модуляторов пересчитывались на ЭВМ из экспериментальных данных с учетом соотношения (1). Был также разработан метод расчета весьма важной характеристики резонансных модуляторов — их добротности Q . Она характеризует не только качество конструкции и ее эффективность, но и способность фазового модулятора работать в схемах гироскопа с привязкой частоты генератора к пику оптического резонанса F_0 , что дает возможность избавиться от влияния дрейфа F_0 .

Основой для машинной аппроксимации экспериментальной АЧХ фазового модулятора служила Лоренцева кривая, описывающая удлинённый резонанс любой колебательной системы,

$$S = \frac{S_{\max}}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{F_0} - \frac{F_0}{f} \right)^2}}, \quad (3)$$

где F_0 — частота резонанса, Q — его добротность.

Q , как видно из (3), определяет полосу частот $\Delta f = F_0/Q$, на границах которой значение S падает в $\sqrt{2}$ раза, т.е. равно 0.7^1 от S_{\max} . Для описанных конструкций значение Q было в пределах 35–120, т.е. достаточное для работы в схемах с автоподстройкой частоты.

Угловая жесткость модулятора K_φ^M складывается из жесткости натянутых волокон K_φ^B и жесткости пьезометаллической конструкции $K_\varphi^П$

$$K_\varphi^M = K_\varphi^П + K_\varphi^B = K_\varphi^П + K \cdot L^2, \quad (4)$$

где L — расстояние от растягиваемых отрезков до условной оси угловых колебаний, K — линейная жесткость волокон.

Упругие свойства волокна с достаточной точностью неизменны вдоль всего намотанного куска, поэтому $K = N \cdot K_{B/1} = N \cdot S_0 E_B / l_B$, где N — число отрезков волокон, $K_{B/1}$ и l_B — жесткость и длина одного растягиваемого волоконного отрезка, S_0 и E_B — площадь поперечного сечения и модуль Юнга волокна. Следовательно, квадрат резонансной частоты F_0^2 должен быть, согласно (2) и (4), линейной функцией N — числа натянутых волокон.

Для выяснения этой зависимости с модуляторов постепенно снимались волоконные витки и каждый раз определялась резонансная частота.

Линейная жесткость (упругость) $K_{B/1}$ используемых волокон была измерена отдельно, исходя из их удлинения под весом известного груза.

Снижение квадрата резонансной частоты F_0^2 при уменьшении числа витков N для первой и второй конструкций отражено на рис. 2 и 3. Как видно из графиков, зависимость квадрата резонансной частоты F_0^2 от уменьшения числа натянутых отрезков волокна N хорошо согласуется с линейным законом, вытекающим из соотношений (2) и (4). В результате жесткость самой пьезометаллической конструкции $K_\varphi^П$ может быть определена как в относительных единицах (число витков используемого волокна), так и в абсолютных. Это позволяет для любого типа волокна указать необходимое число витков намотки для получения заданной резонансной частоты. В нашем случае на образцы фазовых модуляторов типа “камертон” было намотано оптическое волокно диаметром 75 мкм с жесткостью $K_B = 7.05 \cdot 10^{10}$ Н/м². Собственная жесткость пьезоконструкции $K_\varphi^П$ оказалась равной жесткости соответственно 16.65 и 30.2 витков (рис. 2 и 3) или $2.08 \cdot 10^5$ и

¹ Нередко добротность оценивают по величине $F_0/\Delta f$ на уровне 0.5 от S_{\max} , что дает значение Q , заниженное в $\sqrt{3}$ раза.

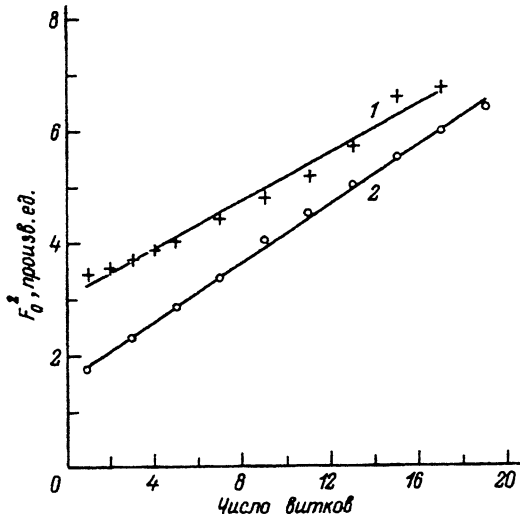


Рис. 2. Зависимость квадрата резонансной частоты F_0^2 от числа намотанных витков N .

1 — для НЧ ФМ типа “камертон”,
2 — для конструкции типа С-кольцо.
Сплошные линии — линейное приближение данных по методу наименьших квадратов.

$3.77 \cdot 10^5$ Н/м (учтена длина растяжения волокна). На экземпляр модулятора типа С-кольцо, предназначенный для настройки на 2.6 кГц, было намотано оптическое волокно диаметром 80 мкм с жесткостью $K_v = 1.19 \cdot 10^{11}$ Н/м², причем его собственная жесткость (без волокна) оказалась равной $1.99 \cdot 10^5$ Н/м (\cong 6 витков).

