

Исследование влияния деформаций первого и второго режима кольцевого резонатора на характеристики датчика угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта

Бусурин В.И.^{1*}, Казарьян А.В.^{2}, Коробков В.В.^{3***}, Йин Наинг Вин^{1****}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*Центральный научно-исследовательский технологический институт, ЦНИТИ Техномаш, ул. Ивана Франко, 4, Москва, 121108, Россия*

³*Нижегородская инжиниринговая компания «Атомэнергопроект»,
Площадь Свободы, 3, Нижний Новгород, 603006, Россия*

**e-mail: vbusurin@mai.ru*

***e-mail: kazaryan@ya.ru*

****e-mail: vykor@bk.ru*

*****e-mail: integratedchip.88@gmail.com*

Аннотация

Предложена скорректированная математическая модель преобразователя угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). Рассмотрено влияние угла падения излучения, начального зазора и радиуса оптического пятна на характеристики преобразователя угловой скорости, построенного на основе оптического туннельного эффекта, для первого и второго режима кольцевого резонатора.

Ключевые слова: преобразователь, угловая скорость, оптический туннельный эффект, кольцевой резонатор, математическая модель.

Введение

Современные преобразователи угловых скоростей используются во многих приложениях: инерциальная навигация, управление летательным аппаратом[1]. В статье исследован микроопто-электромеханический преобразователь угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ). В таком преобразователе под действием внешних механических воздействий, происходит деформация кольцевого резонатора, а сила Кориолиса используется для измерения угловой скорости[2]. В первом режиме кольцевой резонатор деформируется эллиптически вдоль осей OX и OY . В исходной модели предполагалось, что при изменении зазора между призмой и кольцевым резонатором он остается плоскопараллельным, а выходная оптическая мощность, достигающая фотоприемника, определяется величиной зазора в центре оптического пятна. В реальной ситуации зазор не является плоскопараллельным, а движение поверхности кольцевого резонатора в области оптического контакта не сводится к поступательному. Учитывая изменение зазора для различных точек оптического пятна, можно определить скорректированную математическую модель первого режима кольцевого резонатора. Для второго режима скорректированная математическая модель дополняется слагаемыми, учитывающими изменение зазора при вращении КР. В статье приводятся результаты расчета преобразователя угловой

скорости на ОТЭ с использованием начальных и скорректированных математических моделей.

Скорректированная математическая модель первого режима кольцевого резонатора оптоэлектронного преобразователя угловой скорости

Когда преобразователь находится в состоянии покоя, кольцевой резонатор возбуждается вдоль его основных осей, вибрируя с заданной частотой[3]. Для съема информации об угловой скорости использован считывающий оптический узел, расположенный под углом 45° по отношению к основным осям кольцевого резонатора. Датчик угловой скорости содержит источник излучения (ИИ), кольцевой резонатор (КР), модулятор на основе ОТЭ (МОТЭ), фотоприемник (ФП). Первичный преобразователь кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости представляется собой КР(с показателем преломления n_3) и призму полного внутреннего отражения (с показателем преломления n_1), расположенную в непосредственной близости от КР, так, что наблюдается ОТЭ.

В преобразователе оптическое излучение проходит через МОТЭ, взаимодействуя с КР, и достигает фотоприемника. Оптическая мощность излучения, поступающего на фотоприемник, определяется отражательной способностью модулируемой границы сред. Отражательная способность связана с величиной зазора d . Выходную оптическую мощность первого режима $P_{\text{ФП}}$ можно определить на основе модели преобразователя, в которой зазор считается плоскопараллельным, а величина зазора d принимается равной расстоянию от призмы до КР в центре

оптического пятна. При уменьшении зазора d уменьшается выходной сигнал фотоприемника. С учетом отражательной способности R_i , зависящей от зазора d_i , мощность оптического излучения $P_{\text{ФП}}\{R_i[d_i(\Omega)]\} = f\{R_i[d_i(\Omega)], P_{\text{ИИ}}\}$ на фотоприемнике определится как [4]:

$$P_{\text{ФП}}\{R_i[d_i(t, \Omega)]\} = P_{\text{ИИ}} \cdot R_i[d_i(t, \Omega)] \cdot k_{\text{потерь}},$$

В настоящей работе предлагается применить способ расчета выходной оптической мощности $P_{\text{ФП}}$ по скорректированной математической модели, которая учитывает переменность зазора для различных точек контакта оптического излучения на модулируемой границе призмы. Примем, что источник излучения создает пучок круглого сечения с радиусом $r_{\text{ОПТ}}$. При этом выходная оптическая мощность определяется интегрированием в пределах получаемой эллиптической области (полуоси эллипса $b = r_{\text{ОПТ}}$, $a = r_{\text{ОПТ}}/\cos\theta$) с учетом переменности зазора $d_i(r, \varphi)$ [4].

Амплитуда первого радиального движения A составляет около 10 мкм. На рисунке 1 представлены величины текущего радиуса кольцевого резонатора от угловой координаты кольца β для случая, когда преобразователь приведен в первый режим, но не вращается.

