

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.7.08,681.78

И. А. КНЯХИН, А. А. МАРАЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ, В. Ф. ГУСАРОВ

## КОНТРОЛЬ СМЕЩЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ С ОПТИЧЕСКОЙ РАВНОСИГНАЛЬНОЙ ЗОНОЙ

Исследуются оптико-электронные системы с оптической равносигнальной зоной, предназначенные для контроля пространственного положения объектов. Показано, что развитие таких систем возможно путем совершенствования их структуры и алгоритмов обработки информации, что позволяет уменьшить воздействия внешней среды. Получены выражения для определения смещения базовой плоскости оптической равносигнальной зоны, вызванного воздействием градиента температуры воздушного тракта, и оптимальной постоянной времени системы.

*Ключевые слова:* оптико-электронная система, оптическая равносигнальная зона, дисперсионный метод, оптимизация параметров.

Для решения технологических задач и мониторинга состояния промышленных и транспортных объектов требуется обеспечить контроль поперечных смещений рабочих органов машин или элементов конструкции относительно протяженной измерительной базы [1—5] в широком линейном диапазоне. Такой контроль может осуществляться оптико-электронными системами (ОЭС) с оптической равносигнальной зоной (ОРСЗ), которые сочетают высокую энергетическую чувствительность к смещениям [6] с возможностью адаптивной корректировки воздействий внешней среды [7].

Совершенствование систем с ОРСЗ [8] в основном определяется применением современной электронной элементной базы и средств цифровой обработки информации с использованием методов ослабления внешних воздействий.

Оптический сигнал ОРСЗ формируется блоком задания базового направления (ЗБН) в физической среде и подвергается воздействию помех, создаваемых источниками излучения, модулятором и объективом. В свою очередь, на оптический сигнал ОРСЗ в процессе прохождения им воздушного тракта влияют помехи физической среды, которые вызывают регулярное смещение и колебания пространственного положения ОРСЗ. Приемная часть системы, размещаемая на контролируемом объекте, преобразует оптические сигналы  $X_{\text{опт}}$  в электрические  $X_{\text{эл 1}}$ ,  $X_{\text{эл 2}}$ , и в результате генерируется сигнал  $\tilde{X}$ , пропорциональный величине смещения приемной части относительно сформированной ОРСЗ. При этом в приемной части присутствуют воздействия на оптическую систему, приемник оптического излучения, модуль обработки сигнала, что приводит к искажению информации, содержащейся в оптическом и электрическом сигналах (рис. 1).

Анализ представленной структуры и принципов функционирования системы с ОРСЗ позволяет определить следующие основные направления развития данных систем:

- теоретический анализ физических явлений, ухудшающих технические характеристики систем, и совершенствование методов их ослабления;
- разработка программных и аппаратных средств на базе современных электронных и оптических компонентов для реализации методов ослабления воздействий физической среды.

