

УДК 621.324.8

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ
С АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ****В.В. Артемьев, Н.П. Белов, В.В. Коротаев, А.В. Смирнов, А.Д. Яськов**

Рассмотрен оригинальный подход к реализации инвариантного оптико-электронного измерителя скорости оптически неоднородных поверхностей. Выбранная процедура обработки сигналов в электронном тракте позволяет осуществить адаптивную коррекцию сигналов и исключить влияние флуктуационных помех на выходные характеристики измерительного устройства.

Ключевые слова: измеритель скорости, оптически неоднородные поверхности, помехоустойчивость, инвариантные характеристики.

Введение

Оптико-электронные измерители скорости (ОЭИС) перемещения оптически неоднородных поверхностей (случайных яркостных полей) [1], таких как бумажное полотно в процессе его отлива на сеточном столе бумагоделательной машины, поток руды на транспортной ленте, поверхность металлического проката в процессе его изготовления и т.п., нуждаются в специальном подходе при выборе схемы построения оптического тракта приема и электронного тракта преобразования сигналов.

Это объясняется тем, что реальные поверхности имеют различные коэффициенты отражения и поглощения световой энергии и разные размеры неоднородностей, которые характеризуются средним радиусом корреляции [1]. Поэтому электрические сигналы на выходе фотоприемного устройства будут иметь весьма сложный характер, где преобладают флуктуационные помехи, которые не позволяют обеспечивать требуемую точность измерения скорости.

Физическая модель преобразования сигналов в ОЭИС

Возникновение модулированного сигнала на выходе приемника оптического излучения ОЭИС оптически неоднородной поверхности можно представить физической моделью, показанной на рис. 1, а. Изображение контролируемой поверхности формируется объективом 1 в плоскости раstra (периодической решетки) 2. Модулированное растром 2 оптическое излучение с помощью конденсора 3 собирается в плоскости приемника оптического излучения 4, который преобразует оптические сигналы в электрические. После преобразования усилителем 5 электрические сигналы поступают в блок обработки 6.

При совмещении изображения участка поверхности с растром, выполненным в виде чередующихся прозрачных и непрозрачных полос равной ширины с периодом 2δ (рис. 1, б), и перемещении этого изображения перпендикулярно полосам раstra со скоростью V_x по растру одновременно перемещаются изображения множества неоднородностей различного контраста и размеров со случайным и независимым взаимным положением [2]. Полный световой поток за плоскостью раstra представляет собой сумму световых потоков от каждой отдельной неоднородности с одинаковой частотой модуляции и числом периодов, но с распределенной по случайному закону начальной фазой. Суммарным световым потоком, попадающим на фотоприемник, формируется электрический сигнал на нагрузке фотоприемника, имеющий полезную составляющую, определяемую по формуле

$$f = \frac{V_x}{2\delta} \sin \alpha, \quad (1)$$

где V_u – скорость движения изображения неоднородности в плоскости решетки, 2δ – период раstra, α – угол между вектором скорости и направлением полос раstra.

