

УДК 536.521.082.52

А. А. БУКАРЕВ, В. А. ЛЕСНОЙ, А. П. КИСЛИЦЫН

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

МОДУЛЯТОР СВЕТОВОГО ПОТОКА С ИЗВЕСТНОЙ ФОРМОЙ ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА

В статье описан разработанный и опробованный модулятор светового потока (МСП), предназначенный для выявления и изучения динамических искажений оптико-электронных устройств (ОЭУ). Механический принцип модуляции позволяет гарантированно сохранять форму оптического сигнала при изменении скорости нарастания оптического сигнала. МСП позволяет регулировать интенсивность и длину волны излучения, изменять длительность нарастания и спада оптического сигнала ($\tau_{\text{фронта}} = 8,73 \div 54,8$ мкс и $\tau_{\text{среза}} = 10,5 \div 65,7$ мкс). В результате опробования МСП были зарегистрированы динамические искажения ОЭУ на базе фотоэлектронного умножителя.

Ключевые слова: модулятор светового потока, динамические искажения, оптико-электронное устройство.

Введение

В современной науке и технологиях физико-технической обработки всё чаще приходится сталкиваться с процессами, протекающими в течение коротких промежутков времени (менее 10 мкс). Во многих случаях технологические процессы сопровождаются оптическим излучением, которое может быть использовано для контроля за их протеканием. К таким процессам можно отнести импульсное воздействие ионными пучками на поверхность [1], детонационное нанесение порошковых покрытий [2 - 4], отбор эмиссионных токов высокой плотности [5] и др.

Оптическое излучение, обусловленное протекающими в системе физическими процессами, несёт большой объём информации о них. Известны способы регистрации формы оптического сигнала, в частности в [6] описан способ, который использовался при исследовании излучения импульсных лазеров (длительность импульса до 1,8 пс), а в [7, 8] устройства для регистрации изменений температуры поверхности тела по тепловому излучению с временным разрешением 1 мкс. При этом, для изучения процессов, принципиально важным оказывается определение истинной формы оптического сигнала $\Phi(t)$.

В приведенных случаях [6, 7] фотоэлектрическим приёмником оптического излучения является фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), который традиционно считается почти безинерционным устройством. Однако уже в [9] упоминается о наличии динамических искажений в оптико-электронных устройствах (ОЭУ), в результате чего появляется

отличие формы электрического сигнала по отношению к форме регистрируемого светового импульса.

Такие искажения ОЭУ могут быть обусловлены физическими процессами как при преобразовании оптического сигнала в электрический, так и в электронной системе последующего усиления электрического сигнала [10].

1. Постановка задачи

В открытой печати отсутствует информация об экспериментальных измерениях динамических искажений используемых ОЭУ, что не позволяет говорить о степени соответствия полученного электрического сигнала исходному оптическому. Информация о таких искажениях оказывается принципиально важной при изучении быстропротекающих процессов с регистрацией оптического сигнала ОЭУ.

Для установления такого соответствия между сигналами необходим источник оптического излучения с известной формой импульса, что позволит чётко определить степень несоответствия исходного оптического и полученного электрического сигналов, характер и уровень динамического искажения, вносимого физическим измерительным устройством.

Целью работы является разработка источника светового потока с известной формой сигнала и регулируемой скоростью его изменения во времени.

2. Результаты

При описании динамических искажений оптико-электронных устройств в рамках теоретических представлений используют переходную характери-

стику $S_{\Pi}(t)$, получаемую воздействием на приёмную часть ОЭУ потоком излучения в виде функции Хевисайда. В этом случае переходная характеристика может быть записана в виде [9]:

$$S_{\Pi}(t) = S_0 \left(1 - e^{-t/t_p}\right), \quad (1)$$

где S_0 – максимальное значение $S_{\Pi}(t)$;

t_p – время релаксации ОЭУ, определяемое приёмником излучения и электронной системой питания приёмника.

