

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ТОЧКИ АМПЛИТУДНОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

OPERATING POINT SELECTION OF AMPLITUDE ELECTROOPTICAL SENSOR FOR ELECTRIC FIELD PARAMETERS MEASURING

V. Andreev
O. Morozov

Annotation

This article discusses the choice of the operating point of the amplitude electro-optical sensor for measuring the parameters of external electric fields. It is shown that the analysis of the modulation characteristics of the sensor based on the crystal or waveguide based on lithium niobate by amplitude of laser radiation can significantly revise approaches to the determination of the operating point. In contrast to the well-known works, in which the operating point is chosen in the linear region by intensity, offered operation at the zero sensor operating point by amplitude and shown the advantages of this choice.

Keywords: microwave photonics, E-field, amplitude electro-optic sensor, operating point value.

Андреев Владимир Дмитриевич
Аспирант, Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ
Морозов Олег Геннадьевич
Д.т.н., Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы выбора рабочей точки амплитудного электрооптического датчика для измерения параметров внешних электрических полей. Показано, что анализ модуляционной характеристики датчика на основе кристалла или волновода на основе ниобата лития по напряженности поля лазерного излучения, позволяет существенно пересмотреть подходы к определению положения рабочей точки. В отличие от известных работ, в которых рабочая точка выбирается на линейном участке, предложена работа датчика в нулевой рабочей точке и показаны преимущества данного выбора.

Ключевые слова:

Радиофотоника, электрическое поле, амплитудный электрооптический датчик, положение рабочей точки.

Введение

Измерение параметров электрического поля относится к классу амплитудных и частотных измерений, которые широко применяются в различных областях науки и техники, связанных с антенными измерениями, обеспечением электромагнитной совместимости, неразрушающим контролем и т.д. [1, 2].

Энергетический диапазон приложений для измерения параметров электрического поля лежит в широком диапазоне – от проектирования и эксплуатации высоковольтных установок до биомедицинской электроники и электродинамической активности живых систем.

На современном этапе для измерения параметров электрических полей применяются металлические датчики антенного типа. Физика их материала и, как правило, значительные размеры приводят к искажению измеряемых полей, что определяет малое пространственное разрешение и существенные погрешности измерений [3]. Кроме того, с их помощью невозможно измерить бы-

стро изменяющиеся электрические поля, характерные для переходных процессов.

В отличие от указанных, электрооптические датчики имеют малые размеры и диэлектрическую природу, что позволяет проводить с их помощью точные измерения с высоким пространственным разрешением без искажения распределений измеряемых электрических полей. Кроме того, электрооптические сенсоры характеризуются широкой полосой пропускания и являются адекватным инструментом для регистрации быстро изменяющихся электрических переходных процессов [4].

Электрооптические датчики подобны электрооптическим модуляторам по используемому линейному электрооптическому эффекту Поккельса [5, 6]. При этом показатель преломления для принципиальных осей электрооптического кристалла датчика меняется пропорционально напряженности измеряемого электрического поля.

Изменение показателя преломления вызывает про-

порциональное изменение фазы, амплитуды, поляризации и частоты оптической несущей, проходящей через ЭОК. В соответствии с выбранным для регистрации параметром используются различные конфигурации датчиков.

Линейно-поляризованное вдоль одной из осей оптическое излучение будет промодулировано в ЭОК по фазе под воздействием электрического поля. При установке кристалла в одно из плеч интерферометра Маха-Цендера фазовая модуляция на выходе последнего преобразуется в модуляцию интенсивности и позволяет зарегистрировать напряженность электрического поля, приложенного к датчику. ЭОК с показателем преломления, зависящим от напряженности приложенного электрического поля, может быть использован в структуре интерферометра Фабри-Перо. Выходное излучение интерферометра будет промодулировано по амплитуде, при максимальной чувствительности измерений, обеспечиваемой работой датчика на центральной частоте резонансного пика. При круговой поляризации оптического излучения приложенное электрическое поле вызывает фазовую задержку между обыкновенным и необыкновенным лучами, распространяющимися вдоль принципиальных осей ЭОК. Вследствие этого, выходная поляризация излучения будет отличаться от входной. При попадании этого излучения на поляризатор произойдет преобразование поляризационной модуляции в модуляцию интенсивности. Частотная модуляция оптической несущей реализуется во всех трех выше рассмотренных случаях и характеризуется появлением частотных составляющих сверху и снизу от частоты несущей, пропорциональных или удвоенных частоте приложенного электрического поля.