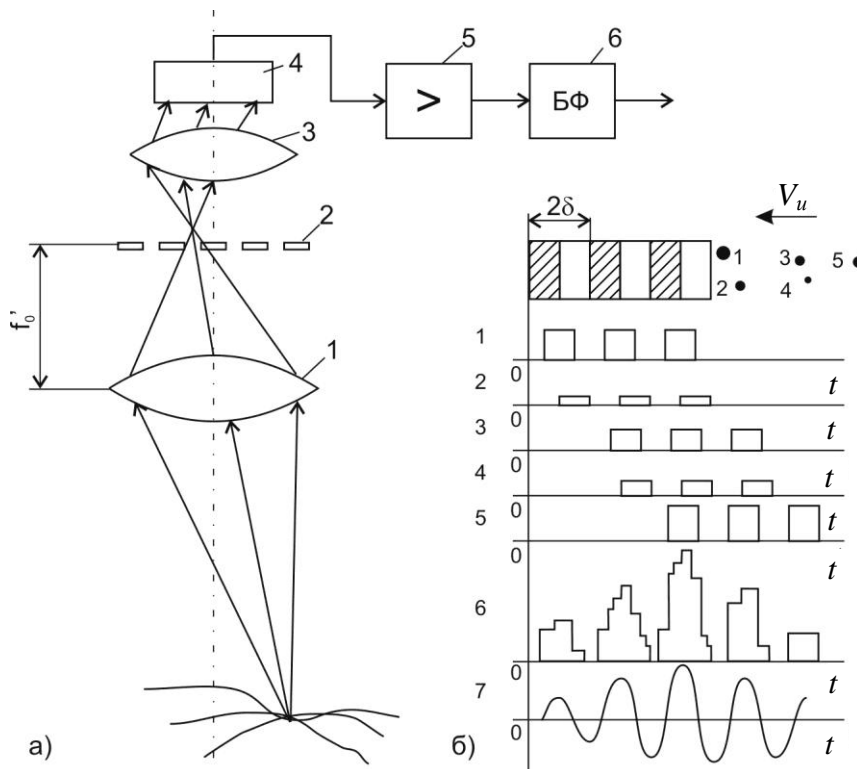


Рис. 1. Физическая модель преобразования сигналов в ОЗИС

Соотношение сигнал/шум на выходе фотоприемника будет зависеть не только от уровня освещенности наблюдаемого участка поверхности, но и от согласования размеров поля зрения объектива, пространственного периода раstra и радиуса пятна рассеяния объектива со средним радиусом корреляции неоднородностей [3].

К сожалению, при согласовании всех этих параметров возникают противоречия, разрешить которые с использованием только традиционных методов не удастся. Это в значительной степени ограничивает возможности получения высокой точности при данном способе измерений.

Одним из наиболее распространенных методов построения высокоточных измерительных устройств является метод инвариантности [4], в основу которого положен принцип многоканальности с использованием как минимум двух каналов приема и преобразования сигналов, построенных таким образом, чтобы суммирование сигналов приводило к компенсации помех. При этом информационные признаки сигналов не подвергаются изменениям. Однако наличие случайных помех хотя бы в одном из каналов может привести к разрушению информационных признаков сигнала.

Реализацию принципа инвариантности к случайным помехам, возникающим в тракте приема сигналов, следует искать в классе систем с инвариантными характеристиками помехоустойчивости, для реализации которых достаточна лишь минимальная информация о характеристиках сигнала и помех. В ряде случаев такая информация вообще не нужна [5]. Такой подход к построению тракта приема и преобразования сигналов можно назвать принципом адаптивной инвариантности.

Реализации принципа адаптивной инвариантности в ОЭИС

На рис. 2 представлена функциональная схема двухканального ОЭИС оптически неоднородных поверхностей. В основу этой схемы положен принцип инвариантности, который реализуется на основе использования двух каналов анализа изображения [4, 5]. Анализатор изображения такого измерителя выполнен в виде вращающегося периодического раstra с двумя дорожками, период расположения прозрачных и непрозрачных зон на которых отличается в два раза.

