

УДК 681.7.068/.069

**В.М. Афанасьев<sup>1</sup>, Р.С. Пономарев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Коломенский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ), Коломна, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПОЛУВОЛНОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА – ЦЕНДЕРА**

К основным электрическим параметрам модуляторов Маха – Цендера относятся статическое полуволновое напряжение и динамическое полуволновое напряжение. В документации на электрооптические модуляторы не всегда приводятся исчерпывающие характеристики. Особенно трудно определить динамическое полуволновое напряжение на интересующей частоте.

Предложен способ экспериментального определения статического полуволнового напряжения и динамического полуволнового напряжения модуляторов Маха – Цендера. Эффективность способа подтверждена имитационным экспериментом в среде OptiSystem 16.

**Ключевые слова:** электрооптический модулятор Маха – Цендера, рабочая точка модулятора, модулирующий сигнал, схема подключения, статическое полуволновое напряжение, динамическое полуволновое напряжение.

**V.M. Afanas'ev<sup>1</sup>, R.S. Ponomarev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Kolomna Institute (branch) of Moscow State Engineering University (MAMI),  
Kolomna, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

## **EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE HALF-WAVE VOLTAGE OF THE MACH-ZENDER ELECTRO-OPTICAL AMPLITUDE MODULATOR**

The main electrical parameters of Mach-Zehnder modulators include static half-wave voltage and dynamic half-wave voltage. The documentation for electro-optical modulators does not always provide exhaustive characteristics. It is particularly difficult to determine the dynamic half-wave voltage at the frequency of interest.

A method for experimentally determining the static half-wave voltage and dynamic half-wave voltage of Mach-Zehnder modulators is proposed. The effectiveness of the method was confirmed by a simulation experiment in the OptiSystem 16 environment.

**Keywords:** Mach-Zehnder electrooptic modulators, the controller operating point, the driver of the modulating signal, wiring diagram, static half-wave voltage, dynamic half-wave voltage.

## Введение

Улучшение характеристик обработки радиосигналов в системах передачи, приема и обработки информации достигается методами и средствами радиофотоники. Эффективным средством обработки радиотехнических сигналов в оптическом диапазоне служат электрооптические модуляторы Маха – Цендера [1, 2, 3].

Модуляторы интенсивности Маха – Цендера основаны на интерферометрическом принципе. Модулятор состоит из двух разветвителей, которые соединены двумя волноводами одинаковой длины [4]. С помощью электрооптического эффекта внешнее приложенное напряжение изменяет показатель преломления в ветвях волновода. Электрические сигналы, приложенные к электродам одного или обоих оптических плеч, определяют интенсивность излучения на выходе модулятора.

К основным электрическим параметрам модуляторов Маха – Цендера относятся статическое полуволновое напряжение и динамическое полуволновое напряжение. В документации на электрооптические модуляторы не всегда приводятся исчерпывающие характеристики. Часто приводится диапазон их значений. Особенно трудно определить динамическое полуволновое напряжение на интересующей частоте [5].

В статье [3] приведены результаты экспериментальных исследований модуляционной характеристики модулятора Маха – Цендера путем непосредственного и косвенного измерений. Для экспериментального исследования был собран стенд, состоящий из лазерного излучателя EMCORETTX 1994, модулятора интенсивности излучения OptilabIM-1550-20-а и PIN-фотодиода EMCORE 2522B. Элементы соединены с помощью оптического волокна CorningSMF-28e+. Структурная схема лабораторного стенда для исследования сигнала фотодиода содержала источник питания БЗ-701.4, генератор ВЧ-сигналов AgilentTechnologies 83711B и анализатор радиочастотного спектра R&SFSU50.

Для непосредственного измерения модуляционной характеристики электрооптического модулятора на его вход подавался стабильный уровень оптической мощности, а на выходе подключался измеритель оптической мощности. Изменяя напряжение смещения, поданного на модулятор от источника питания, наблюдалось изменение уровня выходной мощности оптического излучения. Полученное в данном случае статическое полуволновое напряжение смещения равно 5,1 В.