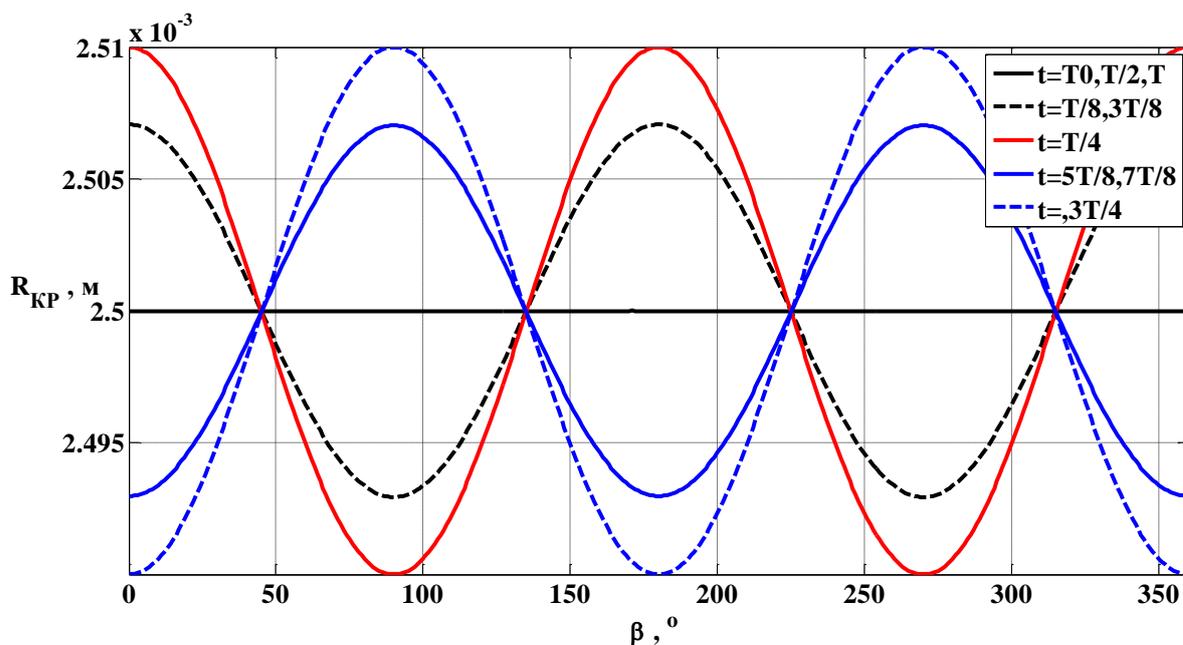


Рисунок .1 Зависимость величины текущего радиуса кольцевого резонатора от
угловой координаты кольца

В первом режиме контактная оптическая область КР отклоняется из-за
вибрации. Такое отклонение КР показано на рисунке 2.

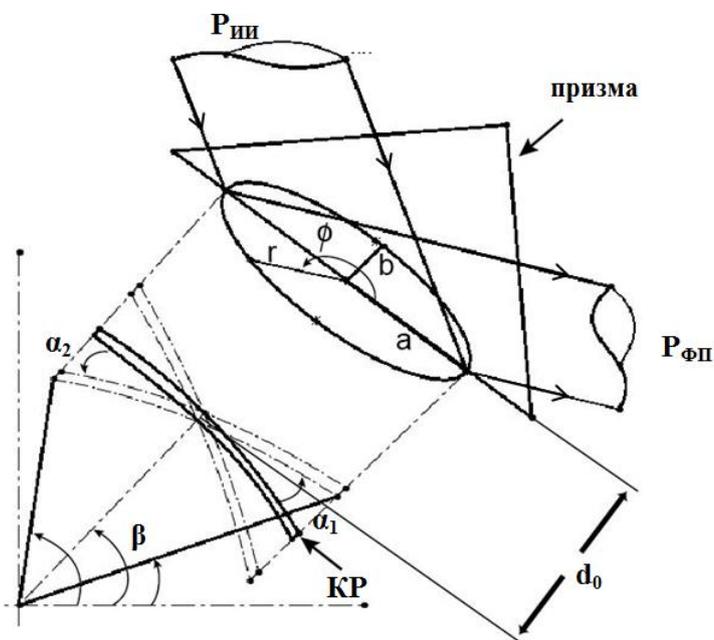


Рисунок .2Общий вид пересечения луча с гранью модулятора на основе ОТЭ
(МОТЭ)

Скорректированная модель первого режима учитывает зависимость зазора $d(r, \varphi)$ от начального зазора d_0 в центре оптического пятна и угла поворота сечения контактной оптической области из-за вибрации:

$$d(r, \varphi) = d_0 + R_{KP} \left(\frac{\pi}{4} \right) - R_{KP}(\beta) \cdot \cos \left(\beta - \frac{\pi}{4} \right),$$

где r, φ – полярные координаты в плоскости МОТЭ, β – угол текущей точки КР.

Оптическая мощность излучения, достигающая фотоприемника, определяется численным интегрированием уравнения[5]:

$$P_{\Phi\Pi_с\text{корр}} = \frac{P_{III}}{\pi \cdot r_{\text{ОПТ}}^2} \cdot \cos \theta \cdot k_{\text{потерь}} \cdot \int_{A_{\Pi}} R(d(r, \varphi)) \cdot dA_{\Pi},$$

где $k_{\text{потерь}}$ – коэффициент оптических потерь; $R(d(r, \varphi))$ – отражательная способность модулируемой границы средравная отношению мощности отраженного излучения к мощности падающего[6].

Интеграл по эллиптической области A_{Π} в полярных координатах можно записать в виде:

$$P_{\Phi\Pi_с\text{корр}} = \frac{P_{III}}{\pi \cdot r_{\text{ОПТ}}^2} \cdot \cos \theta \cdot k_{\text{потерь}} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{R(\varphi)} R(d(r, \varphi)) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi,$$

где r, φ – радиальная и угловая полярные координаты эллиптической области; $R(\varphi)$ –

граница эллиптической области, $(R(\varphi) = \frac{a \cdot b}{\sqrt{b \cdot \cos^2 \varphi + a \cdot \sin^2 \varphi}})$, a, b – полуоси эллипса ($a =$

$r_{\text{ОПТ}} / \cos \theta, b = r_{\text{ОПТ}}$).

