

**ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ПОМЕХИ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО
СМЕШЕНИЯ СИГНАЛА ВОСП OFDM**

**ОЦІНКА ПОТУЖНОСТІ ЗАВАДИ ЧОТИРИХВИЛЬНОГО
ЗМІШУВАННЯ СИГНАЛУ ВОСП OFDM**

**ESTIMATION OF THE FOUR WAVE MIXING POWER
OF FIBER OPTIC COMMUNICATION SYSTEM WITH OFDM SIGNAL**

Аннотация. В статье проводится сопоставление результатов расчета мощности помехи четырехволнового смешения для сигнала одного канала ВОСП с ортогональным частотным мультиплексированием по стандартным и упрощенным выражениям. Проведенные числовые расчеты для трех распространенных оптических волокон показали, что упрощенное выражение возможно использовать при интервале между несущими частотами OFDM не больше 15-30 МГц.

Анотація. У статті проводиться порівняння результатів розрахунку потужності завади чотирихвильового змішування для сигналу одного каналу ВОСП з ортогональним частотним мультиплексуванням за стандартними та спрощеними виразами. Проведені числові розрахунки для трьох типів розповсюджених оптичних волокон показали, що спрощений вираз можливо використовувати при інтервалі між несучими частотами OFDM не більше 15-30 МГц.

Summary. The paper compares a result of calculation of the FWM power for one channel of fiber optical communication system with orthogonal frequency division multiplexing for standard and simplified expressions. The numerical calculations for three general types of optical fibers showed that a simplified expression may be used for interval between the OFDM carrier frequencies to the 15-30 MHz.

В настоящее время волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) со спектральным разделением каналов (ВОСП СРК) повсеместно используются на транспортных сетях для организации широкополосных цифровых трактов. Для борьбы с линейными (дисперсионными) искажениями среды распространения в данных системах передачи успешно применяется ортогональное частотное мультиплексирование (OFDM) [1]. Помимо линейных искажений, оптическое волокно (ОВ) вносит также и ряд нелинейных искажений, порождаемых эффектом Керра [2]. Одним из них является эффект четырехволнового смешения (ЧВС), который приводит к взаимному влиянию между оптическими каналами ВОСП СРК. Поскольку в полосе каждого оптического канала такой системы передается многочастотный сигнал, эффект ЧВС также будет приводить к взаимным влияниям между несущими сигналами OFDM. Поэтому задача определения величины мощности аддитивной помехи, порожденной ЧВС в ВОСП с OFDM, является актуальной. В статье [3] приводится методика упрощенного расчета мощности указанной помехи и проводятся сравнения результатов расчета и имитационного моделирования. Однако в ней отсутствуют четкие рекомендации по возможности использования предложенной упрощенной методики расчета для ВОСП OFDM с конкретными параметрами.

Поэтому **целью данной статьи** является оценка возможности использования упрощенной методики расчета мощности помехи ЧВС между несущими сигналами OFDM при его передаче по каналам ВОСП СРК.

Рассмотрим вначале вычисление мощности продуктов ЧВС по классическим выражениям. Точный расчет мощности помехи ЧВС проводится по известному выражению [4, 5]:

$$P_{ijk} = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \left\{ \frac{(1 - e^{-\alpha L})^2}{\alpha^2} \right\}, \quad (1)$$

где η – эффективность ЧВС; D – коэффициент вырожденности ($D = 6$ при $i \neq j$ и $D = 3$ при $i = j$); P_i , P_j и P_k – мощности входных канальных сигналов на частотах f_i , f_j и f_k соответственно; α – коэффициент затухания оптического волокна (ОВ); L – длина отрезка ОВ.

Коэффициент нелинейности γ рассчитывается по выражению [4]:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{эфф}}}, \quad (2)$$

где n_2 – коэффициент нелинейности показателя преломления ($n_2 = 2,68 \cdot 10^{-20}$ м²/Вт); λ – длина волны оптического сигнала; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь оптического волокна.