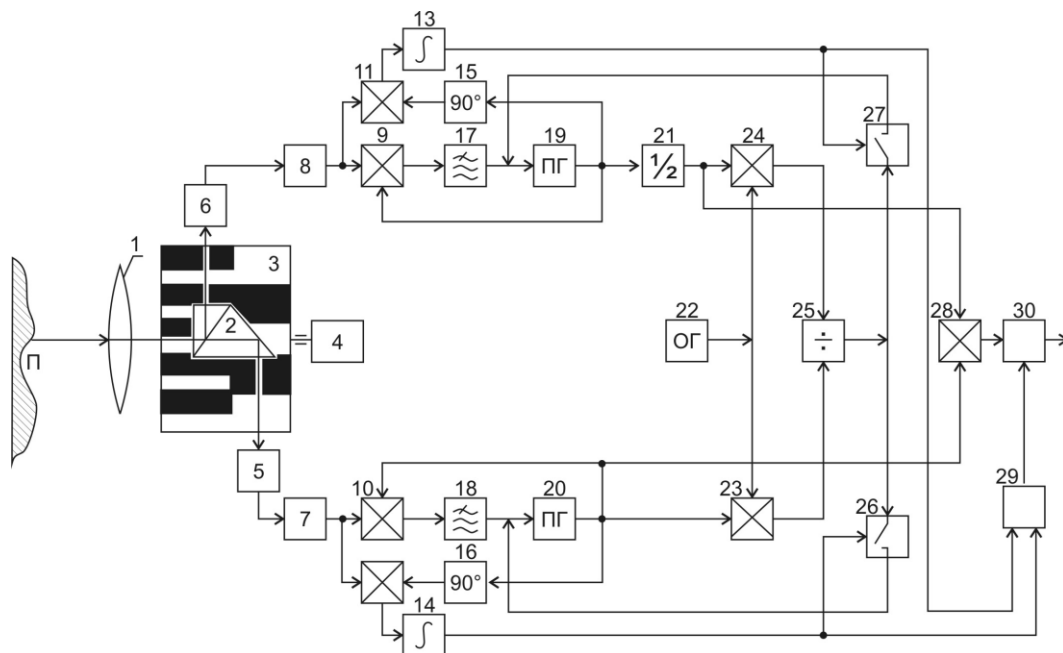


Рис. 2. Функциональная схема двухканального ОЭИС оптически неоднородных поверхностей

Периодический растр 3 приводится во вращения двигателем 4. Изображение поверхности П с помощью объектива 1 и светоделительного блока 2 формируется на диаметрально противоположных сторонах раstra на разных дорожках. Модулированные световые потоки поступают на приемники оптического излучения 5 и 6, а затем на усилители 7 и 8, снабженные полосовыми фильтрами. Электрические сигналы на выходе полосовых фильтров, полученные на экспериментальном макете, представлены на рис. 3. Характерной особенностью этих сигналов является тот факт, что их амплитуды подвержены резким колебаниям вплоть до полного исчезновения. Это связано с колебаниями соотношения между размером изображения неоднородности поверхности и шагом раstra с изменением освещенности поверхности и контраста неоднородности. Однако эти модулированные сигналы жестко синхронизированы по фазе относительно друг друга, что позволяет использовать их для компенсации начального изменения фазы в каждом из каналов электронного тракта обработки сигналов. После усиления и фильтрации электрические сигналы поступают в электронный тракт обработки сигналов. В состав этого тракта входят перемножители 9, 10, 11 и 12; интеграторы 13 и 14; фазовращающие цепочки 15 и 16; фильтры нижних частот 17 и 18; перестраиваемые генераторы 19 и 20; делитель на 2 частоты сигнала 21; опорный генератор 22; перемножители 23 и 24; устройство сравнения 25; переключающие устройства 26 и 27; устройство перемножения сигналов (вычитания частот) 28; блоки 29 и 30, обеспечивающие передачу информации в цепь управления, если сигнал присутствует хотя бы в одном из каналов.

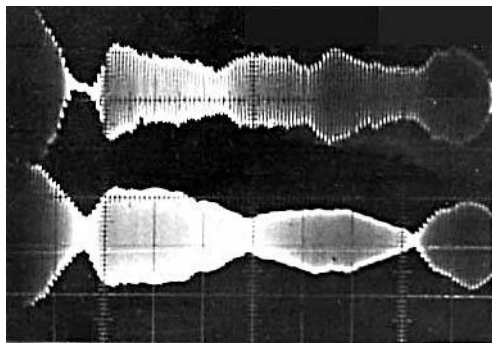


Рис. 3. Электрические сигналы на выходе полосовых фильтров

Рассмотрим характер изменения частот сигналов в каждом из каналов. При неподвижном изображении в плоскости раstra частота электрических сигналов на выходах приемников излучения определяется выражениями