В ряде работ показано [7], что амплитудные ЭОД по ряду параметров превосходят фазовые, поляризационные и частотные. Кроме того, как показано выше, преобразование параметров электрических полей любого типа, завершается стадией амплитудных измерений, а сама амплитудная модуляция наиболее распространена в датчиках электрических полей.

Основной проблемой амплитудных ЭОД является выбор его рабочей точки, от которой зависит линейность преобразования, спектральный состав, формируемого отклика и его энергетические характеристики.

Типовой амплитудный ЭОД

На рис. 1. показана структурная схема типового ЭОД, основанного на амплитудной модуляции.

В данном амплитудном ЭОД волновод из электрооптического материала расположен между двумя поляризаторами с взаимно ортогональными осями поляризации. Для сохранения линейности отклика датчика при воздействии электрического поля без использования напряжения смещения, между первым поляризатором и электрооптическим кристаллом располагают четвертьволновую пластинку, которая вносит дополнительный сдвиг фаз на $\pi/2$ между обыкновенной и необыкновенной составляющими излучения. При воздействии измеряемого электрического поля, коэффициент отражения электрооптического кристалла меняется и появляется амплитудно-модулированный оптический сигнал на выходе второго поляризатора. После преобразования модулированного оптического сигнала в электрический и временного (либо частотного) детектирования, мы получаем измеряемое значение.

Типовое положение рабочей точки разработчики выбирают, исходя из положения линейного участка при смещении на него с помощью четвертьволновой пластины (рис. 2,а). При этом выбор происходит при использовании модуляционной характеристики по интенсивности лазерного излучения (рис. 2,б).

Нами в данной работе предложен выбор нулевой рабочей точки по амплитудным соотношениям оптического излучения, поскольку преобразование по мощности осуществляется лишь в фотодетекторе, а не в кристалле. Проанализируем данный выбор и покажем его преимущества.

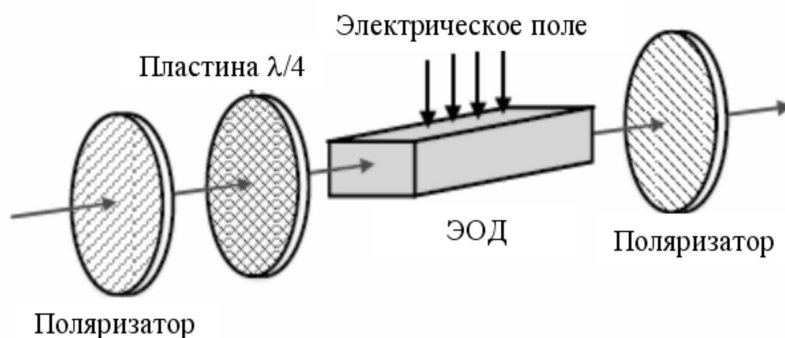


Рисунок 1. Структурная схема типового амплитудного ЭОД.

