

УДК 621.317

Я. О. Довгый, И. В. Китык, И. Я. Пидстрыгач, В. А. Ювженко,
 А. Г. Южанин
 (Львов, Украина)

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УЗЛОВ
 ДЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ**

Предложена модель измерителя высоковольтных импульсных напряжений, которая базируется на линейном электрооптическом эффекте. Проведена оптимизация важнейших параметров модулирующего, приемного и передающего узлов измерителя, а также тракта передачи сигнала.

Существенный вклад в технику измерений высоковольтных импульсных напряжений внесли оптоэлектронные методы измерений [1]. Особенностью этих методов является использование оптической несущей частоты лазерного излучения. Носитель сигнала — когерентное излучение строгой направленности, что позволяет осуществить электрическую развязку между высоковольтным и низковольтным измерительными блоками. Главная причина, которая сдерживает их широкое использование, — недостаточная оптимизация используемых параметров, что до сих пор делает их неконкурентоспособными по сравнению с традиционными методами измерений.

В данной работе предложена модель измерителя высоковольтных импульсных напряжений, которая базируется на линейном электрооптическом эффекте (ЭОЭ). Проведена оптимизация важнейших параметров модулирующего, приемного и передающего узлов измерителя, а также тракта передачи сигнала.

Модуляция оптического излучения осуществляется с помощью ячейки с ацентричным кристаллом, обладающим линейным ЭОЭ.

Функциональная схема предлагаемого измерителя приведена на рис. 1. Функция передачи мощности источника излучения $H_p^\lambda(i)$ описывается формулой [2]

$$H_p^\lambda(i) = 0,5C \exp - [(i - i_0)/2]^2, \quad (1)$$

где $C = \text{const}$, которая определяется особенностями конструкции источника излучения; i — ток разряда источника (лазера) излучения в оптимальном режиме; i_0 — рабочий ток.

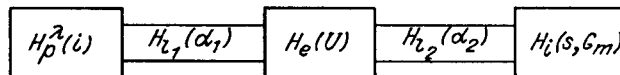


Рис. 1. Функциональная схема измерителя высоковольтных импульсных напряжений:
 $H_p^\lambda(i)$ — функция передачи мощности источника излучения; $H_{t1}(\alpha_1)$ — передаточная функция волоконно-оптического тракта длиной l_1 и затуханием α_1 ; $H_e(U)$ — трансформационная функция оптического излучения ЭОК с приложенным импульсным напряжением (U); $H_{t2}(\alpha_2)$ — передаточная функция волоконно-оптического тракта длиной l_2 и затуханием α_2 ; $H_i(s, G_m)$ — преобразующая функция ФПУ оптического излучения в электрические сигналы

Передаточная функция тракта $H_{11}(\alpha_1)$ определяется эмпирической формулой [3]

$$H_{11}(\alpha_1) = P_1^2 - 1/l_1 \exp(-\alpha_1 l_1), \quad (2)$$

где $P_1^2 = (N_1 A_1)^2$ — мощность оптического излучения, введенная в волоконный тракт и пропорциональная квадрату его числовой апертуры; $1/l_1 \exp(-\alpha_1 l_1)$ — удельные потери мощности оптического излучения за счет затухания α_1 в волоконном тракте длиной l_1 .

Трансформационная функция $H_e(U)$ в случае прохождения излучения вдоль оптической оси одноосного электрооптического кристалла (ЭОК) при продольном ЭОЭ описывает его пропускание в зависимости от приложенного импульсного напряжения U и определяется по формуле [4]

$$H_e(U) = \sin^2[(\pi/\lambda)n_0^3 r_{ijk} U L_k + \pi/4], \quad (3)$$

где n_0 — обыкновенный показатель преломления; r_{ijk} — компонента тензора третьего ранга линейного ЭОЭ; L_k — эффективная длина кристалла для оптического луча; $\pi/4$ — фазовый сдвиг пластинки $\lambda/4$. Фазовый множитель определяется членом $\theta = (\pi/\lambda)n_0^3 r_{ijk} U L_k$.

Передаточная функция тракта $H_{12}(\alpha_2)$ описывается соотношением

$$H_{12}(\alpha_2) = P_2^2 - 1/l_2 \exp[\alpha_2 l_2 + 3(\delta f/B_f)^2], \quad (4)$$

где $P_2^2 = (N_2 A_2)^2$ — мощность промодулированного ЭОК оптического излучения, введенная в тракт и пропорциональная квадрату его числовой апертуры.

В случае использования в качестве тракта оптического волокна второй член формулы (4) описывает потери мощности за счет затухания α_2 в волокне длиной l_2 с учетом ширины полосы частот δf промодулированного ЭОК оптического излучения и параметра широкополосности многомодового оптического волокна B_f .

На рис. 2 приведена зависимость суммарных потерь α в трактах от δf и длины $l = l_1 + l_2$.