Наинизшая резонансная частота фазовой модуляции при одном оставленном волоконном витке для ФМ типа “камертон” достигла соответственно 1.86 и 1.75 кГц, а для ФМ типа С-кольцо — 1.32 кГц.

В конструкции НЧ модулятора типа С-кольцо была также исследована зависимость резонансной частоты F_0 от смещения Δ пьезостолбика вдоль паза (Δ — расстояние до вершины паза). Из приведенных на рис. 4 данных видно, что зависимость сильная и это свойство было использовано для настройки модулятора на заданную F_0 . Падение F_0

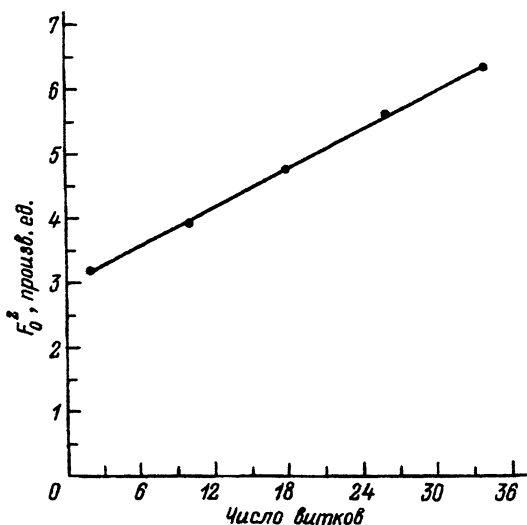


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для НЧ ФМ типа “камертон” удвоенной высоты.

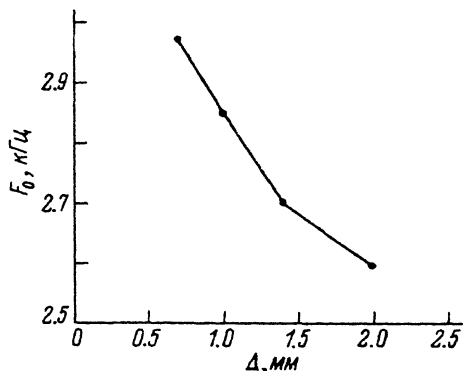


Рис. 4. Изменение резонансной частоты F_0 НЧ модулятора типа С-кольцо при смещении пьезостолбика Δ от вершины паза (см. рис. 1,б) ближе к растягиваемым отрезкам волокна.

с увеличением Δ объясняется, видимо, тем, что пьезостолбик частично выходит из жестких упоров \mathcal{Z} (концы их, "сходящие на нет", следует считать полужесткими) и его вклад в общую жесткость конструкции падает, F_0 снижается.

В модуляторе на 2.6 кГц исследовалась также возможность более точной подстройки модулятора на заданную частоту. Для этого на концах загнутых частей были впаяны стерженьки диаметром 1 мм и длиной 5 мм. На этих стерженьках можно было крепить с помощью пайки дополнительные грузики или снимать их, добиваясь, таким образом, настройки модулятора на заданную частоту с точностью до нескольких герц. Так, установка грузиков массой по 50 мг на оба стерженька снижала резонансную частоту на 10 Гц.

Более сложным является измерение эффективности фазовой модуляции $K_{рм}$. $K_{рм}$, измеренная в интерферометре, определяется не только модулятором, но и в некоторой степени световодом вне его. Это связано с тем, что переменное растяжение волокна, вызывающее фазовую модуляцию, не ограничивается растягиваемыми участками, а порождает бегущую продольную волну растяжения-сжатия, распространяющуюся в волокне на заметные расстояния вне модулятора [5-7]. Вследствие запаздывания ее полуволны либо увеличивают, либо уменьшают общую регистрируемую фазовую модуляцию в соответствии с их фазой и амплитудой, зависящей от локальных условий демпфирования, затухания и преобразования в другие типы волн на изгибах волокна [7]. Чтобы устранить влияние этих случайных факторов на измерения $K_{рм}$ собственно модулятора, надо добиться гашения акустических волн на волоконных выходах. Однако это непростая задача, поскольку продольная волна почти не ослабляется обычными демпферами типа поглощающих покрытий [8].

Демпфирование в нашем случае не применялось, но, для того чтобы вклады бегущих полуволн, знакопеременных по фазе, в общую фазовую модуляцию $K_{рм}$ в значительной мере компенсировали друг друга, а также чтобы измерения были проведены примерно в одинаковых условиях, длинные волоконные концы укладывались с большими радиусами изгибов и без скруток, а снимаемые волоконные витки свободно ложились вокруг модулятора.

С учетом сказанного данные о коэффициенте общей фазовой модуляции $K_{рм}$ и о коэффициенте ФМ на 1 см $K_{рм/1}$ не совсем точно отра-

жают характеристики самого модулятора, а представляют суммарный эффект, обычно имеющий место и в реальном устройстве.