Исследование характеристик ДУС при возбуждении первого режима кольцевого резонатора

Скорректированная математическая модель ДУС для первого режима возбуждения КР учитывает величину оптического зазора в каждой точке оптического пятна, что приводит к зависимости оптической мощности на фотоприемнике $P_{\text{ФПi_скорр}}$ от всех параметров: $P_{\text{ФПi_скорр}} = f\{n_1, n_2, n_3, \lambda, \theta, d_0, P_{\text{ИИ}}, r_{\text{опт}}\}$. Наибольший интерес здесь представляет зависимость характеристик ДУС от угла падения света и радиуса оптического пучка. Результаты расчета по скорректированной модели выполненные для $\lambda=900$ нм, $\theta=42^\circ$, $d_0=300$ нм и $P_{\text{ИИ}}=2$ мВт показаны на рис.3. Видно, что скорректированная модель показывает наличие модуляции выходного сигнала ДУС. Глубина модуляции выходной оптической мощности увеличивается с ростом радиуса оптического пучка.

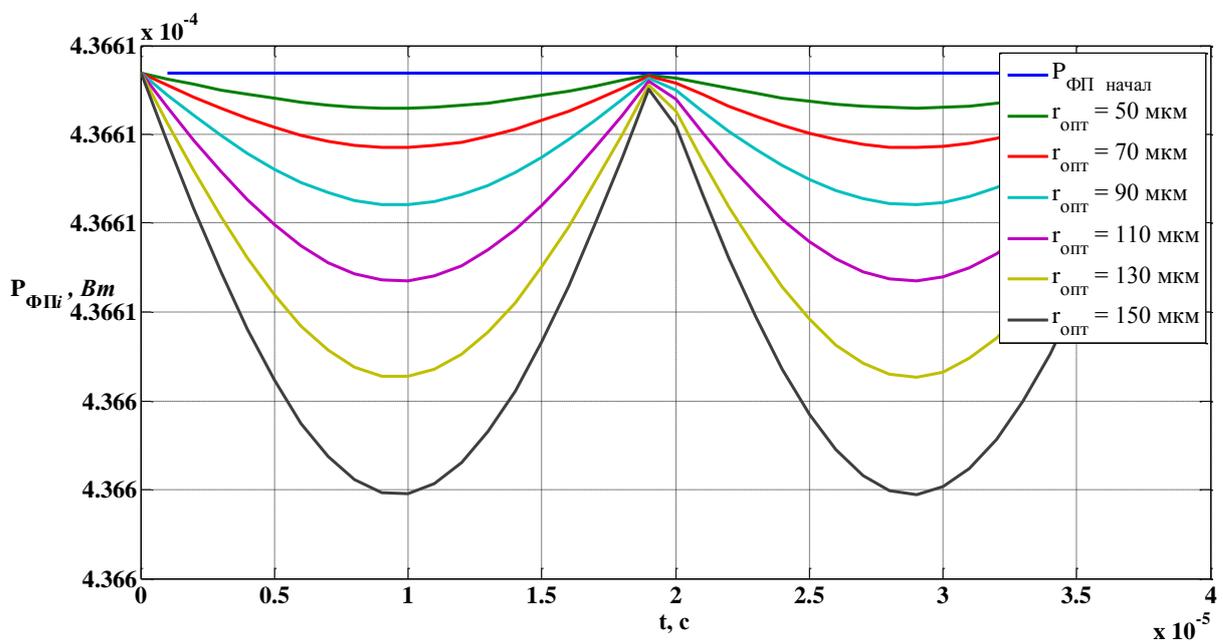


Рисунок.3 Значение мощности оптического излучения $P_{\text{ФПi_скорр}}$ при отсутствии угловой скорости ($\Omega=0$) при различных радиусах оптического пятна $r_{\text{опт}}$

Обнаруженная зависимость может трактоваться как погрешность исходной модели ДУС. Величина радиуса оптического пятна влияет на характеристики ДУС на основе ОТЭ в первом режиме возбуждения КР. При увеличении радиуса оптического пятна $r_{\text{ОПТ}}$ до ширины КР (150 мкм) величина погрешности исходной модели по сравнению со скорректированной составляет около $1,2 \times 10^{-3} \%$ (рис. 4).

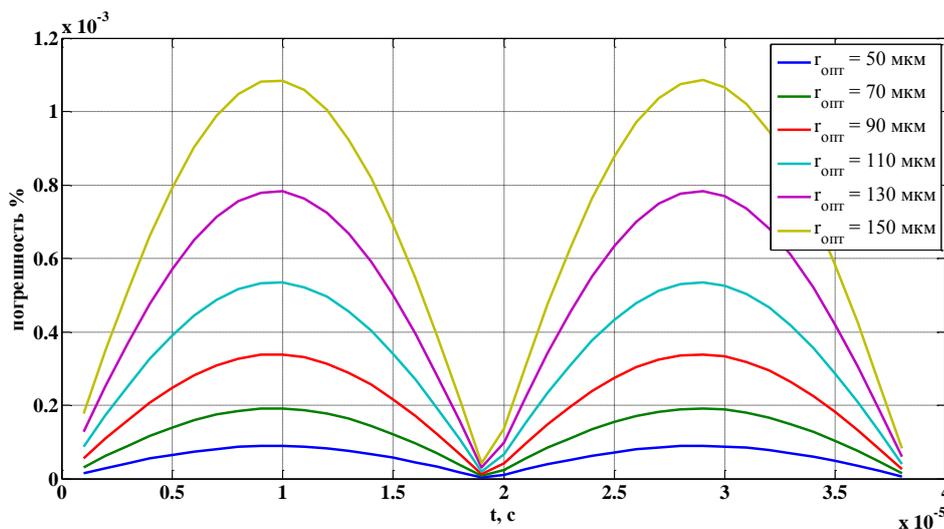


Рисунок.4 Погрешности мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}i_\text{с}к\text{ор}р}$ на фотоприемнике по сравнению с $P_{\text{ФП}i}$ при отсутствии угловой скорости ($\Omega=0$) при различных радиусах оптического пятна $r_{\text{ОПТ}}$

Увеличение угла падения приводит к увеличению погрешности выходной мощности фотоприемника. Величина расхождения расчетов по скорректированной и исходной моделям при этом незначительно увеличивается (рис.5).