В варианте косвенного измерения к выходу фотоприемника подключался анализатор радиочастотного спектра. При этом на управляющие входы модулятора подавались напряжение смещения от источника питания (для изменения положения рабочей точки на модуляционной характеристике) и высокочастотный сигнал от генератора ВЧ-сигналов. При изменении напряжения смещения отслеживался уровень первой гармоники на экране анализатора спектра. Если рабочая точка находилась в области квадратуры модуляционной характеристики, то уровень первой гармоники на выходе фотоприемника достигал своего максимального значения. Если же рабочая точка находилась в максимуме или минимуме модуляционной характеристики, наблюдались минимальные значения уровня первой гармоники на выходе фотодиода и максимальное значение второй гармоники. При косвенном измерении статическое полуволновое напряжение модулятора равно 5,3 В.

Рассмотрим возможность экспериментального определения статического полуволнового напряжения и динамического полуволнового напряжения модуляторов Маха – Цендера в имитационном эксперименте в среде OptiSystem 16. Типичная схема подключения двухпортового модулятора Маха – Цендера в среде OptiSystem приведена на рис. 1.

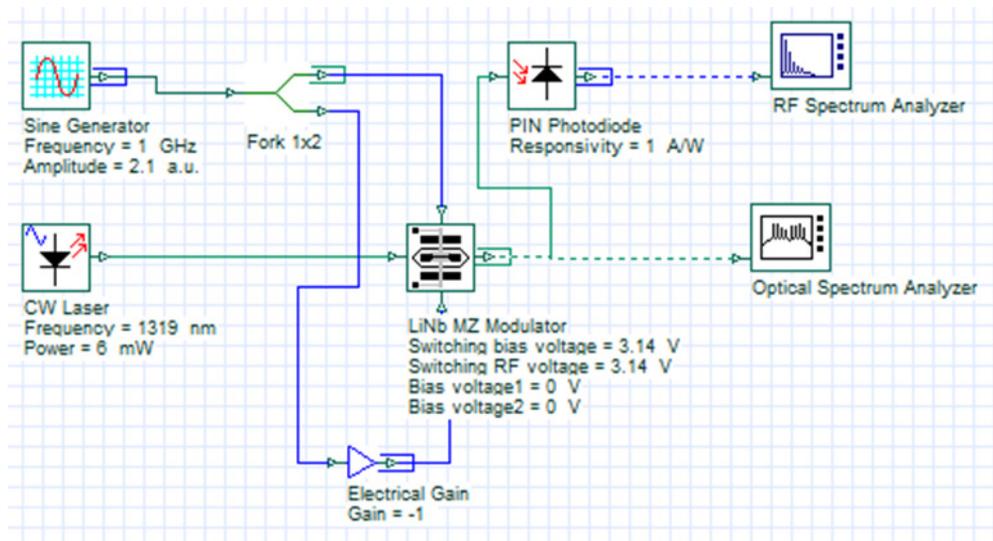


Рис. 1. Типичная схема подключения двухпортового модулятора Маха – Цендера

При моделировании систем с модулятором Маха – Цендера в среде OptiSystem используются: CW Laser-CW лазер (генератор непрерывного оптического излучения); Sine Generator – генератор синусоидального модулирующего напряжения; PIN Photodiode – PIN-фотодиод, преобразующий оптический сигнал в электрический; визуализаторы RF Spectrum Analyzer – анализатор радиочастотного спектра и Optical Spectrum Analyzer – оптический анализатор спектра; Electrical Gain – идеальный усилитель электрического сигнала; Fork 1x2 – вилка, копирующая входной сигнал в два выходных сигнала.