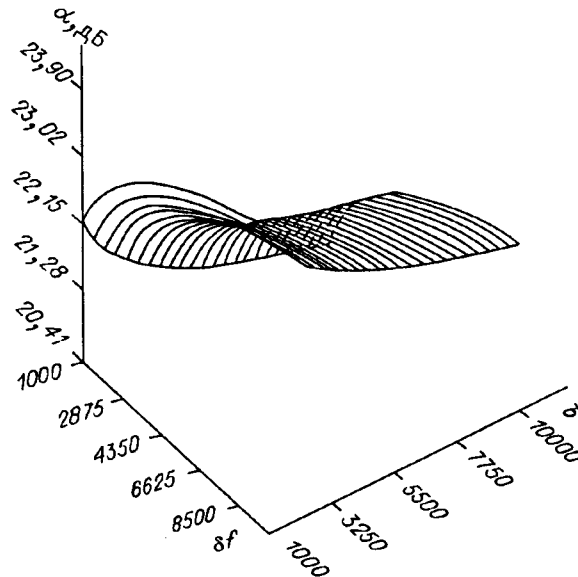


Рис. 2. Зависимость суммарных потерь α в обоих трактах от длины $l = l_1 + l_2$ и ширины полосы сигнала δf импульсного напряжения

Трансформационная функция $H_i(s, G_m)$ определяет выражение для минимальной оптической регистрируемой мощности (P_0), которая может восприниматься фотоприемным устройством (ФПУ), содержащим предварительный усилитель [5]:

$$H_i(s, G_m) = (2e\rho^2 F \delta f) / sm^2 + \rho / (sm) \{ (4e^2 \rho^2 F^2 (\delta f)^2 / m^2) + 2\delta f / M^2 [2e(i_c + M^2 F + i_c + i_f + i_z) + 4kT / R_1 + \pi^2 / 3 (4R_1 T C_1^2 (\delta f)^2 / G_m)] \}^{1/2}, \quad (5)$$

где e — заряд электрона; s — крутизна вольт-амперной характеристики применяемого в ФПУ фотодиода; m — коэффициент глубины модуляции оптического излучения; G_m — коэффициент усиления предварительного усилителя ФПУ; F — избыточный коэффициент шума (для фотодиода равен 1); M — коэффициент лавинного усиления (для фотодиода равен 1); R_1 — приведенное входное сопротивление ФПУ; C_1 — приведенная входная емкость ФПУ; i_c — темновой ток; i_f — фототок фона; i_c — фототок объекта; i_z — ток затвора транзистора предварительного усилителя ФПУ; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; ρ — соотношение сигнал/шум.

На рис. 3 приведена диаграмма зависимости (P_0) от глубины модуляции m и ширины полосы частот измеряемого сигнала δf . Для ФПУ прямого усиления при амплитудной модуляции непрерывного оптического излучения соотношение сигнал/шум ρ определяется по формуле [5]

$$\rho = (1/2m^2 i_c M^2 R_1) / [2e(\delta f)^2 F M^2 R_1 (i_c + i_f + i_z) + kT(\delta f)]. \quad (6)$$

На рис. 4 приведена диаграмма зависимости ρ от глубины модуляции m и ширины полосы частот δf для данной модели измерителя.

Принципиальным отличием критерия выбора нелинейного кристалла является незначительность размера тензора третьего ранга r_{ijk} в отличие от электрооптических модуляторов, где необходимо добиться максимального значения данного тензора.

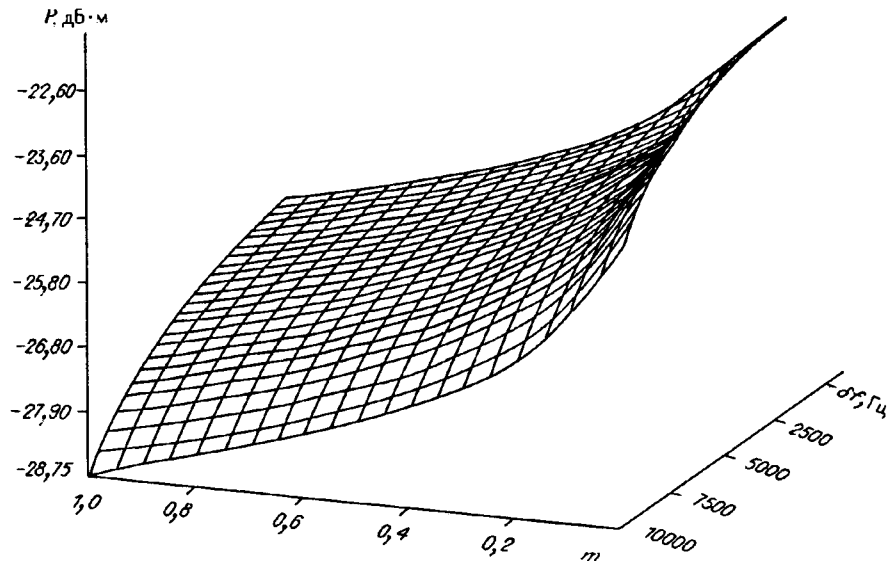


Рис. 3. Зависимость минимальной принимаемой оптической мощности (P_0) от глубины модуляции m и ширины полосы сигнала импульсного напряжения