Технически реализовать воздействие в виде функции Хевисайда для экспериментального определения t_p невозможно. Поэтому реальный стандартный оптический сигнал должен иметь простую форму, которая позволит достаточно просто экспериментально выявить динамические искажения оптико-электронных преобразователей, получить реальную переходную характеристику ОЭУ и значения t_p для исследования ОЭУ.

3. Выбор схемы источника оптических импульсов

В соответствии с проведенным анализом, разрабатываемый источник оптических сигналов должен удовлетворять следующим требованиям:

1) форма сигнала должна быть удобной для анализа переходных процессов в ОЭУ, а именно трапецеидальной [11] (рис. 1);

2) длительность оптического сигнала τ должна быть регулируемой;

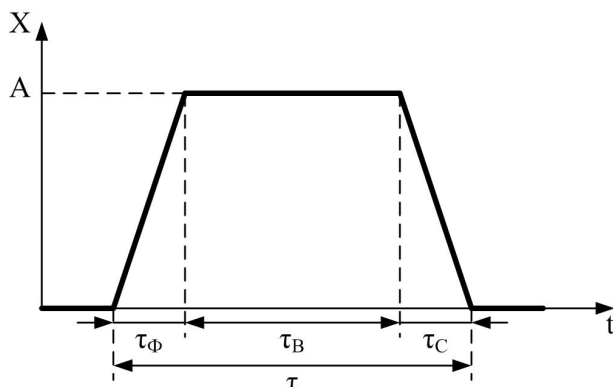


Рис. 1. Оптический трапецеидальный импульс:
 A – амплитуда импульса, τ_f – длительность фронта, τ_v – длительность вершины, τ_c – длительность среза, τ – полная длительность импульса

3) форма оптического сигнала должна сохраняться, т.е. характерные времена импульса ($\tau_f:\tau_v:\tau_c$) должны изменяться пропорционально при изменении длительности импульса τ ;

4) должна обеспечиваться возможность изменения длины волны (длин волн) оптического излучения;

5) интенсивность оптического излучения должна быть регулируемой.

На сегодняшний день существуют различные виды генераторов оптического сигнала: механические, акустооптические и электрооптические.

Акустооптические модуляторы основаны на изменении показателя преломления прозрачного материала при воздействии на него бегущей ультразвуковой волны. Особенность такого модулятора состоит в том, что для исключения наложения дифракционных картин, обеспечивающих модуляцию оптического сигнала, падающее излучение должно быть монохромным. Быстродействие таких модуляторов составляет от десятков нс и до 10 мс, максимальный диаметр оптического пятна составляет единицы мм, а на оптическом сигнале отсутствует вершина, необходимая для определения t_p .

Электрооптические модуляторы, основным элементом которых является ячейка Погкельса или ячейка Керра, используют явление двулучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля к этим ячейкам. Такие модуляторы обеспечивают скорость переключения порядка 10^{-10} с. Однако неизвестен закон изменения оптического сигнала на фронте и срезе.

Таким образом, в описанных модуляторах стабильность формы оптического сигнала (линейность фронта и среза) не гарантирована, в то время как для однозначного определения динамических искажений необходимым условием является точное сохранение формы оптического сигнала. Только при сохранении формы оптического сигнала можно количественно характеризовать искажения, вносимые оптико-электронным преобразователем.

В качестве модулятора оптического сигнала известной формы нами был выбран механический модулятор, который позволяет формировать оптические сигналы трапецевидной формы.

4. Схема оптического модулятора

На рис. 2 изображена функциональная схема модулятора светового потока, который состоит из источника излучения, диска с отверстием, неподвижной щели и двигателя с регулируемой скоростью вращения диска.

Неподвижная щель расположена на оптической оси за диском и имеет размер меньший, чем отверстие в диске. Отверстие в движущемся диске и неподвижная щель образуют изменяемую диафрагму.

Регулируемая скорость вращения диска обеспечивает изменение длительности оптического сигнала τ .