$$f_{01} = \frac{V_p}{2\delta}, \quad (2)$$

$$f_{02} = \frac{V_p}{4\delta}, \quad (3)$$

где V_p – линейная скорость движения участка раstra, 2δ – пространственный период раstra первой дорожки, 4δ – пространственный период раstra второй дорожки. При движении изображения в плоскости раstra со скоростью V_u центральная частота электрического сигнала на выходе каждого из приемников излучения смещается на величину

$$\Delta f_1 = \frac{V_u}{2\delta}, \quad (4)$$

$$\Delta f_2 = \frac{V_u}{4\delta}. \quad (5)$$

Частоты электрических сигналов, формируемых на выходах приемников излучения каждого из каналов, будут изменяться в зависимости от направления движения

$$f_1 = f_{01} \pm \Delta f_1, \quad (6)$$

$$f_2 = f_{02} \pm \Delta f_2. \quad (7)$$

Подставив f_{01} , f_{02} , Δf_1 , Δf_2 в выражения (6) и (7), получим:

$$f_1 = \frac{V_p + V_u}{2\delta}, \quad (8)$$

$$f_2 = \frac{V_p - V_u}{4\delta}. \quad (9)$$

Анализ полученных выражений показывает, что частоты f_1 и f_2 определяются пространственным периодом 2δ и 4δ . Для удобства обработки сигналов в электронном тракте введено устройство деления частоты на 2 (обозначено на рис. 2 цифрой 21)

$$f_1/2 = \frac{V_p + V_u}{4\delta}. \quad (10)$$

Таким образом,

$$f_1/2 - f_2 = \frac{V_p + V_u}{4\delta} - \frac{V_p - V_u}{4\delta} = \frac{2V_u}{4\delta}. \quad (11)$$

За счет этого удается исключить скорость движения периодического раstra.

Блоки 9, 11 и 13 в одном канале и устройства 10, 12, 14 в другом осуществляют операцию обнаружения случаев пропадания сигналов на выходе фотоприемников 5, 6 соответственно. При обнаружении одновременного пропадания сигналов поступление сигналов в цепь индикации после блока 28 перекрывается устройством 31. При пропадании сигналов в одном из каналов блоки 25 или 26 по результатам сравнения информации блоком 24 направляют сигнал в цепь управления частотой перестраиваемого генератора 18 или 19. В этом случае при замирании сигнала в одном из каналов на выходе блока 27 имеется достоверная информация о скорости движения изображения.

Наличие двух каналов пространственно-частотной фильтрации сигналов в оптическом тракте обработки сигналов с разными параметрами периодического раstra позволяет расширить возможности для согласования размеров поля зрения оптической системы и радиуса пятна рассеяния со средним радиусом корреляции оптических неоднородностей и уменьшить вероятность одновременного замирания сигналов на выходе фотоприемников. Начальная фаза гармоник сигналов каждого из каналов в такой схеме изменяется одновременно, поэтому при совместной обработке сигналов блоком 28 эти изменения компенсируются, и появляется возможность обеспечить более высокие точности измерения на малых скоростях движения изображения поверхности.

На рис. 4 представлен экспериментальный стенд, на котором осуществлялись испытания макетного образца ОЭИС перемещения оптически неоднородной поверхности, реализованного на основе описанного в статье принципа построения оптического и электронного трактов выделения и преобразования сигналов. В качестве имитатора оптически неоднородной поверхности в экспериментальном стенде используется приводимый во вращение электродвигателем барабан, на поверхности которого закреплена бумажная лента с нанесенными на нее неоднородностями различных размеров и контраста. Поверхность ленты подсвечивается двумя лампами накаливания с регулируемой мощностью.



Рис. 4. Экспериментальный стенд

На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования ОЭИС в виде графической зависимости частоты сигнала на выходе системы от скорости пере-

мещения изображения оптически неоднородной поверхности в плоскости раstra. Прямая 1 получена путем расчета по формуле (11). Прямая 2 аппроксимирует результаты, полученные на экспериментальном стенде (показаны кружками) при реализации описанного в статье принципа построения оптического и электронного трактов выделения и преобразования сигналов и постоянной величине освещенности поверхности. Для сравнения здесь же представлена графическая зависимость (прямая 3, аппроксимирующая результаты измерений, обозначенные треугольниками), полученная на экспериментальном стенде для макетного образца ОЭИС, где каналы оптического тракта выделения сигналов имеют одинаковые размеры шага раstra [6]. Сравнение приведенных на рис. 5 графиков показывает, что экспериментальные данные исследования ОЭИС, описанной в статье, близки к расчетным и имеют меньшую дисперсию погрешности, чем данные, полученные для схемы, рассмотренной в [6].