Эффективность ЧВС, зависящую от параметров оптического сигнала и материала ОВ, можно рассчитать по выражениям:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \quad (3)$$

и

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D_c(\lambda) + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \frac{dD_c(\lambda)}{d\lambda} \right], \quad (4)$$

где $\Delta\beta$ – коэффициент фазового согласования; $D_c(\lambda)$ и $dD_c(\lambda)/d\lambda$ – хроматическая дисперсия и ее производная соответственно; Δf_{ik} и Δf_{jk} – межканальные интервалы ($\Delta f_{ik} = |f_i - f_k|$ и $\Delta f_{jk} = |f_j - f_k|$); c – скорость света в вакууме ($c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с).

Итоговая мощность ЧВС на частоте f_m равна сумме мощностей нелинейных комбинационных продуктов [4]:

$$P_{\Sigma}(f_m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=i}^N P_{ijk}, \quad (5)$$

где N – количество несущих сигнала OFDM (в тексте данной статьи вычисления проводятся $N = 1024$).

При проведении вычислений по данному выражению необходимо определить номер третьего влияющего канала по формуле $k = i + j - m$ и в случае невыполнения условия $1 \leq k \leq N$ следует принять суммарную мощность P_{Σ} равной нулю.

Общее количество нелинейных комбинационных продуктов M зависит от количества несущих N сигнала OFDM и может быть определено по выражению [3]:

$$M = \frac{N^3 - N^2}{2}. \quad (6)$$

Теперь перейдем к рассмотрению содержания упрощенной методики расчета мощности помех ЧВС, предложенной в [3]. При малом межчастотном интервале сигнала OFDM, коэффициент фазового согласования $\Delta\beta$ в выражении (4) близок к нулю. В результате второе слагаемое в скобках формулы (3) значительно меньше единицы и им можно пренебречь. Поскольку $\alpha^2 \gg \beta^2$, выражение (3) принимает близкое к единице значение. При одинаковых мощностях несущих ($P_i = P_j = P_k = P_{\text{пк}}$) выражение (1) принимает более простой вид:

$$P_{ijk} = \frac{D^2 \gamma^2 L_{\text{эфф}}^2 P_{\text{пк}}^3 e^{-\alpha L}}{9}, \quad (7)$$

где $L_{\text{эфф}}$ – эффективная длина ОВ ($L_{\text{эфф}} = [1 - e^{-\alpha L}] / \alpha$).

В указанной статье отсутствуют четкие рекомендации по применимости предложенного выражения (7). Поэтому в данной статье проводится сравнение результатов расчета мощности помехи ЧВС по классической и упрощенной методике для трех распространенных типов ОВ с параметрами, указанными в табл. 1 [6].

Мощность помехи в выражении (1) в значительной мере определяется эффективностью ЧВС η , которая принимает значение от 0 до 1 и зависит от типа ОВ, а также межчастотного интервала $\Delta f_{\text{н}}$ сигнала OFDM. Поэтому на рис. 1 приведены результаты расчета эффективности по точной и

упрощенной формуле для вышеуказанных типов волокон. По оси ординат отложена усредненная эффективность, рассчитанная по выражению

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \eta}{n_{\text{сл}}}, \quad (8)$$

где $n_{\text{сл}}$ – количество отличных от нуля слагаемых эффективности (3), рассчитанных по аналогии с формулой (5).

Таблица 1 – Параметры волокон SMF и NZ-DSF

№ п/п	Тип волокна	Параметры			
		Затухание α , дБ/км	$A_{\text{эфф}}$, мкм ²	Дисперсия D , с/(нм·км)	Производная дисперсии $dD/d\lambda$, пс/(нм ² ·км)
1	TrueWave REACH	0,20	55	+7,43	0,045
2	Corning SMF-28e+	0,20	83	18,0	+0,092
3	Corning LEAF	0,20	72	+4,28	+0,05