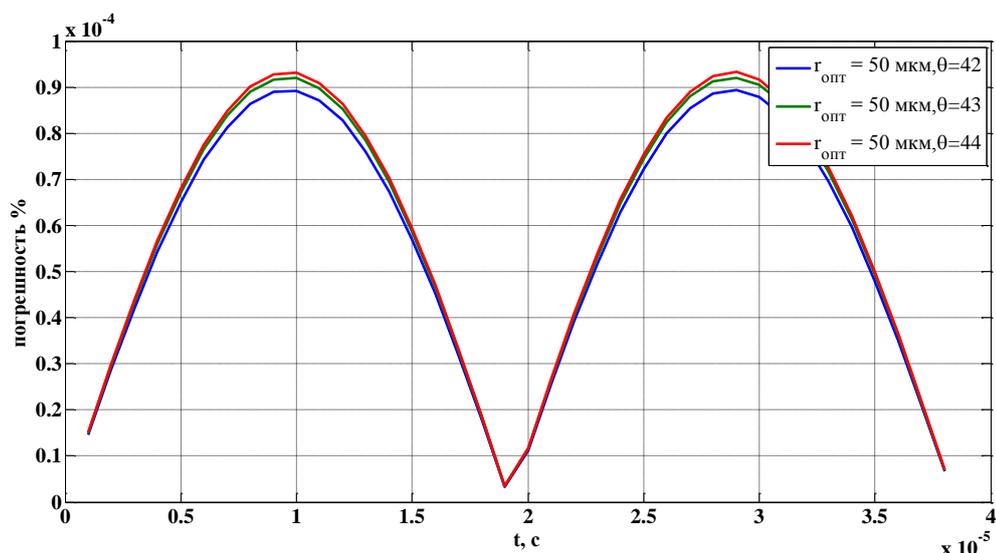


Рисунок.5 Погрешности мощности оптического излучения $P_{\text{ФПи_скорр}}$ на фотоприемнике по сравнению с $P_{\text{ФПи}}$ для первого режима при различных радиусах оптического пятна $r_{\text{опт}}$ и угла падения θ

При увеличении начального зазора возрастает оптическая мощность на фотоприемнике (рис.6) и уменьшаются погрешности выходного сигнала фотоприемника. Величина расхождения расчетов по скорректированной и исходной моделям при этом незначительно уменьшается (рис.7).

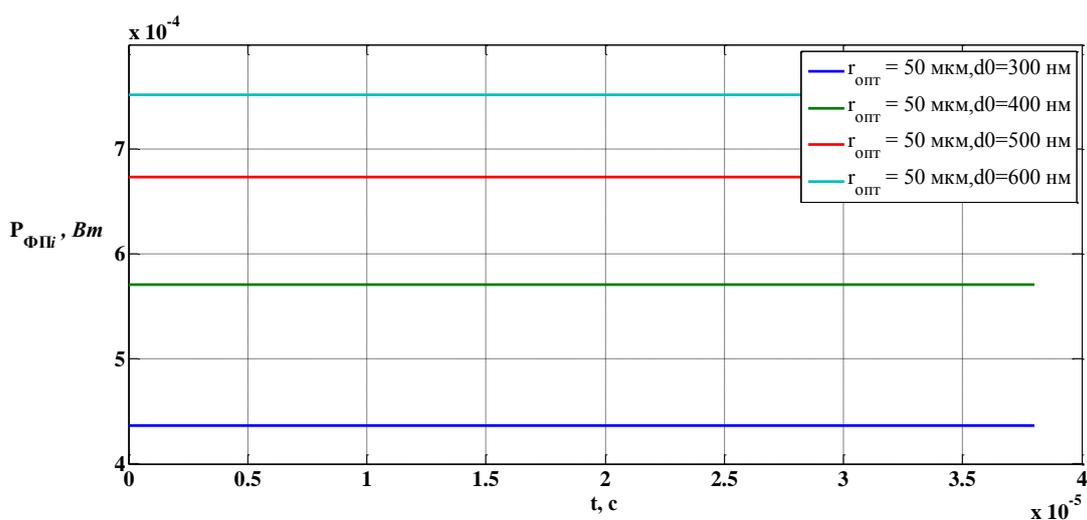


Рисунок.6 Значение мощности оптического излучения $P_{\text{ФПи_скорр}}$ по сравнению с $P_{\text{ФПи}}$ для первого режима при различных начальных зазорах