### **Экспериментальное определение статического полуволнового напряжения**

Статическое полуволновое напряжение электрооптического модулятора (Static half-wave voltage) характеризует напряжение, используемое для задания положения рабочей точки. Это – минимальное статическое напряжение, подаваемое на электрооптический модулятор и необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального или наоборот, или изменения фазовой задержки на  $\pi$  радиан [6].

Величину статического полуволнового напряжения  $V_{\pi DC}$  определим как минимальную разницу напряжений смещения рабочей точки  $V_{DC}$  между соседними точками «Quadrature» в функции пропускания модулятора Маха – Цендера (рис. 2). В точках «Quadrature» – максимальная крутизна функции пропускания модулятора, что способствует более точному определению напряжений по сравнению с характерными точками «MAX» и «MIN».

Эксперимент моделируется в среде OptiSystem 16. Схема эксперимента представлена на рис. 3. Вначале подается напряжение смещения, равное нулю. Затем повышается напряжение смещения до величины, при которой на выходе фотодиода присутствуют только нечетные гармоники. Спектр напряжения на выходе фотодиода контролируется с помощью RF Spectrum Analyzer (радиочастотного анализатора спектра). Спектр состоит из первой и третьей гармоник. Рабочая точка модулятора в «-Quadrature». Напряжение смещения рабочей точки равно Bias voltage1 =  $V_{\pi DC}/2$ . При заданном на схеме (рис. 3) статическом полуволновом напряжении 6,28 В (Switching bias voltage = 6,28V) напряжение смещения, удовлетворяющее этому условию, равно 3,14 В.

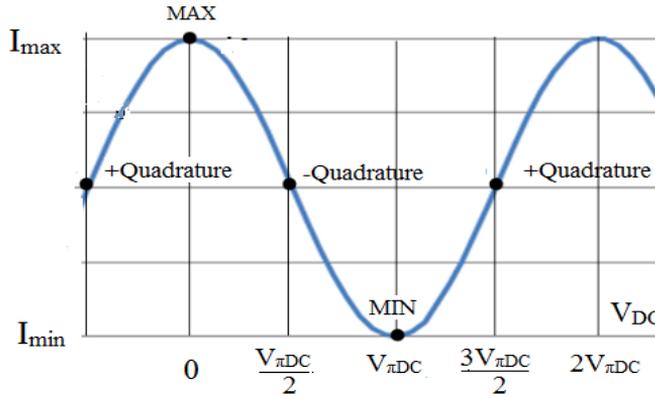


Рис. 2. Функция пропускания идеального модулятора Маха – Цендера:  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная величины излучения на выходе модулятора;  $V_{DC}$  – напряжение смещения рабочей точки;  $V_{\pi DC}$  – статическое полуволновое напряжение; MAX и MIN – максимальная и минимальная рабочие точки; +Quadrature и –Quadrature – рабочие точки в квадратуре