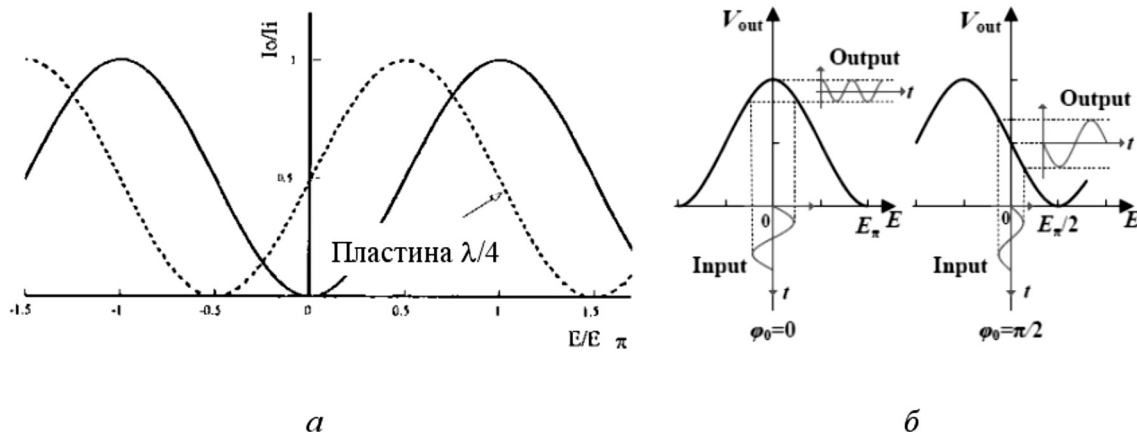


Рисунок 2. Выбор положения рабочей точки по интенсивности: модуляционная характеристика ЭОД (а) при наличии четвертьволновой пластины (пунктир) и без нее (сплошная линия); выбор рабочей точки (б) в точке максимума и на линейном участке по интенсивности.

Анализ излучения на выходе ЭОД по напряженности поля лазерного излучения в различных рабочих точках

Рассмотрим прохождение через ЭОД лазерного излучения

$$E(t) = E_0 e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где E_0 – его амплитуда, ω – частота.

Векторную систему типового амплитудного ЭОД без четвертьволновой пластины можно представить на рис. 3.

На рис. 3 обозначены: E_z' и E_y' проекции вектора E_0 световой волны на направления соответственно OZ' OY' оптической индикатрисы кристалла, λ – угол между плоскостью поляризации поляризатора и осью OY' при наложенном ЭП, β – угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора.

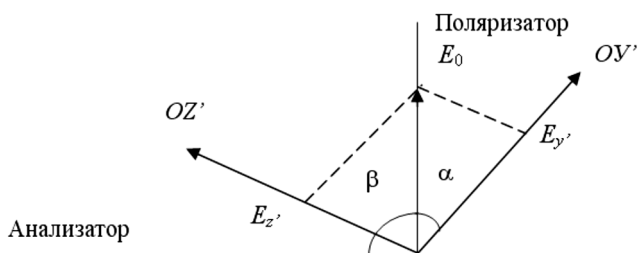


Рисунок 3. К выводу спектра излучения на выходе ЭОД.

Составляющие оптического поля после входного поляризатора описываются выражением

$$\begin{aligned} E_{y'} &= E_0 \cos \alpha e^{j\omega t}, \\ E_{z'} &= E_0 \sin \alpha e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Составляющие света на выходе ЭОД описываются выражением

$$\begin{aligned} E_{y'} &= E_0 \cos \alpha \cos(\alpha + \beta) e^{j\omega t} e^{j\Gamma/2}, \\ E_{z'} &= E_0 \sin \alpha \sin(\alpha + \beta) e^{j\omega t} e^{-j\Gamma/2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Γ – фазовый сдвиг, состоящий из сдвига Γ_0 , определяемого положением рабочей точки, и наведенного измеряемым электрическим полем.

Суммарное поле на выходе системы имеет вид

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 \left[\cos \alpha \cos(\alpha + \beta) e^{j\Gamma/2} + \right. \\ &\left. + \sin \alpha \sin(\alpha + \beta) e^{-j\Gamma/2} \right] e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

При построении амплитудных ЭОД обычно используются два случая: 1) $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$; 2) $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$.

Рассмотрим первый случай.

При $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$ выражение (4) принимает вид

$$E(t) = -jE_0 \sin(\Gamma/2) e^{j\omega t}. \quad (5)$$

Используя разложение (5) в ряд Фурье, найдем спектр излучения на выходе ЭОД при работе в "нулевой" точке и на линейном участке модуляционной характеристики при гармоническом воздействии.

А. Работа в "нулевой" точке. В этом случае набег фазы Γ ($\Gamma_0 = 0$) определяется выражением

$$\Gamma = \frac{\pi U_m \sin \Omega t}{U_{\lambda/2}} \quad (6)$$

где U_m и Ω – напряженность и частота наведенного электрического поля, $U_{\lambda/2}$ – полуволновое напряжение волновода.