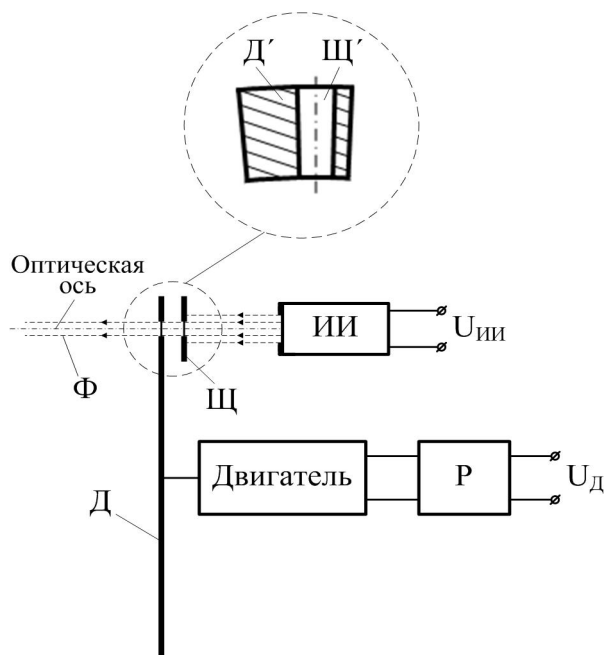


Рис. 2. Функциональная схема модулятора светового потока: Д – диск с отверстиями, Д' – отверстие в диске (вид с боку), Щ – неподвижная щель, Щ' – неподвижная щель (вид с боку), Р – регулятор скорости вращения двигателя, ИИ – источник излучения, Ф – поток оптического излучения

Перед щелью на оптической оси установлен источник излучения (ИИ), который обеспечивает

равномерную и неизменяемую во времени плотность потока оптического излучения по всей площади щели. В качестве ИИ используется источник непрерывного или монохроматического оптического излучения, в котором предусмотрена регулировка интенсивности светового потока.

Фронт оптического импульса формируется при раскрытии диафрагмы, изготовленной так, что площадь открытой части пропорциональна углу поворота. Это приводит к тому, что при равномерном вращении диска фронт оптического импульса оказывается линейным (интенсивность оптического сигнала, прошедшего через диафрагму, пропорциональна времени).

Вершина оптического импульса имеет место при полном раскрытии диафрагмы.

Срез оптического сигнала формируется в момент закрытия диафрагмы. Как и при раскрытии, убывь площади раскрытия S_{Π} осуществляется по линейному закону при равномерном вращении диска.

Для сопоставления и качественного анализа динамических искажений экспериментальную информацию удобнее представлять не в виде зависимости сигнала от времени, а в виде зависимости фазы (степени) раскрытия диафрагмы.

На рис. 3 представлены четыре фазы вращения диска: момент раскрытия диафрагмы (формирование фронта) и момент полного открытия диафрагмы (начало формирования вершины).