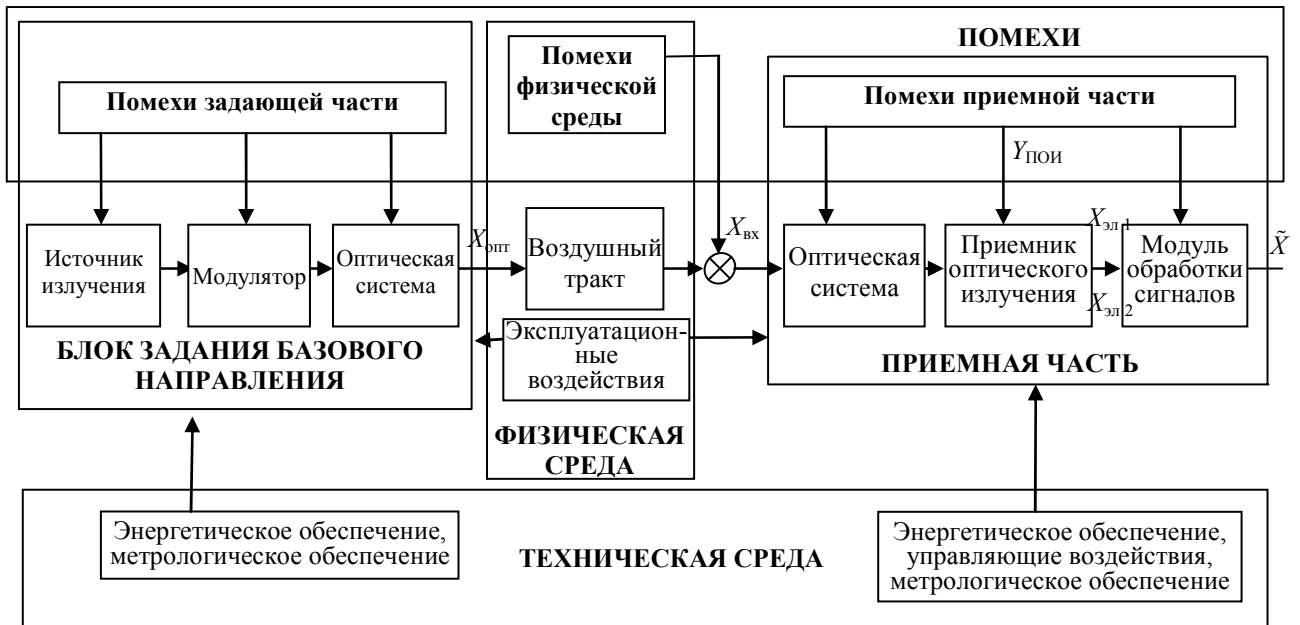


Рис. 1

Оценка влияния внешних условий на работу систем с ОРСЗ показала, что наиболее существенными являются:

- 1) помехи, возникающие в воздушном тракте и вызывающие как регулярное смещение (градиент температуры воздушного тракта), так и колебания положения ОРСЗ (турбулентность воздушной среды);
- 2) помехи, возникающие в приемной части из-за шумов при преобразовании оптического сигнала в электрический, что вызывает погрешности регистрации положения ОРСЗ.

Первые из указанных помех вызваны так называемой регулярной рефракцией — искривлением пучков лучей вследствие изменения среднего значения показателя преломления среды по длине воздушного тракта, что приводит к смещению положения ОРСЗ от „истинного“ [2, 4].

Анализ современных методов ослабления влияния рефракции показал, что в настоящее время применительно к системам с ОРСЗ наиболее эффективным является дисперсионный метод (метод спектральных разностей), при котором формируется полихроматическая ОРСЗ [7]. В реальных условиях эксплуатации градиент влажности и давления воздушной среды невелик, поэтому по измеренной величине смещения лучей с двумя длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  может быть определена величина регулярной рефракции [9].

Как известно [7], градиент температуры  $\text{grad}_y T$  в вертикальной плоскости для длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  оптического излучения вызывает соответственно смещение ОРСЗ на величины  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$  (рис. 2). В свою очередь, приемником оптического излучения (ПОИ) генерируются электрические сигналы  $X_{\text{эл1}}$  и  $X_{\text{эл2}}$ . При этом в случае равенства энергетических чувствительностей

$$\tau_1 S_1 L_1 / l_1 = \tau_2 S_2 L_2 / l_2 = W, \quad (1)$$

где для двух длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  соответственно:  $\tau_1, \tau_2$  — коэффициенты пропускания среды;  $S_1, S_2$  — интегральная чувствительность приемника оптического излучения;  $L_1, L_2$  — яркость источников излучения;  $l_1, l_2$  — ширина переходного участка ОРСЗ, определяемая аберрациями

и дефокусировкой объектива блока ЗБН, разность выходных электрических сигналов  $X_{\Delta 1,2}$  при воздействии регулярной рефракции для выбранных длин волн можно определить как

$$X_{\Delta 1,2} = \frac{W\pi s's'' \text{grad}_y T (n_1 - n_2)}{n_1 n_2 T}, \quad (2)$$

где  $s'$  — площадь выходного зрачка объектива блока ЗБН;  $s''$  — площадь входного зрачка оптической системы приемной части;  $n_1, n_2$  — показатели преломления воздушного тракта для двух длин волн,  $T$  — температура.