Подставив (6) в (5), определим спектр излучения на выходе ЭОД

$$E_{\text{ВЫХ}} = -jE_0 e^{j\omega t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right] \quad (7)$$

где $J_{2k+1}(z)$ – функция Бесселя $(2k+1)$ -го порядка.

Анализ выражения (7) показывает, что спектр выходного излучения ЭОД в "нулевой" рабочей точке при гармоническом воздействии и углах $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$ содержит только нечетные гармоники на частотах $(2k+1)\Omega$. Их амплитуда определяется значением функции Бесселя $(2k+1)$ -го порядка. Фазы боковых составляющих одинаковы по величине и противоположны по знаку. Индекс j в данном выражении указывает на то, что полученные составляющие ортогональны вектору поляризации исходного одночастотного излучения. При $U_m = U_{\lambda/2}$ получим $z = \pi/2, J_1(z) = 0,57, J_3(z) = 0,07$. Таким образом, основная доля энергии в спектре излучения содержится в первых гармониках, а сам спектр можно считать двухчастотным.

Б. Работа на линейном участке. В этом случае набег фазы Γ определяется выражением

$$\Gamma = \Gamma_{=} + \pi U_m \sin \Omega t / U_{\lambda/2} \quad (8)$$

где $\Gamma_{=} = \pi/2$ – независящий от времени фазовый сдвиг, определяемый положением рабочей точки на модуляционной характеристике (четвертьволновая пластина). Подставив (8) в (5), получим

$$E_{\text{ВЫХ}} = -j \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{j\omega t} \times \left\{ J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) \cos 2k\Omega t + 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right\} \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что спектр выходного излучения ЭОД на линейном участке при гармоническом воздействии и углах $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$ содержит постоянную составляющую на частоте оптического излучения ω , нечетные гармоники на частотах $\omega \pm (2k+1)\Omega$ и четные гармоники на частотах $\omega \pm 2k\Omega$. Их амплитуда определяется значением функций Бесселя. При $U_m = U_{\lambda/2}/2$ получим $z = \pi/4; J_0(z) = 0,84, J_1(z) = 0,37, J_2(z) = 0,07$. С учетом множителя $\sqrt{2}/2$ можно сказать, что спектр излучения на выходе амплитудного ЭОД содержит три составляющие и адекватен спектру амплитудно-модулированного излучения.

Рассмотрим второй случай.

При $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$ выражение (5) принимает вид

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = E_0 \cos(\Gamma/2) e^{j\omega t} \quad (10)$$

А. Работа в нулевой точке. В этом случае получим

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = E_0 e^{j\omega t} \left\{ J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) \cos 2k\Omega t \right\} \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что спектр выходного излучения ЭОД в "нулевой" точке при гармоническом воздействии и углах $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$ содержит составляющие на частоте исходного оптического излучения и четные составляющие на частотах $\omega \pm 2k\Omega$. Отсутствие j указывает на то, что поляризация выходного излучения совпадает с поляризацией входного. Амплитуды составляющих при $U_m = U_{\lambda/2}$ и $z = \pi/2$ определяются функциями Бесселя $J_0(z) = 0,45, J_2(z) = 0,22$. Таким образом, спектр выходного излучения адекватен спектру амплитудно-модулированного излучения с разносом боковых частот на 2Ω .

Б. Работа на линейном участке. В этом случае получим

$$E_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{j\omega t} \times \left\{ J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) \cos 2k\Omega t - 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right\} \quad (12)$$

Сравнение (12) и (9) показывает их совпадение. Отличие заключается в поляризации и начальной фазе боковых составляющих на частотах $\omega \pm (2k+1)\Omega$. Данные проведенного анализа сведены в **табл. 1**.

Из табл. 1 видно, что модуляционная характеристика ЭОД по напряженности поля оптического излучения имеет вид $E_{\text{ВЫХ}}/E_0 = \sin(\Gamma/2)$ в случае $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$ и $E_{\text{ВЫХ}}/E_0 = \cos(\Gamma/2)$ в случае $\alpha = 45^\circ, \beta = 0^\circ$.

Таким образом, функционирование ЭОД характеризуется режимом работы, отличающимся положением рабочей точки на модуляционной характеристике по напряженности поля (**рис. 4**).