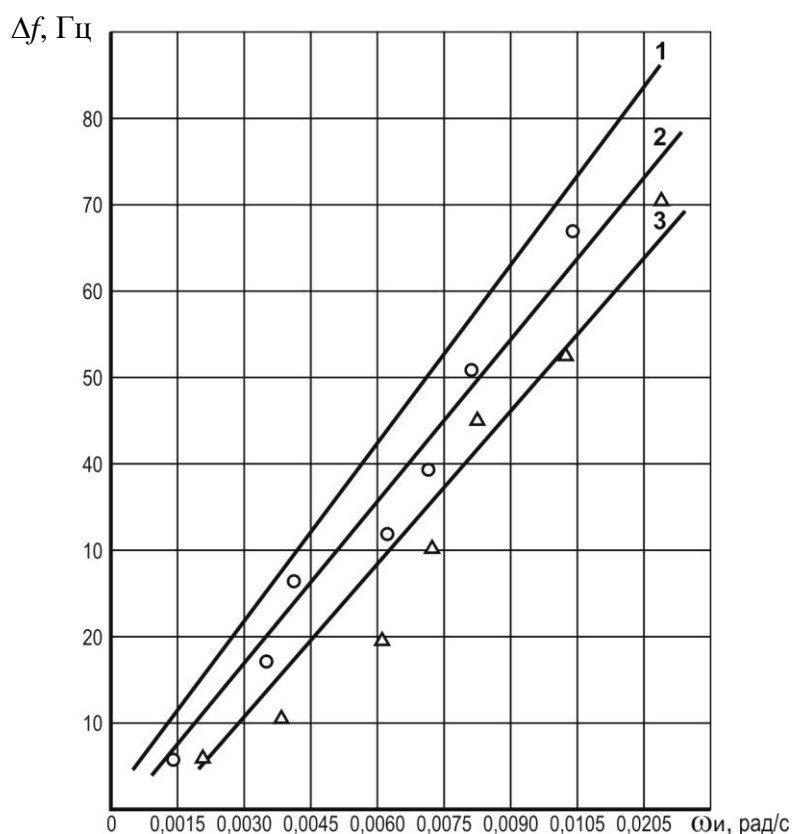


Рис. 5. Зависимость частоты сигнала на выходе системы от скорости перемещения изображения оптически неоднородной поверхности в плоскости раstra

Заключение

Выбранная двухканальная процедура обработки сигналов позволяет осуществить адаптивную коррекцию и уменьшить влияние флуктуационных помех, связанных с замиранием сигналов в одном из каналов, на выходные параметры измерительного устройства, за счет чего обеспечивается инвариантность к помехам, возникающим в оптическом тракте формирования сигналов.

Работа выполнялась в рамках ФНЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 г.г.)» и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России (2009–2013 г.г.)»

Литература

1. Левшин В.Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. – М.: Машиностроение, 1978. – 168 с.
2. Соломатин В.А., Шилин В.А. Фазовые оптико-электронные преобразователи. – М.: Машиностроение, 1986. – 145 с.
3. Порфирьев Л.Ф. Теория оптико-электронных приборов и систем. – Л.: Машиностроение, 1980. – 272 с.
4. Петров Б.Н. и др. Принцип инвариантности в измерительной технике. – М.: Наука, 1976. – 246 с.
5. Артемьев В.В., Демин А.В., Панков Э.Д. Об одном способе повышения точности оптико-электронных угломерных устройств // Оптико-электронные системы и приборы: Межвузовский сборник. – Новосибирск, 1980.
6. А.с. 1543347. Устройство для измерения скорости протяженного объекта / Артемьев В.В., Шехонин А.А., Юркова Г.Н. – опубл. 1990, бюл. № 6.