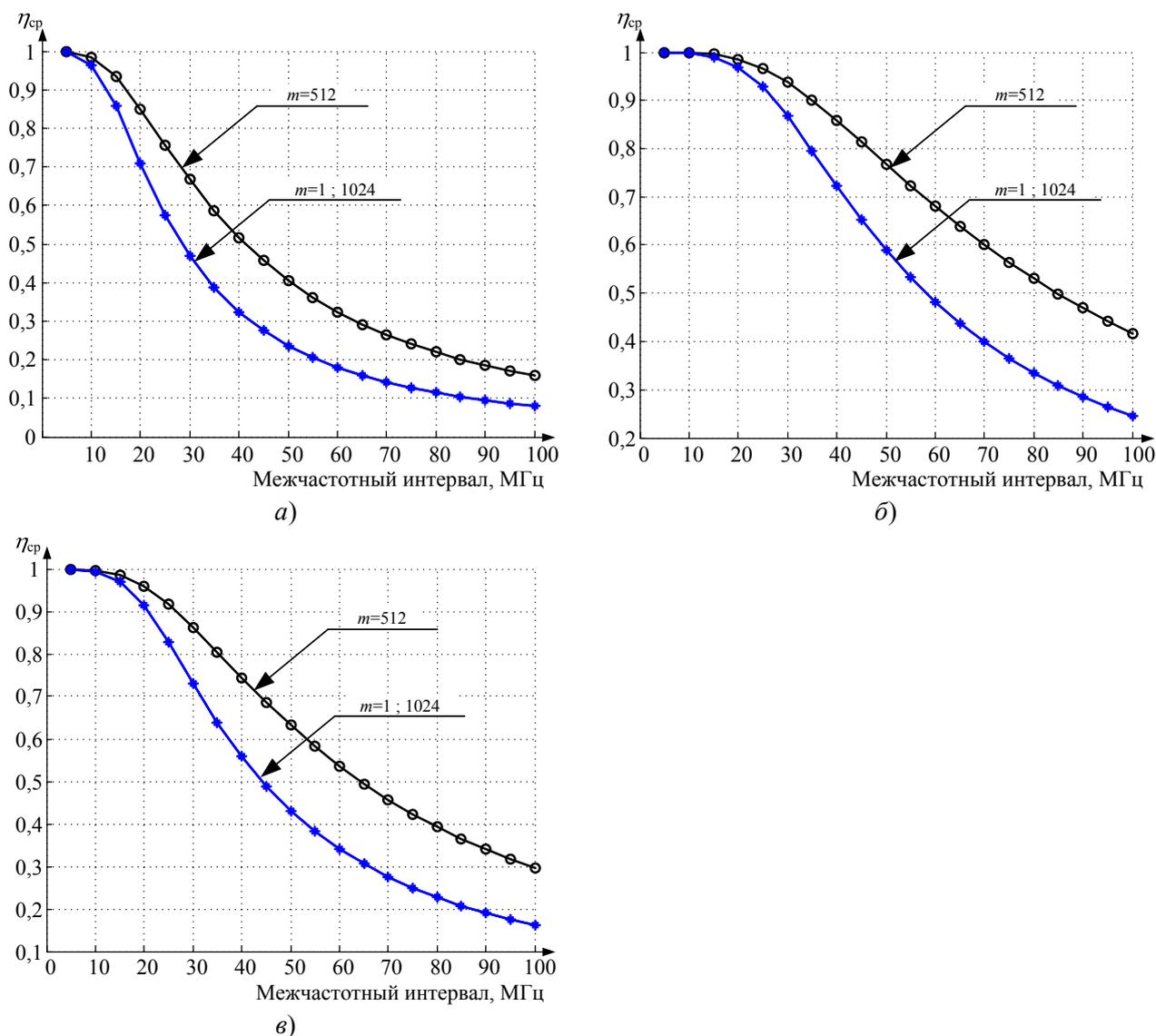


Рисунок 1 – Эффективность ЧВС для волокна: а) SMF-28e+; б) Corning LEAF; в) TrueWave REACH

Наибольшее количество нелинейных комбинационных продуктов ЧВС попадает на частоты центрального канала ($m = 512$), поэтому среднее значение эффективности для него существенно больше $\eta_{\text{ср}}$ крайних каналов ($m = 1$ и $m = 1024$). Качественное сравнение полученных кривых показывает, что наибольшая крутизна спада эффективности соответствует волокну SMF-28e+. Это вызвано тем, что данный тип волокна обладает наибольшей эффективной площадью сечения сердцевинки и хроматической дисперсией, что приводит к существенному снижению эффективности η при увеличении межчастотного интервала сигнала OFDM. Кривые усредненной эффективности для волокон TrueWave REACH и Corning LEAF имеют существенно меньшую крутизну спада, поскольку вносят меньшую хроматическую дисперсию.