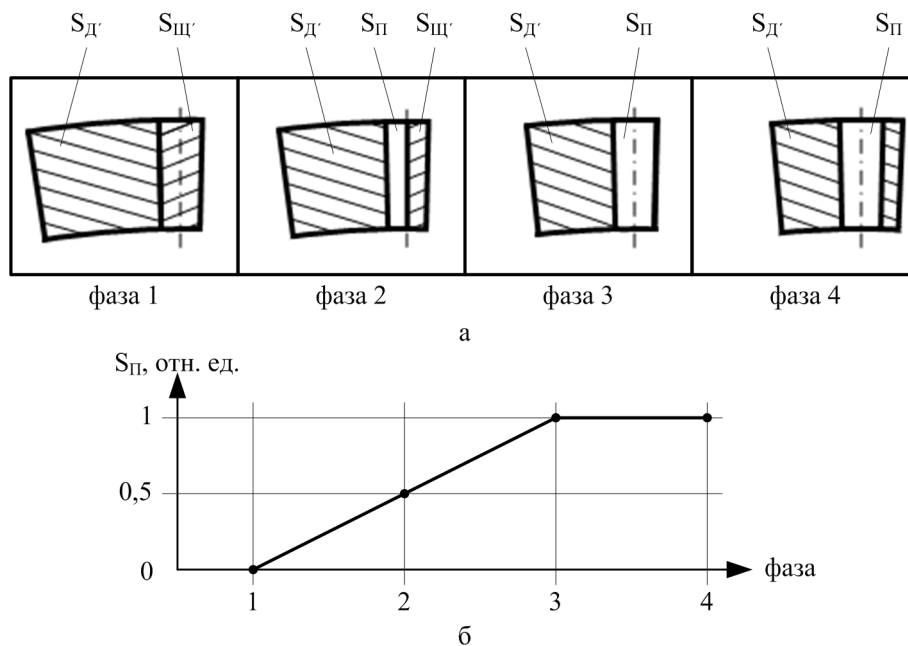


Рис. 3. Формирование фронта и начало вершины оптического сигнала трапецевидной формы: а – демонстрация пересечения неподвижной щели и отверстия в диске (фазы 1, 2 – процесс раскрытия диафрагмы; фазы 3, 4 – процесс полного открытия диафрагмы); б – зависимость площади пересечения от фазы поворота диска

В первой фазе площадь $S_{Щ}$ (площадь отверстия щели) не пересекается с площадью $S_{Д}$ и площадь пересечения $S_{П} = 0$.

По мере раскрытия диафрагмы сигнал $S_{П}$ начинает увеличиваться. Фаза 2 (рис. 3, а) показывает момент времени, когда диафрагма раскрыта на половину ($0,5S_{П}$). В фазе 3 $S_{П}$ становится максимальной и равняется $S_{Щ}$. При условии, что $Щ$ неподвижна, а плотность потока оптического излучения распределена равномерно по $S_{Щ}$, тогда площадь пересечения $S_{П}$ будет тождественно равной потоку оптического излучения Φ .

В этом анализе не учитывались дифракционные явления, возникающие в момент раскрытия и закрытия диафрагмы.

5. Тестирование устройства: квазистатическое определение формы оптического сигнала

Определение реальной формы оптического сигнала, создаваемого оптическим модулятором, осуществлялось в режиме пропорционального усиления приёмника излучения ФЭУ с резистивным делителем напряжения, при контролируемом медленном изменении угла раскрытия диафрагмы (квазистатический режим работы ФЭУ). В этом случае было гарантировано отсутствие динамических искажений в ОЭУ, регистрируемый электрический сигнал является неискажённым, и его форма соответствует истинному оптическому сигналу.

На рис. 4 приведены изображения предполагаемого 1 и реально обеспечиваемого устройством оп-

тического сигнала 2. Характерными участками несоответствия реальной формы с расчётной являются моменты раскрытия и закрытия диафрагмы, а также момент формирования вершины. Скорее всего, это связано с взаимно-неточным расположением краёв щели и отверстия при раскрытии и закрытии диафрагмы и дуг щели при формировании полки импульса.

6. Опробование макета

Опробование модулятора в динамическом режиме проводилось с тем же ФЭУ.

На рис. 5 приведен график зависимости сигнала S (падение напряжения на сопротивлении нагрузки ФЭУ) от угла раскрытия диафрагмы γ .

Сигнал 1 – квазистатический оптический сигнал реальной формы, который был приведен на рис. 4 (сигнал 2). Сигналы 2 и 3 получены в динамическом режиме работы модулятора с длительностью оптических импульсов τ во временной области $0,69 \cdot 10^{-3}$ с и $0,11 \cdot 10^{-3}$ с соответственно. При этом сигнал 2 имеет следующие времена фронта и среза: $\tau_{Ф2} = 54,8$ мкс и $\tau_{С2} = 65,7$ мкс, а сигнал 3 соответственно: $\tau_{Ф3} = 8,73$ мкс и $\tau_{С3} = 10,5$ мкс.