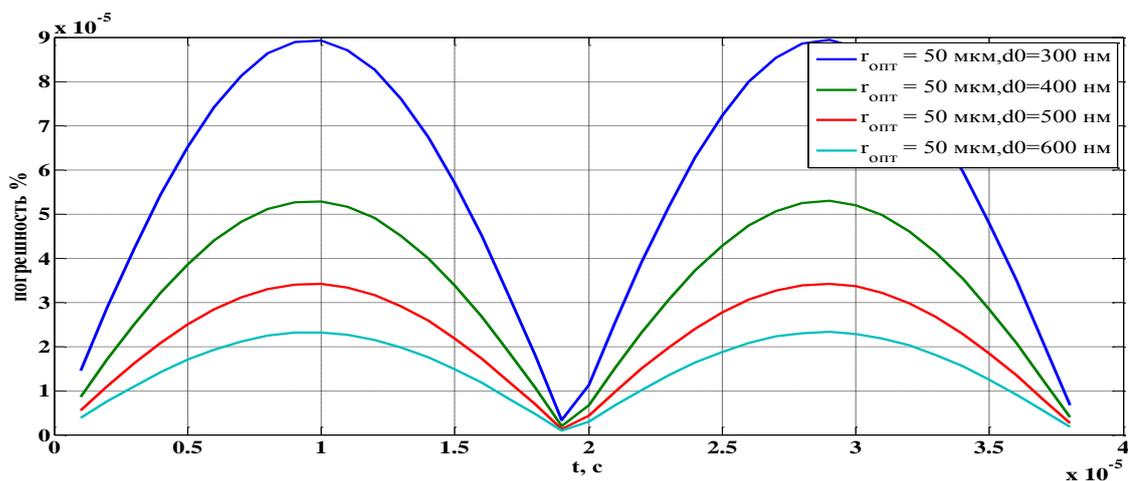


Рисунок.7 Погрешности мощности оптического излучения $P_{\Phi\Pi i_с\text{кopp}}$ на фотоприемнике по сравнению с $P_{\Phi\Pi i}$ при $\Omega=0$ при радиуса оптического пятна

$$r_{\text{OПT}}=50\text{мкм и начального зазора } d_0=300\text{-}600\text{нм}$$

Таким образом, использование скорректированной математической модели ДУС на основе ОТЭ позволяет получить более достоверную величину выходного сигнала во всем диапазоне параметров ДУС и ее предпочтительно использовать в последующих исследованиях и расчетах параметров при проектировании ДУС. Результаты моделирования показали что, погрешность определения выходной оптической мощности исходной модели по сравнению со скорректированной модели достаточно мала. Уменьшение погрешностей в первом режиме кольцевого резонатора ДУС можно дополнительно обеспечить за счет фильтрации.

Скорректированная математическая модель второго режима кольцевого резонатора ДУС на основе ОТЭ

Под действием измеряемых угловых скоростей происходят деформации вибрирующего кольцевого резонатора преобразователя из-за эффекта Кориолиса,

позволяющие измерять угловую скорость Ω . Величина деформации может быть определена по следующей формуле [7]:

$$d(\Omega) = \frac{2 \cdot A \cdot \pi \cdot D^2}{\gamma \cdot h \cdot (n^2 - 1)} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \rho}{(n^2 + 1) \cdot E}} \cdot \Omega,$$

где A – амплитуда постоянных вибраций; γ – демпфирование; Ω – угловая скорость; ρ , h – плотность и толщина КР; D – диаметр; n – узловой диаметр; E – модуль упругости КР.

Во втором режиме происходит изгиб области оптического контакта КР из-за действия сил Кориолиса, позволяющий измерять угловую скорость (Рис. 8).

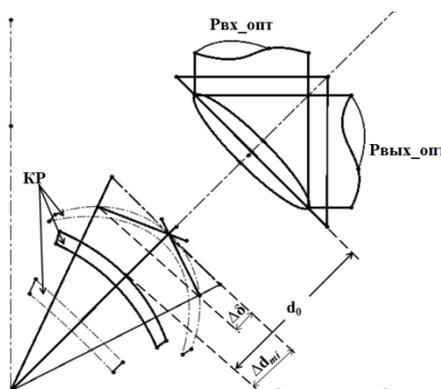


Рисунок 8. Общий вид пересечения луча с гранью модулятора на основе ОТЭ (МОТЭ) с учетом угловой скорости

В случае вращения ДУС величина оптического зазора в каждой точке модулируемой границы определяется следующим соотношением:

$$d(r, \varphi) = d_0 - d(\Omega) + \left[R_{КР} \left(\frac{\pi}{4} \right) - R_{КР}(\beta) \cdot \cos \left(\beta - \frac{\pi}{4} \right) \right].$$

где r, φ – полярные координаты в плоскости МОТЭ, β – угол текущей точки КР,

$R_{кр}(\beta) = R_{кр} + [d(\Omega) \cdot \sin(2\pi ft) \cdot \cos(2 \cdot \beta)]$ – текущий радиус эллипса КР.

Интегрирование по эллиптической области A_{Π} дает значение оптической мощности на фотоприемнике:

$$P_{\Phi\Pi_с\text{корр}}(\Omega) = \frac{P_{III}}{\pi \cdot r^2} \cdot \cos \theta \cdot k_{\text{номерь}} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{R(\varphi)} R_i(d_i(r, \Omega)) \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi,$$

где r, φ – радиальная и угловая полярные координаты эллиптической области; $r(\varphi)$ – граница эллиптической области, $(R(\varphi) = \frac{a \cdot b}{\sqrt{b \cdot \cos^2 \varphi + a \cdot \sin^2 \varphi}})$.

Исследование характеристик ДУС во втором режиме колебаний кольцевого резонатора

Скорректированная модель дает зависимость $P_{\Phi\Pi_с\text{корр}}$ от всех параметров и внешних воздействий: $P_{\Phi\Pi_с\text{корр}} = f\{\Omega, n_1, n_2, n_3, \lambda, \theta, d_0, P_{III}, r_{\text{отт}}\}$. Расчет выходной мощности оптического излучения ДУС по скорректированной модели выполнен для $\lambda = 900$ нм, $\theta = 42^\circ$, $d_0 = 300$ нм и $P_{III} = 2$ мВт. Анализ результатов, представленных на рисунке 9, показывает, что при увеличении радиуса оптического пятна до ширины КР выходная оптическая мощность увеличивается.