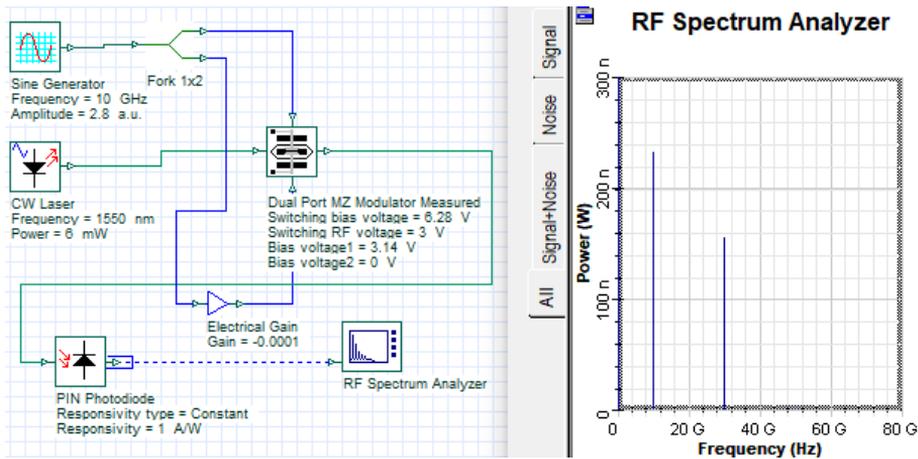


Рис. 3. Эксперимент в среде OptiSystem 16 (рабочая точка в «-Quadrature»).  
Напряжение смещения рабочей точки  $V_{DC} = \text{Bias voltage1} = V_{\pi DC}/2 = 3,14$  В  
(спектр сигнала фотодиода состоит из первой и третьей гармоник)

Далее, увеличивая напряжение смещения рабочей точки Bias voltage 1, устанавливается режим, при котором также присутствуют только нечетные гармоники. На рис. 4 представлен вариант, при котором установлена рабочая точка «+Quadrature» путем увеличения напряжения смещения.

Спектры сигнала фотоприемника при напряжениях смещения 3,14 и 9,42 В (в точках «-Quadrature» и в «+Quadrature») одинаковые,

присутствуют только нечетные гармоники. Статическое полувольтное напряжение определяется как:

$$V_{\pi DC} = V_{2DC} - V_{1DC} = 9,42 - 3,14 = 6,28 \text{ В.}$$

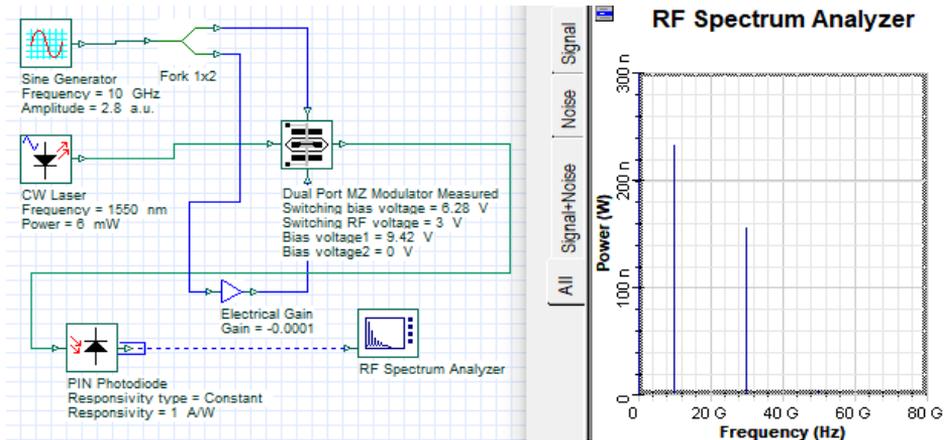


Рис. 4. Эксперимент в среде OptiSystem (рабочая точка в «+Quadrature»).  
 Напряжение смещения рабочей точки  $V_{2DC} = \text{Bias voltage } 1 = 3V_{\pi DC}/2 = 9,42 \text{ В}$

Полученный результат соответствует заданному статическому полувольтному напряжению модулятора  $\text{Switching bias voltage} = 6,28 \text{ В}$  (см. рис. 3 и 4).

### Экспериментальное определение динамического полувольтного напряжения

Динамическое полувольтное напряжение электрооптического модулятора (Dynamic half-wave voltage) характеризует модулирующее напряжение. Это минимальное амплитудное напряжение на частоте модуляции, подаваемое на электрооптический модулятор и необходимое для изменения его коэффициента пропускания от минимального до максимального или наоборот, или изменения фазовой задержки на  $\pi$  радиан [6].

Определим динамическое полувольтное напряжение  $V_{\pi RF}$  на частоте 10 ГГц в режиме работы модулятора в точке «-Quadrature»:

1. У генератора Sine Generator устанавливается амплитуда напряжения модуляции менее предполагаемого значения динамического полувольтного напряжения (на рис. 3 Amplitude = 2,8 a.u.) и частота модуляции 10 ГГц (Frequency = 10 GHz).