- Артемьев Василий Викторович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, technocon@mail.ru
- Белов Николай Павлович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, старший научный сотрудник, technocon@mail.ru
- Коротяев Валерий Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru
- Смирнов Андрей Васильевич* – ООО «Инженерный центр «Технокон», кандидат технических наук, заместитель генерального директора, technocon@mail.ru

другие. Концентрат красителей выпускают как в жидких формах, так и в виде порошка. Для приготовления красильных растворов применяют дистиллированную или деионизированную воду в пропорциях 1:10 [1, 2]. Для получения различных оттенков используется комбинация трех основных цветов – красного, синего и желтого. Однако сами красители уже состоят из комбинации до 17 различных пигментов [2]. Это позволяет получить до 188 оттенков.

Окрашивание полимерных линз производят в водных дисперсиях органических красителей при повышенной температуре (70–96 °С). В основе окрашивания лежит процесс диффузии красителя в поверхностный слой линзы с адсорбцией полярных групп красителя на активных центрах полимера. По химической классификации применяемые красители относятся к азо-, диазо- и антрахиноновым красителям. В состав красильных композиций входят также различные диспергаторы, смачиватели, активаторы для обеспечения однородности и интенсификации процесса окраски. Равномерная адсорбция молекул красителя в поверхностном слое линз обеспечивает одинаковую оптическую плотность по всему диаметру и позволяет получать равномерно окрашенные линзы высоких рефракций [1].

Судить о равномерности окрашивания линзы можно после определения глубины проникновения пигментов красителя в поверхностный слой материала очковой линзы. Указывается, что мельчайшие розовые пигменты впитываются за секунды, а для синих понадобится несколько минут [2], равномерность распределения пигментов контролируется на глаз. В литературе описываются результаты поверхностного окрашивания некоторых очковых линз и приводятся спектральные характеристики линз до и после поверхностного окрашивания. Однако в доступных литературных источниках не указаны свойства красителей, такие как спектральная характеристика, коэффициент поглощения, показатель преломления, а также характеристики изменения этих параметров при нагревании растворов. Эти данные позволят еще до проведения окрашивания судить о предполагаемых спектральных характеристиках окрашиваемых очковых линз.

Исследование спектральных свойств красителей и окрашенных линз

Исследование свойств красителей для поверхностного окрашивания полимерных линз включает определение спектральных характеристик красителей, используемых для окрашивания в одном из оптических салонов Санкт-Петербурга, определение показателей преломления и изучение влияния температуры нагрева раствора красителей на показатель преломления.

Для исследования спектральных характеристик и показателя преломления были использованы следующие дисперсные красители: желтый, розовый и серый изготовителя Brain Power Incorporated (BPI), зеленый, оранжевый и синий от Coburn Optical International Incorporated и порошковый краситель коричневого цвета от Phantom Research Laboratories Incorporated. Красители разводились в дистиллированной воде в пропорции 1:10, как указано в инструкции по окрашиванию полимерных линз.

Определение спектральных характеристик выше указанных красителей проводилось на спектрофотометре Cary–500. При помощи спектрофотометра Cary–500 были получены спектральные характеристики коэффициента пропускания семи красителей, результаты которых приведены на рис. 1. Приведенные на рис. 1 спектральные характеристики позволяют судить о полосах поглощения красителей. На длине волны 560–570 нм наблюдается полоса поглощения для зеленого, серого и синего красителей, а на 900 нм – полоса поглощения для всех красителей, кроме зеленого. Полосы поглощения на длинах волн 1200, 1460 нм свойственны всем красителям, как и поглощение при длинах волн более 2300 нм.