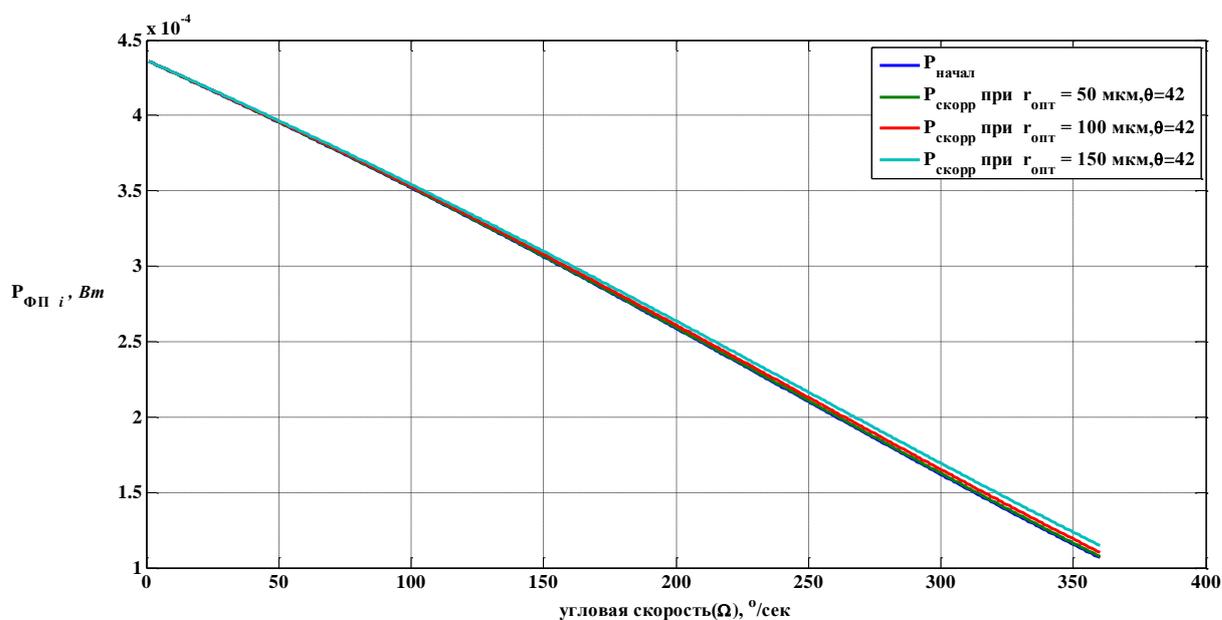


Рисунок.9 Зависимость мощности выходного оптического излучения $P_{\text{ФП}i_скорр}$ от величины угловой скорости при различных радиусах оптического пятна $r_{\text{ОПТ}}$

Сравнительные результаты расчета зависимости выходной оптической мощности зависят от угловой скорости для разных значений радиуса оптического пятна, полученные с применением исходной модели и скорректированной (Рис.10). При изменении величины радиуса оптического пятна до ширины КР, погрешность расчета выходной оптической мощности по исходной модели растет и составляет около 8% при максимальной угловой скорости 360 °/с.

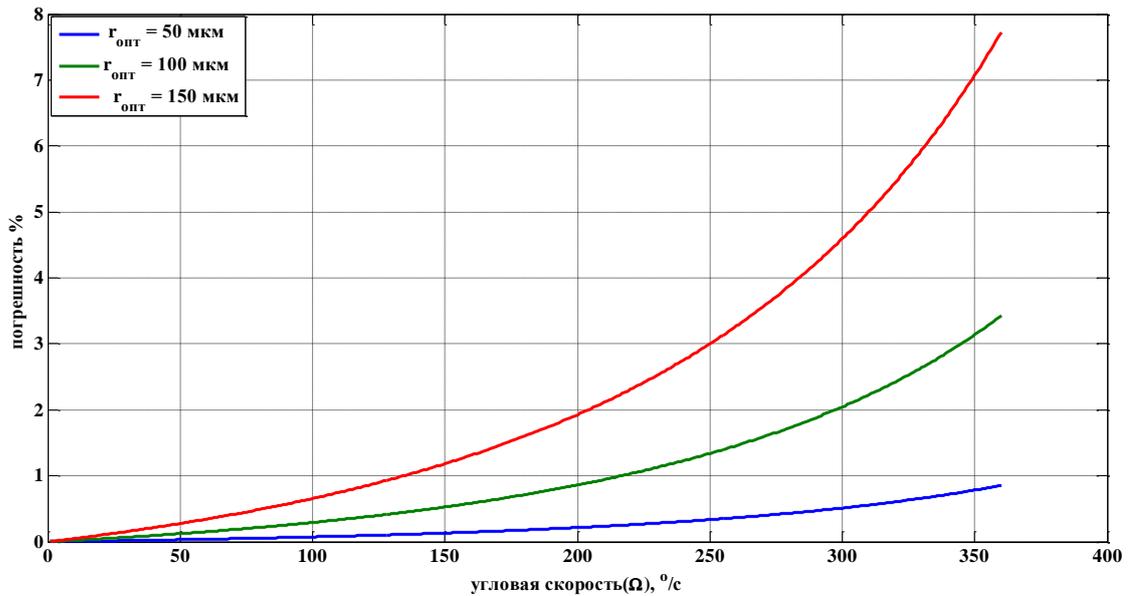


Рисунок.10 Погрешности мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}i_с\text{корр}}$ на фотоприемнике по сравнению с $\Delta P_{\text{ФП}i}$ при воздействии угловой скорости при различных радиусах оптического пятна $r_{\text{ОП}i}$ и $\theta = 42^\circ$

При увеличении радиуса круглого оптического пятна увеличивается погрешность расчетов мощности оптического излучения (Рис. 11), полученная при моделировании скорректированной модели по сравнению с результатами моделирования исходной модели. Если используется величина радиуса оптического пятна 50 мкм , то погрешности расчетов по исходной модели относительно скорректированной модели составляет до 1% при воздействии угловой скорости и различных углах падения.