Для ФМ типа "камертон" высотой 5 мм при полной намотке (17 витков) эффективность $K_{рм}$ составила 37 рад/В в пике резонанса (2.6 кГц), а для вдвое более высокого (10 мм и 34 витка) — 66 рад/В при $F_0 = 2.51$ кГц. Фазовый модулятор типа С-кольцо, настроенный на $F_0 = 2.6$ кГц, проявил эффективность $K_{рм} = 48$ рад/В, а другой образец, настроенный на 6 кГц, показал $K_{рм} = 68$ рад/В. Удельная эффективность ФМ (на 1 см растягиваемой длины волокна) $K_{рм/1}$ оказалась в пределах 0.7–1.5 рад/В·см для всех описанных образцов модуляторов обоих типов.

При малом количестве волоконных витков (1–3), когда их жесткость много меньше жесткости пьезопреобразователя, он работает в "свободном" режиме и задает примерно равное удлинение для всех волоконных отрезков. В этом случае для большей эффективности $K_{рм}$ число витков следует увеличивать. С другой стороны, при почти полной намотке пьезопреобразователь становится "зажатым" большой суммарной жесткостью волоконных отрезков и его действие (согласно уравнениям пьезоупругости) сводится главным образом к созданию определенной растягивающей силы F , раскладывающейся на N отрезков. Оптический фазовый эффект в волоконном отрезке пропорционален силе его растяжения F/N , а общая модуляция оптической фазы $K_{рм}$, равная сумме эффектов в отрезках, пропорциональна их числу $F/N \cdot N \sim F$, не зависит от числа отрезков. Иными словами, по мере намотки волокна для пьезопреобразователя происходит переход от сверхмалой к сверхбольшой акустической нагрузке.

Ясно, что в первом случае пьезопреобразователь недоиспользуется, а во втором намотано "лишнее" волокно. Можно сказать, что оптимальным по эффективности ФМ и числу волоконных витков является модулятор, в котором его собственная жесткость $K_{п}$ примерно равна совокупной жесткости волокон $K_{в}$. Однако нередко удобнее намотать несколько "лишних" витков и без существенной потери эффективности подстроить резонансную частоту путем снятия витков.

Более общий вывод состоит в том, что снижение частоты резонанса F_0 в фазовых модуляторах, основанных на переменном растяжении волокна, имеющих габариты ≤ 5 см и вес ≤ 1 Н, близко к пределу: массу существенно увеличить нельзя (данные модуляторы были изготовлены из сравнительно тяжелого металла — латуни), жесткость пьезопреобразователя можно снизить только до жесткости одного волоконного отрезка, а длину растяжения нельзя увеличить более, чем вдвое (напомним, что F_0 зависит от массы и жесткости как $\sqrt{K/M}$). Таким образом, НЧ модуляторы на частоты в сотни Гц и ниже могут быть либо нерезонансными, либо основываться на других принципах.

В заключение следует сказать, что созданы две конструкции низкочастотных волоконных фазовых модуляторов с настраиваемыми частотами резонанса в диапазоне 1.3–6.5 кГц и исследованы зависимости их свойств от вида световода и намотанной на модулятор длины волокна. Показано, что резонансная частота решающим образом зависит от упругих свойств световода. В описанных модуляторах суммарная жесткость растягиваемых волоконных отрезков составила от половины до 75% общей жесткости конструкции. Вариация всех вышеперечи-

сленных факторов позволила получить резонансные частоты в диапазоне от 1.3 до 6.5 кГц с возможностью грубой и тонкой подстройки. Эффективность фазовой модуляции на 1 см растягиваемой длины волокна была в пределах 0.7–1.5 рад/В·см, а суммарная эффективность — от 30 до 68 рад/В. Это позволяет применять подобные модуляторы в схемах гироскопов с длинами волоконного контура 1–2 км, используя для возбуждения обычную электронику (с рабочими напряжениями до 10 В).

Список литературы

- [1] *Kim B.Y., Shaw H.J.* // Opt. Lett. 1984. Vol. 9. P. 263–265.
 - [2] *Davies D.E., Kigsley S.* // Electron. Lett. 1974. Vol. 10. P. 21–22.
 - [3] *Lefevre H.C., Bergh R.A., Shaw H.G.* // Opt. Lett. 1982. Vol. 7. N 9. P. 454–456.
 - [4] *Коваленко В.Г., Алексеев Э.И., Кутма А.В.* // ПТЭ. 1990. № 4. С. 193–196.
 - [5] *Ulrich R., Simon A.* // Appl. Opt. 1979. Vol. 18. N 3. P. 2241–2251.
 - [6] *Снайдер А., Лав Дж. М.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987. 406 с.
 - [7] *Горбачев О.В., Горчаков А.П., Жилинский А.П. и др.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 1. С. 63–66.
 - [8] *Скучик Е.* Простые и сложные колебательные системы. М.: Мир, 1971. 557 с.
-