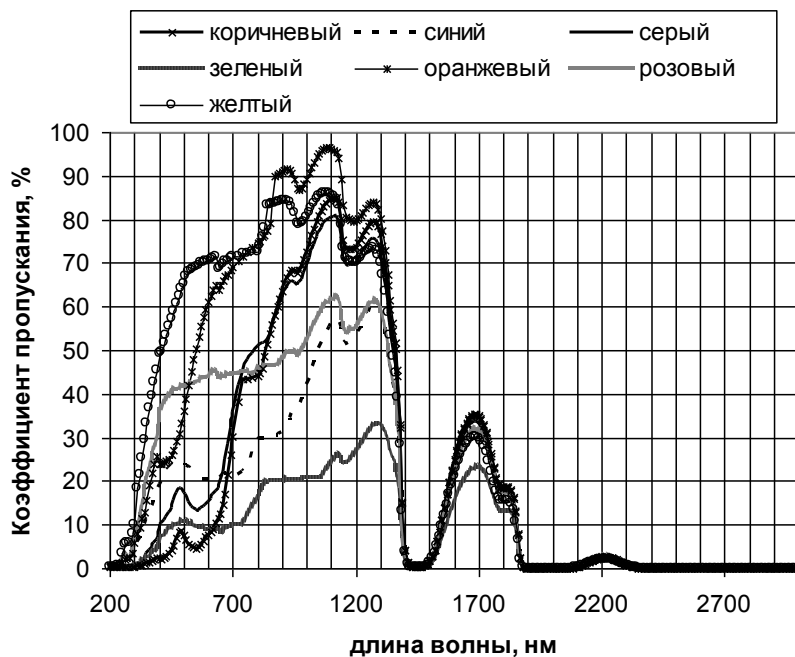


Рис. 1. Спектральные характеристики коэффициента пропускания красителей

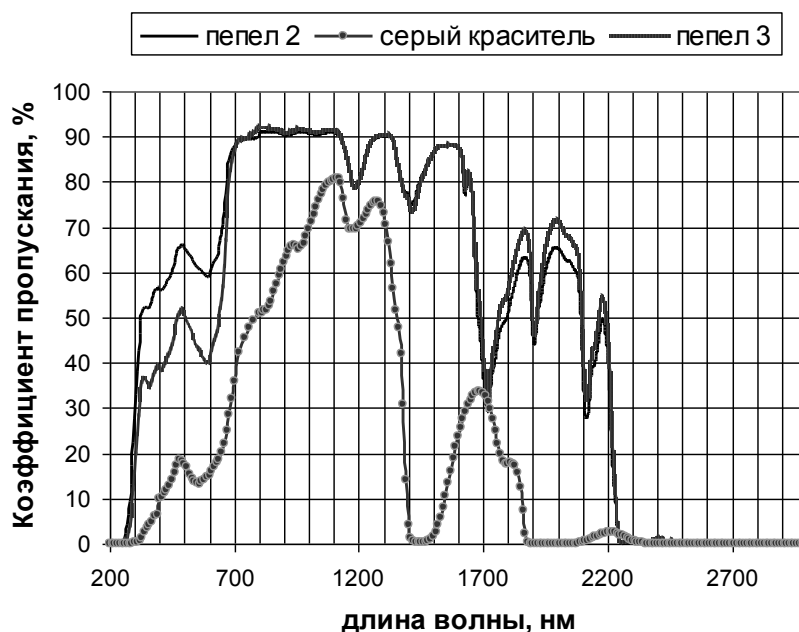


Рис. 2. Спектральная характеристика коэффициента пропускания серого красителя и окрашенных в серый цвет линз

Спектральная характеристика полимерной очковой линзы, окрашенной при помощи любого из красителей, будет повторять полосы поглощения красителя. На рис. 2 приведен пример спектральных характеристик линзы, окрашенной в серый цвет (пепел 2 с интенсивностью окрашивания 25 %, пепел 3 с интенсивностью окрашивания 50 %), и серого красителя. Как видно из рис. 2, спектральная характеристика линзы, окрашенной в серый цвет, повторяет спектральную характеристику полосы поглощения серого красителя соответственно. Полосы поглощения окрашенных серых линз с интенсивностью окраски 25 и 50 % (пепел 2, 3) в инфракрасной области спектра смещены относи-

тельно друг друга за счет расширения спектрального диапазона полимерного материала линзы. В видимой области спектра на длине волны 590 нм, а также при длине 1200 нм, полосы поглощения повторяют друг друга.