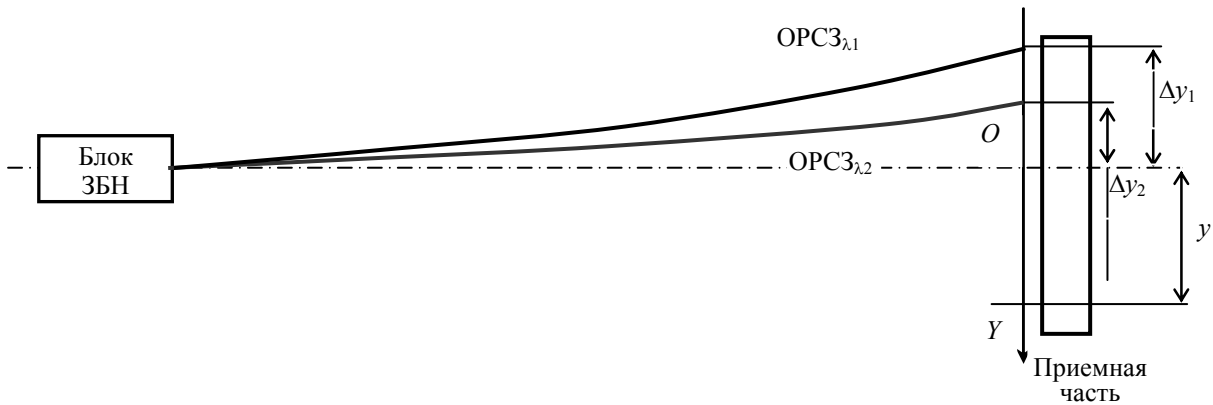


Рис. 2

Градиент температуры согласно с выражению (2) можно определить как

$$\text{grad}_y T = \frac{X_{\Delta 1,2} n_1 n_2 T}{W\pi s's'' (n_1 - n_2)}, \quad (3)$$

соответственно величину смещения  $y$  приемной части, исключая воздействие рефракции, — как

$$y = \frac{[X_{\Sigma 1,2} - X_{\Delta 1,2} (n_1 (n_2 - 1) + n_2 (n_1 - 1))] z^2}{4W\pi s's'' (n_1 - n_2)}, \quad (4)$$

где  $X_{\Sigma 1,2} = W\pi s's'' [4y/z^2 + \text{grad}_y T (2n_1 n_2 - n_2 - n_1)] / n_1 n_2 T$ ,  $z$  — расстояние от блока ЗБН до приемной части; при этом  $X_{\Delta 1,2}$  — для вычисления величины поправки к смещению, вызванному воздействием градиента температуры воздушного тракта, — будет в соответствии с алгоритмами (1)—(4) вычисляться модулем обработки сигналов (см. рис. 1).

Эксперименты по оценке возможности реализации дисперсионного метода в ОЭС подтвердили его реализуемость [7, 10, 11].

В то время как регулярная рефракция в процессе работы системы с ОРСЗ имеет систематический характер, турбулентность воздушной среды вызывает локальные изменения показателя преломления, которые в результате приводят к случайным отклонениям траектории распространения излучения. Ослабление этого явления возможно путем адаптации к изменяющимся условиям постоянной времени  $t$  модуля обработки сигналов.

Как известно из работ [2, 4], при диаметре  $D_1$  выходного зрачка оптической системы блока ЗБН и диаметре  $D_2$  входного зрачка оптической системы приемной части, превышающих размер неоднородности показателя преломления воздушного тракта ( $a$ ), среднеквадратическое отклонение смещения  $\delta y_{\text{ОРСЗ}}$  энергетической оси луча, вызванное действием всех неоднородностей, равно [2]:

$$\delta y_{\text{ОРСЗ}} = \delta y_T C,$$

где  $\delta y_T = \delta\varphi\sqrt{z_0^3/3a}$  [4],  $\delta\varphi$  — среднеквадратическое значение углового ухода луча за счет действия одной неоднородности, равное среднеквадратическому значению изменения показателя преломления, т.е.  $\delta\varphi = \Delta n$ ;  $z_0$  — дистанция фокусировки объектива блока ЗБН;

$C = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{i^2}{[\varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)(1-i)/N]^2}} / \sqrt{\sum_{i=1}^N i^2}$ , здесь  $\varepsilon_1 = D_1/a$ ,  $\varepsilon_2 = D_2/a$ ,  $N = z_0/a$  — коэффициент ослабления влияния турбулентности за счет размера зрачков оптических систем блока ЗБН и приемной части.