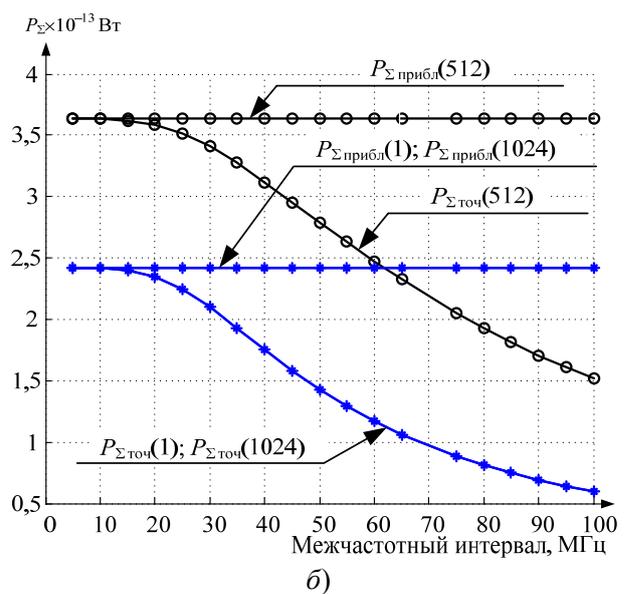
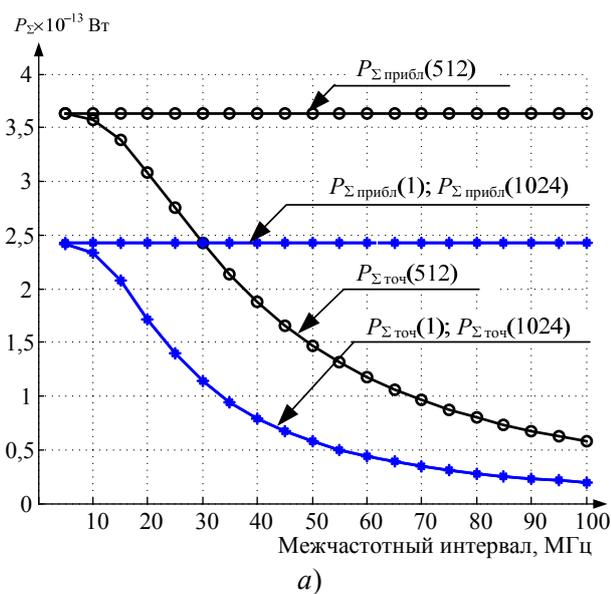
В качестве критерия сравнения эффективности ЧВС для разных типов оптических волокон будем использовать ее абсолютное отклонение

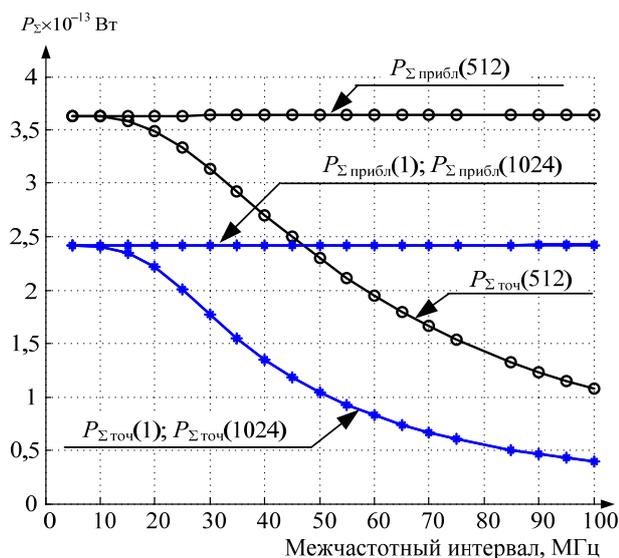
$$\delta_{\text{чвс}} = \eta_{\text{ср}} - \eta_{\text{прибл}}, \quad (9)$$

где $\eta_{\text{ср}}$ – среднее значение эффективности ЧВС согласно выражению (8), а приближенное значение $\eta_{\text{прибл}} = 1$ при использовании упрощенного выражения (7).