При нагревании растворов красителей происходит смещение спектральных характеристик коэффициента пропускания в ультрафиолетовую область спектра на 10–20 нм.

Измерение показателя преломления проводилось на рефрактометре ИРФ–454 БМ [3] и эллипсометре ЛЭФ–3М. При помощи рефрактометра ИРФ–454 БМ проводятся измерения показателя преломления красителей на длине волны 589,9 нм, а при помощи эллипсометра ЛЭФ–3М – на длине волны 632,8 нм. Приборы позволяют измерять показатель преломления с точностью до четвертого знака.

В таблице представлены результаты измерений показателя преломления для исследуемых растворов красителей при комнатной температуре и при 70°C.

краситель	Измерение на рефрактометре		Измерение на эллипсометре	
	показатель преломления при $T=23^{\circ}\text{C}$	показатель преломления при $T=70^{\circ}\text{C}$	показатель преломления при $T=23^{\circ}\text{C}$	коэффициент экстинкции
Коричневый	1,3359	1,3354	1,3325	0,0006
Серый	1,3350	1,3340	1,3376	0,0001
Зеленый	1,3349	1,3346	1,3368	0,0003
Синий	1,3335	1,3330	1,3322	0,0012
Оранжевый	1,3334	1,3336	1,3325	0,0006
Розовый	1,3344	1,3343	1,3344	0,0002
Желтый	1,3331	1,3335	1,3283	0,0001

Таблица. Результаты измерений показателя преломления красителей

Как видно из таблицы, показатели преломления красителей в нагретом состоянии отличаются от показателей преломления при комнатной температуре в третьем и четвертом знаке после запятой. Для коричневого, серого, зеленого и розового красителей показатель преломления уменьшается на 3, 5, 10 единиц четвертого знака соответственно, и показатели преломления, измеренные на длине волны 632,8 нм при помощи эллипсометра, различаются в третьем знаке после запятой. Исходя из этого, можно сказать, что дисперсия показателя преломления красителей незначительна, однако, проникая в поверхностный слой полимерного материала, она будет менять показатель преломления поверхности. Коэффициент экстинкции позволяет оценить поглощение на длине волны 632,8 нм и необходимую толщину слоя красителя в окрашенной полимерной линзе.

Заключение

В ходе исследования спектральных свойств дисперсных красителей для поверхностного окрашивания полимерных линз были получены коэффициенты пропускания красителей в широком диапазоне длин волн 200–3000 нм. Спектральные характеристики поверхностно окрашенных полимерных линз повторяют спектральные характеристики красителей. Поэтому, зная спектральные характеристики красителей, можно заранее оценить характер спектральной кривой предполагаемой цветной линзы, окрашенной при помощи дисперсных красителей.

Так как окрашивание проводится в нагретых до температуры 70–96°C растворах красителей, были исследованы показатели преломления красителей при комнатной

температуре и температуре 70°C. Нагрев раствора красителя приводит к уменьшению показателя преломления на несколько единиц четвертого знака после запятой. Измерения, проведенные на разных установках, подтверждают друг друга.

В дальнейшем планируется изучить вопрос изменения параметров поверхностного слоя линзы после окрашивания и определения глубины проникновения красителя в слой полимерного материала.

Выражаю благодарность научному руководителю, заведующему кафедрой оптических технологий, д.т.н., профессору Э.С. Путилину.

Литература

1. Щербакова О.В. Окрашивание полимерных очковых линз. – М.: Центр поддержки оптического бизнеса, 1998. – 46 с.
2. Ферридэй А. Тонирование очковых линз красителем ВРІ // Веко. – 1998. – № 4 (16). – С. 18–19.
3. Рефрактометр ИРФ-454 БМ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Г 34.15.051 ТО.

Пруненко Елена Константиновна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, prunenکو@pochta.ru