Из полученного результата можно сказать, что сигнал 2 ($\tau = 0,69 \cdot 10^{-3}$ с) на фронте и срезе почти совпадает с квазистатическим: некоторые искажения наблюдаются только на переднем фронте и на участке окончания оптического импульса. А сигнал 3 имеет характерные искажения, проявляющиеся в затягивании фронта и среза регистрируемого электрического сигнала по отношению к квазистатическому оптическому сигналу.

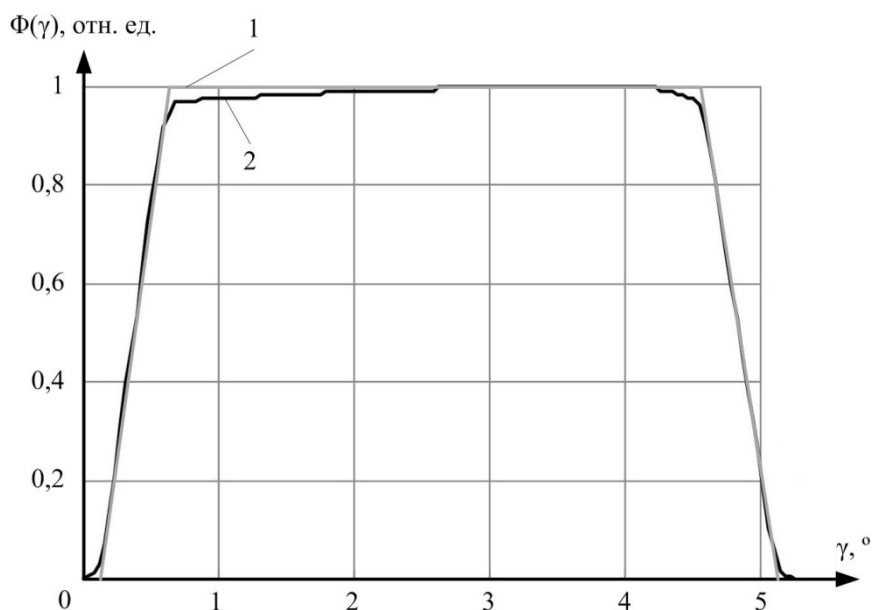


Рис. 4. Сравнение формы квазистатического оптического сигнала (2) с расчётной формой сигнала (1)