Будем считать ошибку $\delta_{\text{чвс}} < 0,1$ приемлемой для большинства практических расчетов и определим максимальное значение межканального интервала, при котором ошибка не превышает указанной величины. Анализ графиков на рис. 1 показывает, что максимально допустимое значение $\Delta f_{\text{н}}$ составляет около 13-17 МГц для ОВ типа SMF-28e+ и 21-26 МГц для других двух рассматриваемых типов ОВ. На основе сказанного можно сделать предварительный вывод о нежелательности использования упрощенной методики расчета мощности помехи ЧВС для сигнала OFDM с межканальным интервалом больше указанного. Данное утверждение также подтверждается кривыми зависимости мощности продуктов ЧВС от межканального интервала системы OFDM (рис. 2).

При построении графиков уровень мощности сигнала OFDM выбран равным $P_{\text{пк}} = 10 \lg(P_{\text{пк}}) = -5$ дБм. Следует отметить, что при малом межчастотном интервале (до 10...20 МГц, в зависимости от типа волокна), мощность генерируемых волокном нелинейных комбинационных продуктов ЧВС практически одинакова, поскольку во всех случаях $\eta \rightarrow 1$. Наибольшее расхождение результатов расчета мощности помехи в 12,4 раза соответствует волокну SMF-28e+ вследствие наибольшей крутизны кривой $P_{\Sigma}(\Delta f_{\text{пк}})$. Для волокна Corning LEAF крутизна аналогичной кривой существенно меньше, поэтому ошибка в результатах существенно ниже.





б)

Рисунок 2 – Мощность помехи ЧВС для волокна: а) SMF-28e+; б) Corning LEAF; в) TrueWave REACH

Подводя итоги, можно сформулировать следующие выводы по результатам исследований. Задача оценки возможности использования упрощенной методики расчета мощности помехи ЧВС между несущими сигнала OFDM при его передаче по каналам ВОСП СРК выполнена. Проведенные исследования показали, что зависимость мощности нелинейных продуктов ЧВС от величины межчастотного интервала сигнала OFDM имеет нелинейный характер. Упрощенные выражения расчета мощности рассматриваемых нелинейных помех необходимо использовать лишь при малых значениях межчастотного интервала (порядка 15-30 МГц, в зависимости от типа ОВ). В других случаях необходимо проводить вычисления согласно классическим выражениям.

В дальнейших исследованиях ВОСП СРК с OFDM необходимо уделить внимание на построение комплексной математической модели, учитывающей нелинейные и линейные эффекты искажения сигнала в оптическом волокне.

Литература

1. Djordjevic I. OFDM for Optical Communications / Shieh W., Djordjevic I. – Academic Press: London, 2010. – 457p.
2. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics / Agrawal G.P. – London: Academic Press, 2007. – 534 p.
3. Lowery A.J. Calculation of power limit due to fiber nonlinearity in optical OFDM systems / Lowery A.J., Wang S., Premaratne M. // Optics express. – 2007. – Vol. 15. – № 20. – P. 13282-13287.
4. Tkach R.W. Four-photon mixing and high-speed WDM systems / Tkach R.W., Chraplyvy A.R., Forghieri F., Gnauck A.H., Derosier R.M. // Lightwave Technology. – 1995. – Vol. 13. – № 5. – P. 841 – 849.
5. Song S. Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers / Song S., Allen C.T., Demarest K.R., Hui R. // Journal of Lightwave Technology. – 1999. – Vol. 17. – № 11. – P. 2285 – 2290.
6. Педяш В.В. Влияние параметров оптических волокон на отношение оптических сигнал/шум в ВОСП СРК / Педяш В.В. // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2011. – № 1. – С. 112-116.