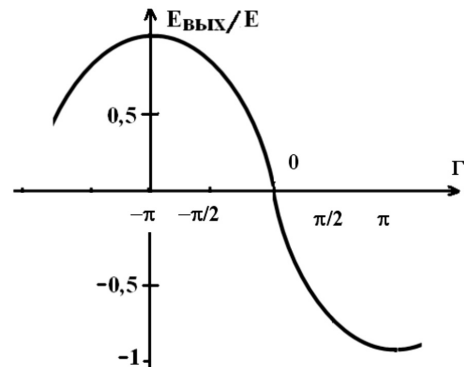


Рисунок 4. Модуляционная характеристика ЭОД по напряженности поля.

Таблица 1.

Характеристики выходного излучения на выходе ЭОД в различных рабочих точках.

$\alpha, \beta, \Gamma_{\pm}$	Спектр излучения на выходе ЭОД
$\alpha = 45^\circ$ $\beta = 45^\circ$ $\Gamma_{\pm} = 0$	$E_{\text{Вых}} = -jEe^{j\omega t} \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right]$
$\alpha = 45^\circ$ $\beta = -45^\circ$ $\Gamma_{\pm} = 0$	$E_{\text{Вых}}(t) = Ee^{j\omega t} \left\{ J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) \cos 2k\Omega t \right\}$
$\alpha = 45^\circ$ $\beta = 45^\circ$ $\Gamma_{\pm} = 0$	$E_{\text{Вых}} = -j \frac{\sqrt{2}}{2} Ee^{j\omega t} \left\{ J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) \cos 2k\Omega t + 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right\}$
$\alpha = 45^\circ$ $\beta = -45^\circ$ $\Gamma_{\pm} = 0$	$E_{\text{Вых}}(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} Ee^{j\omega t} \left\{ J_0(z) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(z) \cos 2k\Omega t - 2 \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(z) \sin(2k+1)\Omega t \right\}$

Анализ выражения (7) показывает, что спектр выходного сигнала ЭОД при $\Gamma_{\pm}=0$ является многочастотным и состоит из двух полос, при этом колебание на частоте несущей отсутствует (рис. 5).

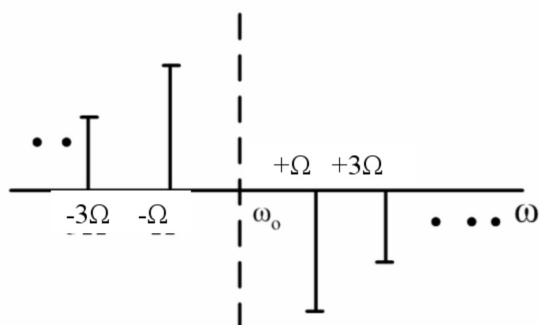


Рисунок 5. Спектр излучения на выходе ЭОД, работающего в "нулевой" рабочей точке при приложении внешнего электрического поля.

Полосы расположены симметрично относительно подавленной несущей, спектральные составляющие находятся на частотах $\omega = \omega_0 \pm n\Omega$, где $n=1,3,5..$, то есть четные гармоники подавлены. Начальные фазы гармоник, составляющих нижнюю полосу на π отличны от начальной фазы гармоник верхней полосы.

Для малых модулирующих напряжений гармониками 2-го и более высокого порядка можно пренебречь в силу их малости [8, 9].

Никаких дополнительных устройств для сдвига рабочей точки не требуется. Анализ энергетических характеристик показывает, что в нулевой рабочей точке ампли-

туда информационных составляющих в 1,5 раза выше, чем при модуляции на "линейном участке по интенсивности".

Однако, при работе в нулевой точке модуляционной характеристики (7) спектр излучения на выходе ЭОД двухчастотен. Вряд ли данный фактор можно считать недостатком. Он никак не влияет на однозначность связи амплитуды выходного излучения ЭОД и напряженности приложенного электрического поля. Искаженные значения принимает лишь частотная информация, если она существенна в задачах, решаемых конкретными измерениями. Для восстановления частотной информации может быть применен гетеродинный метод, для чего несущее излучение может заведено на фотоприемник по отдельному волокну. Либо могут быть рассмотрены варианты использования двухчастотного входного излучения, аналогично вариантам, используемым в линиях связи, построенным по технологиям "радио-по-волокну".