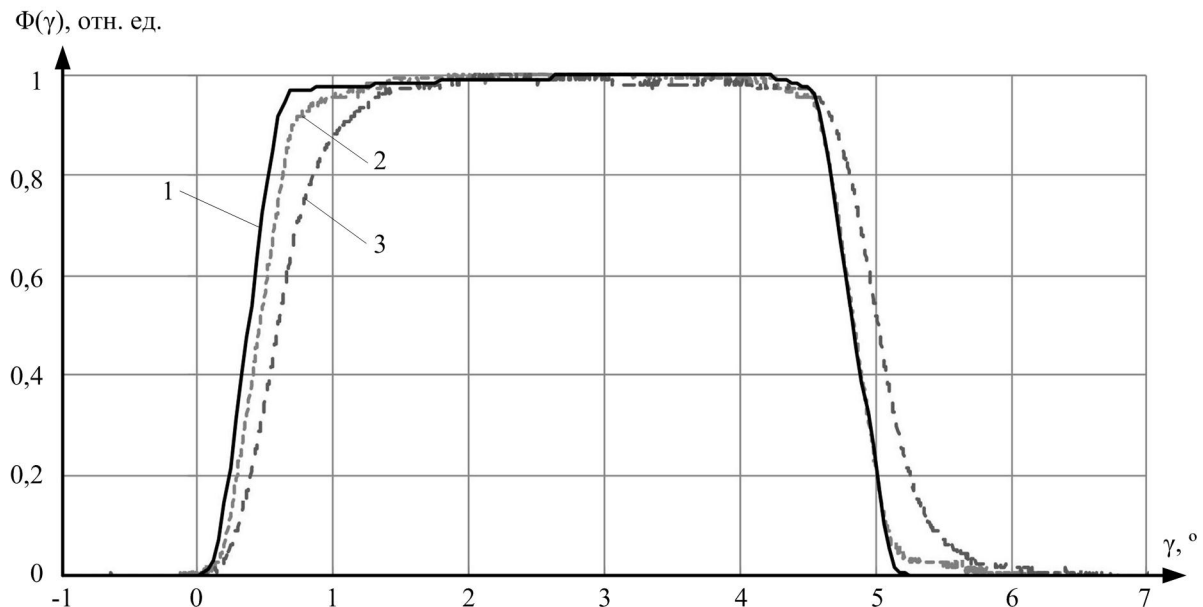


Рис. 5. Результат роботи оптичного модулятора в динамічному режимі:

1 – форма квазістатистичного оптичного сигналу, 2 і 3 – сигнали, отримані в динамічному режимі роботи модулятора з довжиною оптичного імпульсу τ $0,69 \cdot 10^{-3}$ с і $0,11 \cdot 10^{-3}$ с відповідно

Из этого следует, что созданный модулятор светового потока с известной формой оптического импульса позволяет обнаруживать динамические искажения в ОЭУ.

Выводы

Создан модулятор светового потока, позволяющий регулировать длительность оптического импульса τ без искажения формы оптического сигнала в диапазоне: от $0,69 \cdot 10^{-3}$ с до $0,11 \cdot 10^{-3}$ с. Для указанного диапазона длительность фронта и среза соответственно равны: $\tau_{\text{ф}} = 54,8$ мкс и $\tau_{\text{с}} = 65,7$ мкс – для $0,69 \cdot 10^{-3}$ с; $\tau_{\text{ф}} = 8,73$ мкс и $\tau_{\text{с}} = 10,5$ мкс – для $0,11 \cdot 10^{-3}$ с. Устройство позволяет изменять интенсивность излучения и устанавливать необходимую длину волны.

По результату работы устройства в квазістатистическом и динамическом режимах можно утверждать, что данный модулятор светового потока может использоваться для изучения динамических искажений оптико-электронных устройств.

Литература

1. Ремнев, Г. Е. Модификация материалов с использованием мощных ионных пучков [Текст] / Г. Е. Ремнев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2000. – Т. 303, вып. 3. – С. 59–70.

2. Опыт исследования и применения технологии нанесения детонационных покрытий [Текст] / В. Ю. Ульяницкий, М. В. Ненашев, В. В. Калашиников

[и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, 2010. – Т. 12, № 1(2) – С. 569–575.

3. Matthews, S. Shrouded plasma spray of Ni-20Cr coatings utilizing internal shroud film cooling [Text] / S. Matthews // Surface & Coatings Technology. – 2014. – vol. 303, iss. 3. – pp. 56-74. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.03.050

4. Application of an Industrial Sensor Coating System on a Rolls-Royce Jet Engine for Temperature Detection [Text] / J. P. Feist, P. Y. Sollazzo, S. Berthier, B. Charnley, J. Wells // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2013. – vol. 135, no. 012101. – 9 p.

5. Кислицын, А. П. Распределение температуры в активном слое оксидного катода при непрерывном и импульсном токоотборах [Текст] / А. П. Кислицын, С. Ю. Подгорский, А. А. Таран // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3 (90). – С. 47–55.

6. Ахманов, С. А. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов [Текст] / С. А. Ахманов, В. А. Выслоух, А. С. Чиркин. – М.: Наука, 1988. – 312 с.

7. Пат. 10993 Республика Беларусь, МПК (2006) G 01J 5/10. Фотоэмиссионный пирометр для измерения температуры поверхности нагретого тела [Текст] / Белявин К. Е., Минько Д. В., Кузнецик О. О. и др.; Гос. науч. учрежд. «Институт порошковой металлургии»; Гос. науч. учрежд. «Институт физики имени Б. И. Степанова Нац. ак. наук Беларуси». – заявка № а 20050749 ; заявл. 21.07.2005 ; опубл. 30.08.2008. – 8 с. : ил.