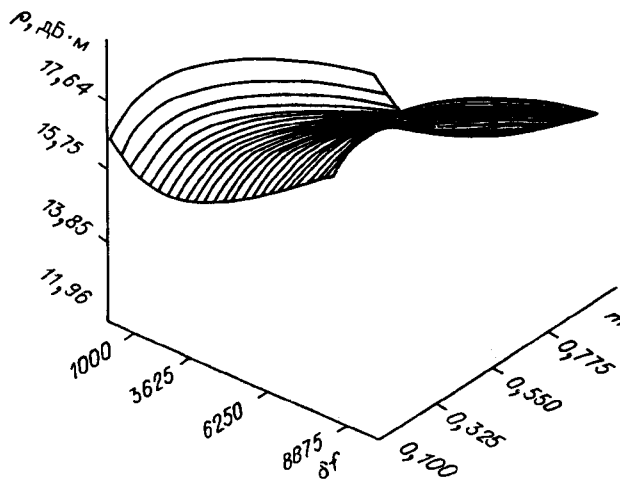


Рис. 4. Зависимость соотношения сигнал/шум ρ от глубины модуляции m и ширины полосы сигнала Δf импульсного напряжения

Важнейшим параметром рассматриваемой модели измерителя является точность измерения амплитуды сигнала. Теоретическая точность этого измерения определяется по формуле

$$\tau = 1/\rho, \quad (7)$$

где ρ — соотношение сигнал/шум.

Учитывая изложенные соображения по точности измерения и исходя из известных требований к компонентам и узлам измерителя, можно оценить работу математической модели измерителя в целом. С помощью формулы (5) при заданных значениях δU и δf определяется минимальная регистрируемая с помощью ФПУ оптическая мощность P_0 . Если известна оптическая мощность источника излучения P_i , то разность $P_i - P_0$ представляет собой допустимые потери, включая потери на отражение от торцов, рассеяние, расфокусирование и т. д. Оптимальный режим модуляции ЭОК оптического излучения реализуется при 50 %-ном пропускании, поэтому величину $P_i - P_0$ необходимо использовать с коэффициентом 0,5. Формула для расчета рабочей длины тракта передачи сигнала измеряемого напряжения U имеет вид

$$L_s = 1/2\{[0,5(P_i - P_0) - P_v]/\alpha\}, \quad (8)$$

где P_v — оптические потери отражения, рассеивания, расфокусирования, потери ввода и вывода излучения в (из) волокно и т. д.; $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ — общее затухание в оптическом волокне в трактах l_1 и l_2 .

Таким образом, возможно при заданных параметрах ЭОК, оптического волокна и ФПУ рассчитать необходимые рабочие параметры измерителя импульсных напряжений.

ВЫВОДЫ

Создана математическая модель измерителя высоковольтных импульсных напряжений, работающего на основе ацентричного кристалла, обладающего линейным электрооптическим эффектом.

Разработана методика расчета и оптимизации параметров узлов измерителя при заданных напряжениях и полосе частот. Решена задача нахождения пределов измеряемых параметров по известным характеристикам электрооптического кристалла, приемного и передающего узлов, а также тракта передачи сигналов.

Показано принципиальное отличие выбора ацентричных электрооптических кристаллов для целей измерения с малым значением электрооптического коэффициента по сравнению с электрооптическими модуляторами. Проанализировано влияние параметров электрооптического кристалла на точность измерения амплитуды импульсных напряжений. Показана возможность получения максимальной точности измерения с помощью оптимизации параметров модулирующего узла измерителя на электрооптическом кристалле.

Получена формула для расчета максимальной длины тракта передачи измеряемого высокого напряжения при заданных измеряемых параметрах и известных характеристиках электрооптического кристалла, приемного и передающего узлов и тракта передачи сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хебнер Р. В., Малевский Р. А., Кессиди Э. С. Оптические измерения электрических параметров при высоковольтных напряжениях // ТИИЭР. 1977. 65, № 11.
2. Справочник по лазерам. М.: Сов. радио, 1978.
3. Вайнберг В. Б., Саттаров Д. К. Оптика световодов. Л.: Машиностроение, 1969.
4. Сонин А. С., Василевская А. С. Электрооптические кристаллы. М.: Атомиздат, 1971.
5. Personick S. D. Receiver design for digital fiberoptic communication systems // Bell Syst. Tech. J. 1973. 52, N 6. P. 843.

Поступила в редакцию 10 июня 1994 г.

Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!