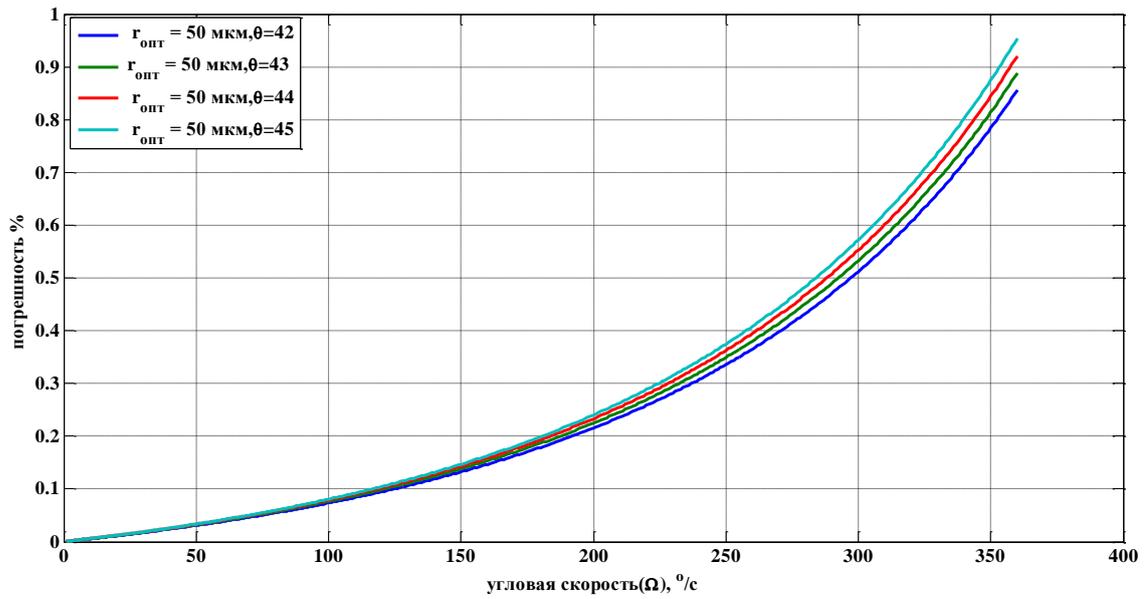


Рисунок.11 Погрешности мощности оптического излучения $P_{\text{ФП}i_{\text{скорр}}}$ на фотоприемнике по сравнению с $P_{\text{ФП}i}$ при воздействии угловой скорости при различных радиусах оптического пятна $r_{\text{опт}}$ и угла падения $\theta = 42^\circ - 45^\circ$.

Изменение величины начального зазора также вызывает изменение выходной оптической мощности. Отметим, что с увеличением величины начального зазора увеличивается выходная оптическая мощность (Рис. 12).

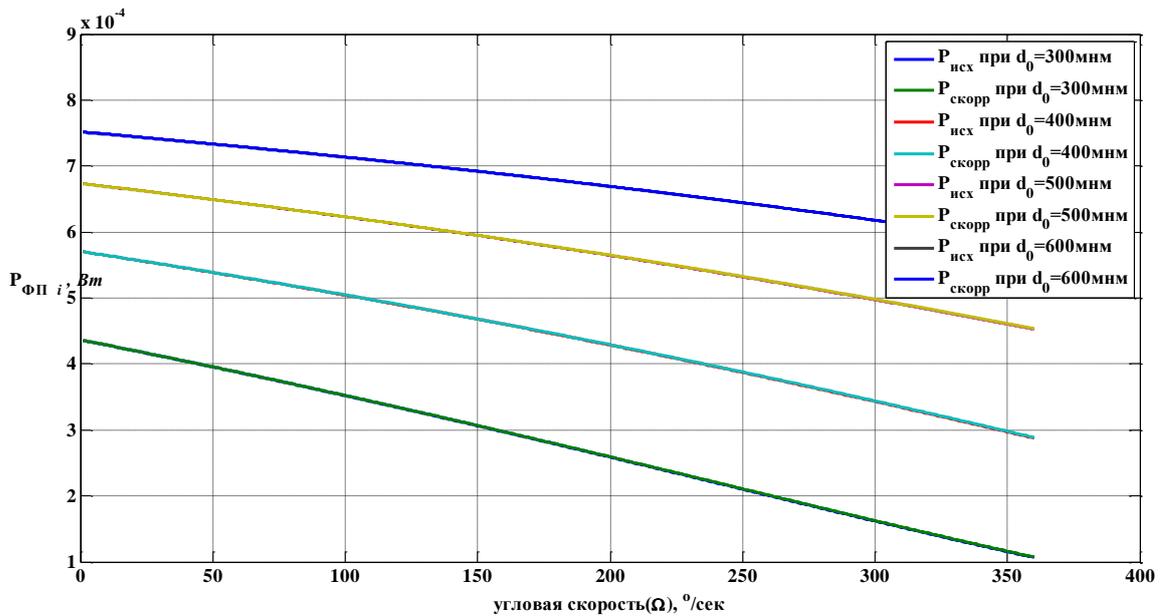


Рисунок.12 Зависимость мощности выходного оптического излучения $P_{ФПi_сkorr}$ по сравнению с $P_{ФПi}$ от измеряемой угловой скорости при различных начального разора

Получены зависимости погрешности выходной оптической мощности с учетом скорректированной математической модели ДУС от измеряемой угловой скорости при изменении начального зазора (рис.13). Если величина начального зазора изменяется на 300 нм до 600 нм, то относительная погрешность преобразователя составляет около 0,9% при максимальной угловой скорости ± 360 град/с.