Если передаточная функция  $\Phi(j\omega)$  системы с ОРСЗ имеет вид инерционного звена первого порядка (что часто встречается на практике) [12]:

$$\Phi(j\omega) = k / (j\omega t + 1),$$

где  $k$  — коэффициент передачи системы с ОРСЗ,  $\omega$  — круговая частота, а энергетический спектр колебаний положения ОРСЗ при камеральных условиях определяется выражением [4]

$$E_T(\omega) = \delta y_T^2 \frac{\alpha_T}{\pi(\omega^2 + \alpha_T^2)},$$

где  $\alpha_T$  — коэффициент корреляционной связи спектра флуктуации турбулентности, то среднеквадратическая погрешность  $\delta y_{ОРСЗ}$ , обусловленная турбулентностью, при постоянном входном сигнале (т.е. постоянной величине смещения  $y$ ) будет определяться как

$$\delta y_{ОРСЗ} = \delta y_T C \sqrt{\frac{1}{\alpha_T t + 1}}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что в целях уменьшения среднеквадратической погрешности  $\delta y_{ОРСЗ}$  постоянную времени  $t$  необходимо увеличивать.

С другой стороны, если считать, что рассматриваемая система является разомкнутой линейной стационарной системой с передаточной функцией  $\Phi(j\omega)$ , а энергетический спектр флуктуации регистрируемых смещений представляется выражением

$$E_{см}(\omega) = \delta y_{см}^2 \frac{\alpha_{см}}{\pi(\omega^2 + \alpha_{см}^2)},$$

где  $\alpha_{см}$  — коэффициент корреляционной связи спектра контролируемых смещений,  $\delta y_{см}^2$  — дисперсия регистрируемых смещений, то динамическая погрешность  $\delta y_d$  воспроизведения случайного регистрируемого смещения, распределенного по нормальному закону, вследствие инерционности системы будет определяться как [12]

$$\delta y_d = \delta y_{см} \sqrt{\frac{\alpha_{см} t}{1 + \alpha_{см} t}}. \quad (6)$$

Анализируя выражение (6), можно отметить, что с увеличением постоянной времени динамическая погрешность  $\delta y_d$  возрастает.

Известно, что среднеквадратическая погрешность  $\delta y_{ПОИ}$  в случае, когда источником ошибок являются только шумы приемника оптического излучения  $Y_{ПОИ}$  (см. рис. 1), осуществляется оптимальная обработка аддитивной совокупности входных сигналов  $X_{вх}$  и шумов  $Y_{ПОИ}$  и передаточная функция модуля обработки сигналов представляется инерционным

звеном первого порядка с эквивалентной полосой пропускания  $\Delta f_{\text{ЭКВ}} = 1/(2t)$  [2], может быть представлена выражением

$$\delta y_{\text{ПОИ}} = \sqrt{eI / (S^2 W^2 t)}, \quad (7)$$

где  $W$  — энергетическая чувствительность ОЭС к смещениям;  $S$  — интегральная чувствительность приемника к излучению источника ОЭС;  $e$  — заряд электрона,  $I$  — ток, протекающий через ПОИ.

Тогда случайная составляющая  $\delta y$  суммарной погрешности, обусловленной основными влияющими на работу системы факторами (турбулентностью, инерционностью и шумами приемника — формулы (5), (6), (7) соответственно), определяется как

$$\delta y = \sqrt{\delta y_{\text{ОРСЗ}}^2 + \delta y_{\text{д}}^2 + \delta y_{\text{ПОИ}}^2} = \sqrt{\frac{\delta y_{\text{Т}}^2 C^2}{1 + \alpha_{\text{Т}} t} + \frac{\delta y_{\text{СМ}}^2 \alpha_{\text{СМ}} t}{1 + \alpha_{\text{СМ}} t} + \frac{eI}{S^2 W^2 t}}. \quad (8)$$

Анализ выражения (8) показывает, что при увеличении постоянной времени  $t$  динамическая составляющая погрешности  $\delta y_{\text{д}}$  возрастает, в то же время составляющие  $\delta y_{\text{ОРСЗ}}$  и  $\delta y_{\text{ПОИ}}$ , обусловленные турбулентностью и шумами, уменьшаются.