8. Пат. 12525 Республика Беларусь, МПК (2006) G 01J 5/10, G 01N 23/22. Фотозмиссионное устройство для измерения температуры поверхности нагретого тела при быстропотекающих тепловых процессах [Текст] / Кузнецик О. О., Минько Д. В., Гафо Ю. Н. и др.; заявитель и патентообладатель Гос. науч. учрежд. «Институт порошковой металлургии». - заявка № а 20080382; заявл. 28.03.2008; опубл. 30.10.2009, Бюл. №5 (70). - 5 с.: ил.

9. Павлов, А. В. Оптико-электронные приборы (Основы теории и расчёта) [Текст] / А. В. Павлов. - М.: Энергия, 1974. - 360 с.

10. Пихтин, А. Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст]: учеб. для вузов / А. Н. Пихтин. - М.: Высш. шк., 2001. - 573 с.

11. ГОСТ 16465-70. Межгосударственный стандарт. Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения [Текст]. - Введ. 01.07.1971. - М.: Стандартиформ, 2001. - 16 с.

References

1. Remnev, G. E. Modifikatsiya materialov s ispol'zovaniem moshchnykh ionnykh puchkov [Materials modification using intense ion beams]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2000, vol. 303, iss. 3, pp. 59–70.

2. Ul'yanitskii, V. Yu., Nenashev, M. V., Kalashnikov, V. V., Ibatullin, I. D., Ganigin, S. Yu., Yakunin, K. P., Rogozhin, P. V., Shtertser, A. A. Opyt issledovaniya i primeneniya tekhnologii naneseniya detonatsionnykh pokrytii [Experience of research and application of detonation coatings technology]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN – Tidings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 12, no. 1(2), pp. 569–575.

3. Matthews, S. Shrouded plasma spray of Ni-20Cr coatings utilizing internal shroud film cooling. *Surface & Coatings Technology*, 2014, vol. 303, iss. 3, pp. 56–74. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.03.050.

4. Feist, J. P., Sollazzo, P. Y., Berthier, S., Charnley, B., Wells, J., Application of an Industrial Sensor Coating System on a Rolls-Royce Jet Engine for Temperature Detection. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, vol. 135, no. 012101. 9 p. doi: 10.1115/1.4007370.

5. Kislitsyn, A. P., Podgorskii, S. Yu., Taran, A. A. Raspreделение temperatury v aktivnom sloe oksidnogo katoda pri nepreryvnom i impul'snom tokootborakh [Temperature distribution in the active layer of the oxide cathode during continuous and pulsed current sampling]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya – Aerospace Engineering and Technology*, 2012, no. 3 (90), pp. 47–55.

6. Akhmanov, S. A., Vysloukh, V. A., Chirkin, A. S. *Optika femtosekundnykh lazernykh impul'sov* [Optics of Femtosecond Laser Pulses]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 312 p.

7. Belyavin K. E., Min'ko D. V., Kuznechik O. O., Kasparov K. N., Krasnobaev A. B. *Fotoemissionnyi pirometr dlya izmereniya temperatury poverkhnosti nagretogo tela* [Photoemission pyrometer for measuring the surface temperature of a heated body]. Patent RB, no. 10993, 2008. 8 p.

8. Kuznechik O. O., Min'ko D. V., Gafo Yu. N., Golyakov M. V., Belyavin K. E. *Fotoemissionnoe ustroistvo dlya izmereniya temperatury poverkhnosti nagretogo tela pri bystroprotekayushchikh teplovykh protsessakh* [Photoemission device for measuring the surface temperature of a heated body with fast thermal processes]. Patent RB, no. 12525, 2009. 5 p.

9. Pavlov, A. V. *Optiko-elektronnye pribory (Osnovy teorii i rascheta)* [Optoelectronic devices (Fundamentals of Theory and Calculation)]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 360 p.

10. Pikhin, A. N. *Opticheskaya i kvantovaya elektronika: Ucheb. dlya vuzov* [Optical and Quantum Electronics]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2001. 573 p.