2. Изменяя напряжение смещения рабочей точки, устанавливается режим, при котором присутствуют только нечетные гармоники:  $V_{DC} = V_{\pi DC}/2 = 3,14$  В (см. рис. 3).

3. Увеличивая амплитуду модулирующего сигнала  $V_M$  (Amplitude у генератора Sine Generator), устанавливается сигнал фотодиода со спектром без первой гармоники (рис. 5). При этом амплитуда третьей гармоники будет близка к максимальной.

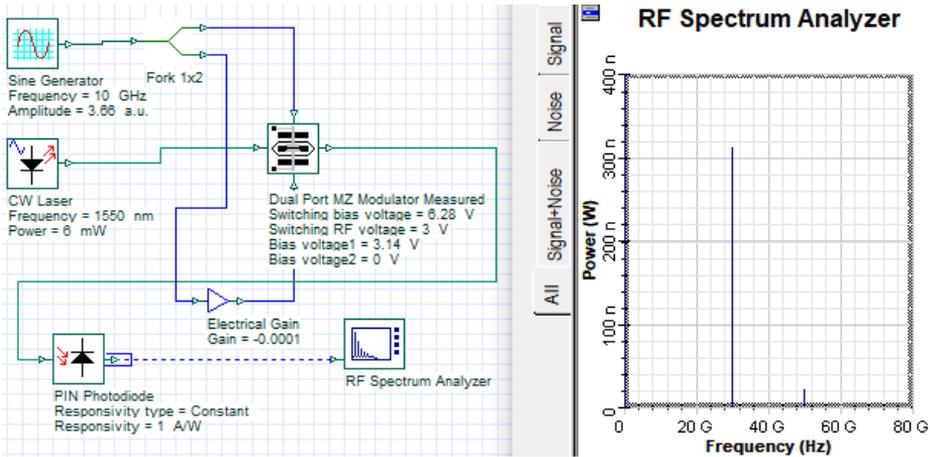


Рис. 5. Эксперимент в среде Opti System (Sine Generator, Amplitude = 3,66 В). Амплитуда напряжения модуляции  $V_M = 3,66$  В (спектр сигнала фотодиода без первой гармоники)

4. В точке «–Quadrature» сигнал фотоприемника  $U_{ФП}$  состоит из постоянной составляющей и нечетных гармоник:

$$U_{ФП} = U_m \left( 1 - 2J_1(\Delta\phi) \sin \omega t - 2J_3(\Delta\phi) \sin 3\omega t - 2J_5(\Delta\phi) \sin 5\omega t \dots \right)$$

Амплитуду первой гармоники определяет функция Бесселя первого рода первого порядка  $J_1(\Delta\phi)$ . Она равна нулю (или минимальна) при  $\Delta\phi = 3,83170597025677$ . Тогда динамическое полуволновое напряжение исследуемого модулятора на частоте модуляции 10 ГГц при амплитуде напряжения модуляции  $V_M = 3,66$  В определяется как

$$V_{\pi RF} = \pi V_M / \Delta\phi = 3,14 \cdot 3,66 / 3,8317 = 2,999 \text{ В} \approx 3 \text{ В}.$$

В результате получили  $V_{\pi RF} = 3$  В, что соответствует запрограммированному значению Switching RF voltage = 3 В (см. рис. 5).

### Заключение

Предложен простой и доступный способ измерения статического и динамического полуволнового напряжений электрооптического модулятора Маха – Цендера. Для определения полуволнового напряжения требуется минимальный состав оборудования. Эффективность способа подтверждена в среде Opti System 16.

Результаты будут полезны для инженерного проектирования и настройки аналоговых волоконно-оптических систем с использованием электрооптических модуляторов Маха – Цендера.