Результаты экспериментальных исследований

Для подтверждения теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования, в которых были использованы волноводы из модуляторов на основе ниобата лития, изготовленные в ПНППК, г. Пермь.

Компоненты экспериментальной установки: драйвер лазерного диода Superlum Pilot-4, лазерный диод LDI-DFB 1550-20/50-T2-SM3-FA-CWP, генератор Tektronix AFG 3251, генератор высокочастотный Г4-114, фотодетектор с полосой в 1 ГГц, осциллограф Agilent DSO 7104B.

На рис. 6 представлены спектры входного (а) и выходного излучений ЭОД в нулевой рабочей точке (б) и на ли-

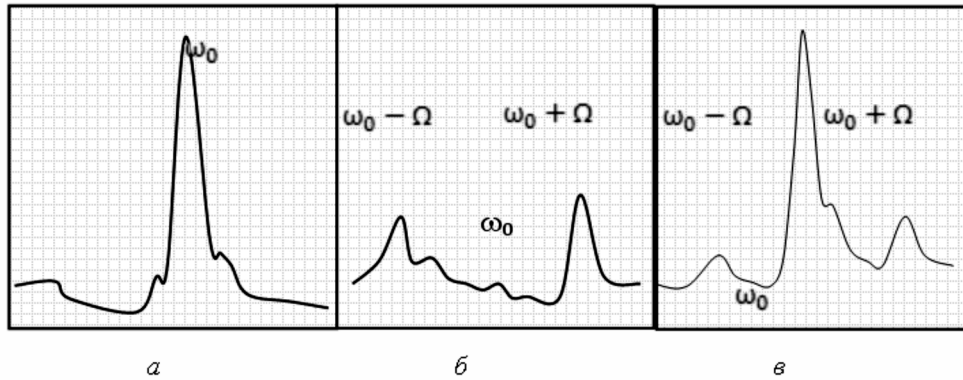


Рисунок 6. Спектр входного (а) и выходных излучений ЭОД в нулевой точке (б) и в точке $\pi/2$ по напряженности поля (в).

нейном участке (в). Из рис. 6 хорошо виден выигрыш в амплитуде информационных составляющих, сформированных при воздействии внешнего электрического поля на амплитудный ЭОД.

Анализ модуляционной характеристики ЭОД показывает, что основные погрешности преобразования будут определяться изменением положения рабочей точки. Результаты исследований в виде зависимостей $|E_n/E_0| = f(\Gamma_n)$ при $U_m = 0,5 U_{\lambda/2}$ и изменении Γ_n от 0 до $\pi/2$ представлены на рис. 7.

Кривые представленные на рис. 7 дают полное представление о качественном и количественном составе спектра выходного излучения ЭОД. Изменение положения рабочей точки оказывает наибольшее влияние на спектральный состав выходного излучения. При изменении температуры окружающей среды на 1°C уход положения рабочей точки составляет 0,02 В. В этом случае происходит уменьшение амплитуды полезных составляющих на частоте $\omega_0 \pm \Omega$ на 0,5% и увеличение амплитуд паразитных составляющих на 1%.

Таким образом, особое внимание следует уделить стабилизации положения рабочей точки, которое определяется температурой окружающей среды и точностью юстировки устройства относительно луча лазера.

Методы стабилизации рабочей точки изложены достаточно полно. Особого внимания заслуживают методы формирования широкополосных или полигармонических входных излучений и использования дисперсионных элементов для формирования дополнительного фазового сдвига их составляющих, в зависимости от сигнала рассогласования, получаемого при пилот-зондировании ЭОД.