Как показывает анализ представленной на рис. 3 зависимости  $\delta y(t)$ , уменьшение коэффициента  $C$  за счет увеличения диаметра  $D_1$  выходного зрачка объектива блока ЗБН системы с ОРСЗ позволяет уменьшить величину случайной составляющей погрешности (для коэффициентов  $C=0,8$  ( $D_1=25$  мм,  $D_2=35$  мм) и  $C=0,7$  ( $D_1=28$  мм,  $D_2=35$  мм) при  $\delta y_{\text{СМ}}^2 = 0,000\,578$  мм<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{СМ}} = 0,131$ ;  $\delta y_{\text{Т}}^2 = 0,000\,243$  мм<sup>2</sup>;  $\alpha_{\text{Т}} = 0,15$ ;  $I = 0,015$  А;  $S = 0,164$  А/Вт;  $W = 2 \cdot 10^{-7}$  Вт/мм), а также выбрать наименьшее значение постоянной времени.

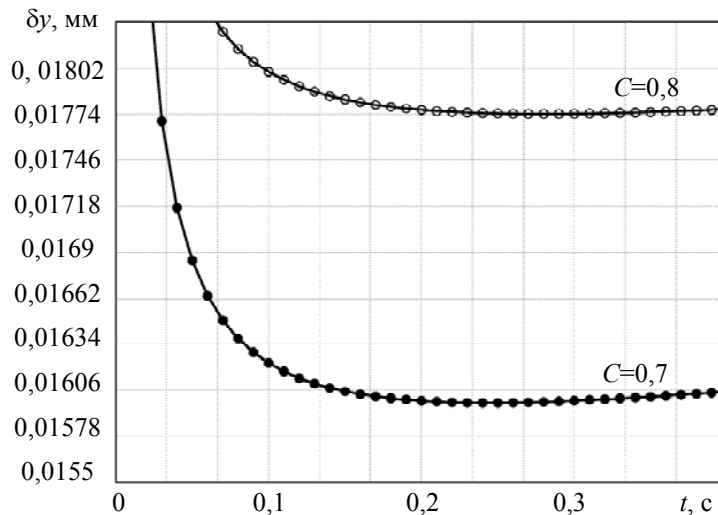


Рис. 3

В результате оптимальное значение постоянной времени системы  $t_{\text{опт}}$  для наиболее вероятных условий применения, когда  $\alpha_{\text{Т}} t \ll 1$  и  $\alpha_{\text{СМ}} t \ll 1$ , можно вычислить с помощью выражения

$$t_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{eI}{S^2 W^2 (\delta y_{\text{СМ}}^2 \alpha_{\text{СМ}} + \delta y_{\text{Т}}^2 C^2 \alpha_{\text{Т}})}}. \quad (9)$$

Таким образом, варьируя постоянную времени системы с ОРСЗ в соответствии с выражением (9), можно ослабить внешние воздействия и тем самым реализовать адаптивную схему системы.

Для адаптивных систем с ОРСЗ цифровые методы формирования и обработки сигналов

при определенных преобразованиях в ряде случаев превосходят аналоговые методы по точности и гибкости, что объясняется следующими особенностями:

— программное обеспечение цифровых методов позволяет облегчить их настройку и проверку;

— цифровые методы требуют только арифметических действий умножения и сложения-вычитания, что позволяет повысить быстродействие системы в целом;

— изменения температуры или влажности среды не приводят к изменению параметров и характеристик цифровых вычислительных устройств, таким образом, не требуется применение компонентов высокой точности.