### Список литературы

1. О применении методов и средств радиофотоники для обработки сигналов дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн / А.А. Белоусов, Ю.Н. Вольхин, А.В. Гамиловская, А.А. Дубровская, Е.В. Тихонов // Прикладная фотоника. – 2014. – № 1. – С. 65–86.

2. Морозов О.Г., Ильин Г.И. Амплитудно-фазовая модуляция в системах радиофотоники // Вестник Поволжского гос. технолог. ун-та. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (20). – С. 6–42.

3. Применение электрооптического модулятора интенсивности в устройствах преобразования частоты радиосигналов./ В.В. Бирюков, В.А. Грачев, С.Г. Лобин, М.А. Палачев, А.С. Раевский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Энергетические системы и комплексы. – 2017. – № 2 (117). – С. 49–55.

4. Афанасьев В.М., Пономарев Р.С. Электрооптические амплитудные модуляторы Маха – Цендера на основе ниобата лития, их модификации и форматы модуляции // Прикладная фотоника. – 2017. – № 4. – С. 337–360.

5. 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator JDS Uniphase Corporation. – URL: [http://www.lightwavestore.com/product\\_datasheet/OSC...pdf1.pdf](http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/OSC...pdf1.pdf).

6. ГОСТ 15093–90. Лазеры и устройства управления лазерным излучением. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 30 с.

7. DIN EN 62802-2018 (МЭК 62802:2017). Measurement methods of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder opti-

cal modulators in high-frequency radio on fibre (RoF) // Systems (IEC 62802:2017). English version EN 62802:2017.

### References

1. Belousov A.A., Vol'khin Iu.N., Gamilovskaia A.V., Dubrovskaiia A.A., Tikhonov E.V. O primeneniі metodov i sredstv radiofotoniki dlia obrabotki signalov detsimetrovogo, santimetrovogo i millimetrovogo diapazonov dlin voln [Radiophotonical methods and tools used for microwave analog and digital signal processing]. *Prikladnaia fotonika*, 2014, no. 1, pp. 65-86.

2. Morozov O.G., Il'in G.I. Amplitudno-fazovaia moduliatsiia v sistemakh radiofotoniki [Amplitude-phase modulation in microwave photonics systems]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy*, 2014, no. 1(20), pp. 6-42.

3. Biriukov V.V., Grachev V.A., Lobin S.G., Palachev M.A., Raevskii A.S. Primenenie elektroopticheskogo moduliatora intensivnosti v ustroistvakh preobrazovaniia chastoty radiosignalov [Application of an electro-optical intensity modulator in radio signal frequency conversion devices]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni R.E. Alekseeva. Energeticheskie sistemy i komplekсы*, 2017, no. 2(117), pp. 49-55.

4. Afanas'ev V.M., Ponomarev R.S. Elektroopticheskie amplitudnye modulatory Makha – Tsendera na osnove niobata litiia, ikh modifikatsii i formaty moduliatsii [Electrooptical amplitude Mach-Zehnder modulator based on lithium niobate, their modifications and modulation formats]. *Prikladnaia fotonika*, 2017, no. 4, pp. 337-360.

5. 10 Gb/s Dual Drive Mach-Zehnder (DDMZ) Modulator JDS Uniphase Corporation, available at: [http://www.lightwavestore.com/product\\_datasheet/OSC...pdf1.pdf](http://www.lightwavestore.com/product_datasheet/OSC...pdf1.pdf).

6. GOST 15093-90. Lazery i ustroistva upravleniia lazernym izlucheniem. Terminy i opredeleniia [GOST 15093-90 Lasers and laser modulation devices. Terms and definitions]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1990, 30 p.

7. DIN EN 62802-2018 (MЭК 62802:2017). Measurement methods of a half-wavelength voltage and a chirp parameter for Mach-Zehnder optical modulators in high-frequency radio on fibre (RoF). *Systems (IEC 62802:2017)*. English version EN 62802:2017.

Получено 11 марта 2020