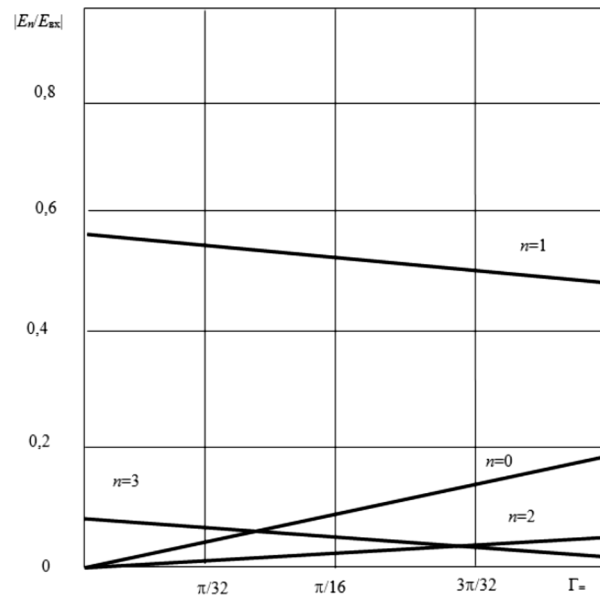


Рисунок 7. Зависимость амплитуд составляющих излучения на выходе ЭОД от положения рабочей точки.

Выводы по работе

В работе рассмотрены вопросы выбора рабочей точки амплитудного ЭОД для измерения параметров внешних электрических полей.

В отличие от известных работ, в которых рабочая точка выбирается на линейном участке по интенсивности, предложена работа датчика в нулевой рабочей точке по напряженности оптического поля и показаны преимущества данного выбора. К ним относятся возможность получения выигрыша по амплитуде информационной составляющей практически в 1,5 раза и отсутствие необ-

ходимости использования дополнительных селективных элементов для формирования положения рабочей точки. В случае необходимости контроля частотного состава приложенного электрического поля предложено формирования гетеродинного или полигармонического амплитудного ЭОД. Показано существенное влияние положения рабочей точки на параметры выходного излучения

ЭОД. Кратко рассмотрены вопросы и предложены меры по ее стабилизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проектной части Государственного задания 3.1962.2014/К "Радиофотоника".

ЛИТЕРАТУРА

1. Yao J. Microwave photonics // J. Lightw. Technol. 2009. V. 27. No. 3. P. 314–335.
2. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно–фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1. С. 3–42.
3. Prather W.D., Baum C.E., Torres R.J., et al. Survey of worldwide high–power wideband capabilities // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2004. V. 46. No. 3. P. 335–344.
4. Yang K., David G., Yook J.–G., et al. Electrooptic mapping and finite–element modeling of the near–field pattern of a microstrip patch antenna // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2000. V. 48. No. 2. P. 288–294.
5. Садеев Т.С., Морозов О.Г. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов // Вестник МарГТУ. 2010. Т.10. № 3. С. 22–30.
6. Насыбуллин А.Р., Морозов О.Г. и др. Радиофотонный синтез сложных радиосигналов с линейной частотной модуляцией // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. 2015. №12.
7. Duvillaret L., Rialland S., Coutaz J.–L. Electro–optic sensors for electric field measurements. I. Theoretical comparison among different modulation techniques // J. Opt. Soc. Am. B. 2002. V. 19. No. 11. P. 2692–2703.
8. Морозов О.Г., Айбатов Д.Л., Садеев Т.С. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно–оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 3. С. 84–91.
9. Севастьянов А.А., Морозов О.Г., Нуреев И.И. и др. Формирование многочастотного излучения в двухпортовом модуляторе Маха–Цендера // Научно–технический вестник Поволжья. 2013. №4. С.232–236.
10. Ильин Г.И., Морозов О.Г., Польский Ю.Е. Особенности построения электрооптических амплитудно–фазовых формирователей двухчастотного лазерного излучения для дифференциальных ЛЧМ–лидаров // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 5. С. 513.
11. Талипов А.А., Морозов О.Г., Ильин Г.И. и др. Метод формирования двухчастотного излучения для синтеза солитонов и применения спектрально–эффективной модуляции RZ и CSRZ форматов в оптических сетях доступа // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2012. № 2 (16). С. 3–12.
12. Морозов О.Г., Нургазизов М.Р., Талипов А.А. и др. Измерение мгновенной частоты СВЧ–радиосигналов в оптическом диапазоне на основе преобразования "частота–амплитуда" в волоконной решётке Брэгга с фазовым –сдвигом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2013. № 3 (19). С. 30–41.

© В.Д. Андреев, О.Г. Морозов, (microoil@mail.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