Итак, на основании вышеизложенного можно заключить следующее:

— ослабление воздействия регулярной рефракции возможно при применении полихроматической ОРСЗ, реализованной на двух длинах волн оптического излучения;

— анализ дисперсии колебаний спектральной разности позволяет оценивать величину колебаний смещения ОРСЗ, вызванных воздействием турбулентности, и выбирать постоянную времени модуля обработки системы в целях уменьшения суммарной погрешности;

— наряду с очевидным, с точки зрения техники проектирования, применением современной электронной элементной базы совершенствование систем с ОРСЗ должно осуществляться в направлении построения цифровых систем, автоматически адаптирующихся к воздействию внешних условий;

— одним из основных критериев обработки информации в таких системах должен быть минимум систематической и случайной составляющих погрешностей измерений.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (гос. задание 2014/190 и 8.599.2014/К).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушенков Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения. М.: Логос, 2013. 376 с.
2. Джабиев А. Н., Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные приборы и системы с оптической равносигнальной зоной: Монография / Под общ. ред. Э. Д. Панкова. СПб: СПбГУ ИТМО, 1998. 238 с.
3. Анисимов А. Г., Алеев А. М., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н. Основные погрешности контроля соосности с помощью авторефлексионной оптико-электронной системы // Оптик. журн. 2009. Т. 76, № 1. С. 3—8.
4. Дементьев В. Е. Современная геодезическая техника и ее применение. М.: Академический проект, 2008. 591 с.
5. Коротаев В. В., Пантюшин А. В., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные системы контроля положения реперных меток // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 11. С. 34—37.
6. Мараев А. А., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Исследование энергетической чувствительности в оптико-электронных системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 3. С. 31—35.
7. Витол Э. А., Мусяков В. Л., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н. Реализация дисперсионного метода в оптико-электронных системах с оптической равносигнальной зоной // Сб. тр. VI Междунар. конф. „Прикладная оптика“, 18—21 окт. 2004 г., Санкт-Петербург. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. Т. 1. С. 37—40.
8. Мусяков В. Л., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н., Богатинский Е. М., Яковлев П. В. Направления развития оптико-электронных систем с оптической равносигнальной зоной / Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 27—31.
9. Прилепин М. Г., Голубев А. Н. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях. М.: Недра, 1972. 168 с.

10. Богатинский Е. М., Коротаев В. В., Мараев А. А., Тимофеев А. Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 3 (67). С. 130.
11. Мараев А. А., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н., Пантюшин А. В. Исследование метода спектрально-анализа в оптико-электронной системе предупреждения техногенных катастроф // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 12. С. 80—81.
12. Порфирьев Л. Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. СПб: Изд-во „Лань“, 2013. 400 с.

#### Сведения об авторах

- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: igor@grv.ifmo.ru
- Антон Андреевич Мараев** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: antoshka87@gmail.com
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru
- Вадим Федорович Гусаров** — аспирант; Университет ИТМО, кафедра оптико-электронных приборов и систем, Санкт-Петербург; E-mail: hoarfrost.vg@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
05.03.14 г.

УДК 535.317.226

К. В. ЕЖОВА, В. А. ЗВЕРЕВ, НГУЕН ВАН ЛУЕН

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Рассматриваются методы определения основных параметров оптической системы переменного увеличения при замене реальной оптической системы эквивалентной системой тонких компонентов. Показано, что знание основных параметров компонентов позволяет вычислить текущие значения их абберрационных параметров, получить представление о характере изменения абберрационных свойств системы, а следовательно, оценить возможность уменьшения абберраций изображения путем изменения значений основных параметров.

**Ключевые слова:** абберрация, переменное увеличение, оптическая система переменного увеличения, коэффициент абберрации, тонкий компонент, основной параметр.

Любая сколь угодно сложная оптическая система, состоящая из произвольного числа элементов (линз), при конечном расстоянии между ее главными плоскостями и отличной от нуля оптической силе называется однокомпонентной, если при всех возможных подвижках она перемещается как единое целое. Однокомпонентную оптическую систему целесообразно представить главными плоскостями, положение которых на оптической оси определяется главными точками  $H$  и  $H'$ . При известном фокусном расстоянии  $f'$  оптической системы и требуемом поперечном увеличении  $V$  изображения расстояние  $L$  между осевыми точками предмета и изображения определяется формулой [1]

$$L = d_{HH'} - \frac{(1-V)^2}{V} f', \quad (1)$$

где  $d_{HH'}$  — расстояние между главными плоскостями.