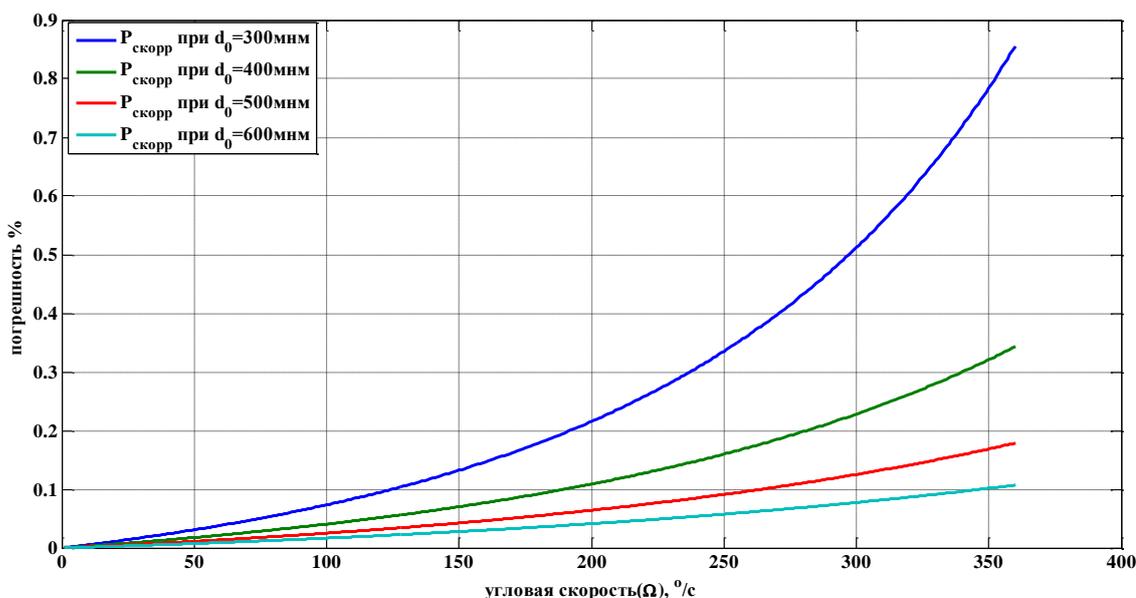


Рисунок.13 Погрешности мощности оптического излучения $P_{\text{ФПi_скорр}}$ на фотоприемнике по сравнению с $P_{\text{ФПi}}$ от измеряемой угловой скорости при различных начального зазора

Результаты исследования второго режима ДУС показывают, что рассчитанные по исходной модели значения выходной оптической мощности имеют значительную погрешность относительно скорректированной математической модели (до 8%). Таким образом при расчете параметров ДУС на основе ОТЭ необходимо использование скорректированной математической модели, учитывающей переменность величины оптического зазора в области ОТЭ.

Выводы

Исследован преобразователь угловых скоростей, построенный на основе ОТЭ, и предложены скорректированные математические модели для первого и второго режима кольцевого резонатора. Рассмотрена погрешность расчета выходной оптической мощности при использовании исходной математической модели

относительно скорректированной при вариации начального зазора, угла падения источника излучения и радиуса оптического пятна r_{OPT} . Показано, что погрешность второго режима относительно скорректированной математической модели составляет около 8%. Для получения относительной погрешности 1% радиуса оптического пятна должно быть не более 50 мкм и угла падения в интервале от 42° до 45°.

Для получения достоверной величины выходного сигнала и уменьшения погрешностей при проектировании ДУС следует использовать скорректированную математическую модель.

Библиографический список

1. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1970. - 392 с.
2. R. Eley, C.H.JFoxandSMc. William. The dynamics of vibrating ring multiaxis rate gyroscope // Journal of Mechanical Engineering Science. Dec 1, 2000, vol. 214 no.12, 1503-1513 pp.
3. Alexey Tirtichny. Calculation of vibrating ring gyroscope characteristics // International forum “Information and communication technologies and higher education – priorities of modern society development” Proceedings of the forum. May 26-30, 2009. pp 79-84.
4. Бусурин В.И., Фам Ань Туан, Ахламов П.С. Анализ влияния конструктивных параметров на характеристики микроопто-электромеханического преобразователя

угловых скоростей // Труды МАИ, 2015, № 81:

<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=57832>

5. Бусурин В.И., Звей Ней Зо. Моделирование и компенсация температурной погрешности преобразователя давления на основе оптического туннелирования // Вестник Московского авиационного института. 2012. № 1. С. 149-156.

6. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1983. – 721 с.

7. Бусурин В.И., Коробков В. В., Йин Наинг Вин. Исследование характеристик кольцевого волнового оптоэлектронного преобразователя угловой скорости // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. №5. С. 340-346.

8. Бардин Б.С., Панёв А.С. О периодических движениях тела с подвижной внутренней массой по горизонтальной поверхности // Труды МАИ, 2015, № 84: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62995>

9. Мухаметзянова А. А. Раскачивание и стабилизация равновесия двухмассового маятника ограниченным параметрическим // Труды МАИ, 2015, № 84: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62975>