11. GOST 16465-70. *Mezhgosudarstvennyi standart. Signaly radotekhnicheskije izmeritel'nye. Terminy i opredeleniya* [Interstate standard. Radio-technical measuring signals. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2001. 16 p.

Поступила в редакцію 27.10.2017, рассмотрена на редколлегии 22.11.2017

МОДУЛЯТОР СВІТЛОВОГО ПОТОКУ З ВІДОМОЮ ФОРМОЮ ОПТИЧНОГО ІМПУЛЬСУ

А. О. Букарєв, В. О. Лесной, О. П. Кислицин

У статті описано розроблений та випробуваний модулятор світлового потоку (МСП), призначений для виявлення та вивчення динамічних спотворень оптико-електронних пристроїв (ОЕП). Механічний принцип модуляції дозволяє гарантовано зберігати форму оптичного сигналу при регульованих зміненнях швидкості наростання оптичного сигналу. МСП дозволяє регулювати інтенсивність та довжину хвилі випромінювання, змінювати час наростання та спаду оптичного сигналу ($\tau_{\text{фронт}} = 8,73 \div 54,8$ мкс і $\tau_{\text{зріз}} = 10,5 \div 65,7$ мкс). Під

час випробування МСП було зареєстровано динамічні спотворення ОЕП на базі фотоелектронного помножувача.

Ключові слова: модулятор світлового потоку, динамічні спотворення, оптико-електронний пристрій.

LUMINOUS FLUX MODULATOR WITH KNOWN OPTICAL PULSE SHAPE

A. O. Bukariev, V. O. Liesnoi, O. P. Kyslytsyn

The article describes the developed and tested luminous flux modulator (LFM). LFM is designed to identify and study the dynamic distortions of optoelectronic devices (OED) with high temporal resolution. Such OED are capable to register optical radiation at fast processes (for example: pulse action of ionic beams, laser influence, electric discharges).

The basis of the LFM's work is the mechanical principle of modulation, which makes it possible to preserve the shape of the optical signal with controlled changes in the duration of the optical signal. In addition, the applied LFM scheme allows a change in the spectral composition of optical radiation

In the implemented device, the optical signal has a trapezoidal shape, which makes it possible to determine quite simply the quantities that characterize the dynamic distortions of the OED (transient response, relaxation time, etc.).

The modulator allows you to adjust the duration of trapezoidal optical pulses in the range from 0.69 ms (t_1) to 0.11 ms (t_2). In this case, the duration of the front and the cut are, respectively, $\tau_{F1} = 54.8 \mu\text{s}$ and $\tau_{C1} = 65.7 \mu\text{s}$ for t_1 ; $\tau_{F2} = 8.73 \mu\text{s}$ and $\tau_{C2} = 10.5 \mu\text{s}$ for t_2 .

The LFM was tested using OED based on a photoelectric multiplier (PMT), which, as is known, is considered to be a high-speed optical receiver. The experiment was carried out in two modes of operation of the power amplifier: in quasi-static and in dynamic modes. In quasi-static mode, with a controllably longer duration of the optical pulse ($\gg 1$ s) and no dynamics of the process, the true form of the optical signal was obtained. In the dynamic mode, a signal was recorded whose shape is distorted with respect to the quasi-static signal, which indicates the presence of dynamic distortions.

The received result testifies to the efficiency of the luminous flux modulator, allows to register and study the dynamic distortions of optoelectronic devices.

Keywords: luminous flux modulator, dynamic distortion, optoelectronic devices.

Букарев Антон Александрович – аспирант кафедры физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: anton.bukariev@gmail.com.

Лесной Виктор Александрович – аспирант кафедры физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: v.liesnoi@khai.edu.

Кислицын Александр Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры физики, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Bukariev Anton Oleksandrovych – PhD student of the Department of Physics, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: anton.bukariev@gmail.com.

Liesnoi Viktor Oleksandrovych – PhD student of the Department of Physics, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: v.liesnoi@khai.edu.

Kyslytsyn Oleksandr Petrovych – PhD, Associate Professor of the Department of Physics, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine.