

2. **Avakov, S. M.**, Ovchinnikov, V., Karpovich, S., Titko, E., & Trapashko, G. (2007) Optico-Mechanical Complexes for Defect-Free Manufacturing of 0.35 mkm and 90 nm Photomasks. *Fotonika* [Photonics], 6, 35–39 (in Russian).
3. **Avakov, S. M.**, & Shkolyk, S. B. (2006) Modern Equipment for Production of Electronics Items. *Peterburgsky Zhurnal Elektroniki* [Saint-Petersburg Journal of Electronics], 1 (46) – 2 (47), 204–209 (in Russian).
4. **Zharsky, V. V.**, Karpovich, S. E., Dainiak, I. V., Lanin, V. L., Petukhov, I. B., Litvinov, E. A., & Poliakovskii, V. V. (2013) *Systems of Multi-Coordinate Motions and Actuation Mechanisms for Precision Technological Equipment*. Minsk, Bestprint. 208 p. (in Russian).
5. **Karpovich, S. E.**, Mezhinsky, Yu. S., & Zharsky, V. V. (2004) Precision Motion Systems. *Doklady BGUIR* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 3 (7), 50–61 (in Russian).
6. **Karpovich, S. E.**, Zharsky, V. V., & Dainiak, I. V. (2014) Precision Motion Systems for Equipment Used for Manufacturing of Electronics Items. *Doklady BGUIR* [Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2 (80), 60–72 (in Russian).
7. **Karpovich, S. E.**, Zharsky, V. V., Dainiak, I. V., & Arebi, M. A. (2013) Structure of Mechanical System on the Basis of Parallel Manipulator with 6 Degrees of Freedom. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniia. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Important Issues of Engineering Science: Collection of Research Papers] Minsk, Prompechat', 2, 150–153 (in Russian).
8. **Litvinau, Y.**, & Karpovich, S. (2011) On-the-Fly Reconfigurable Parallel Manipulators. *Proceedings of 56<sup>th</sup> Int. Scientific Colloquium, Ilmenau, Germany, September 12–16, 2011*. Ilmenau, Technical University of Ilmenau, 90–91.
9. **Dainiak, I. V.**, Karpovich, S. E., & Zharsky, V. V. (2013) Reconfiguration Actuation Mechanisms of Parallel Kinematics. *Aktual'nye Voprosy Mashinovedeniia. Sbornik Nauchnykh Trudov* [Important Issues of Engineering Science: Collection of Research Papers] Minsk, Prompechat', 2, 145–149 (in Russian).
10. **Karpovich, S. E.**, Zharsky, V. V., Dainiak, I. V., & Litvinov, E. A. (2013) *Simulation of Parallel Kinematics Mechanisms in MatLab/Simulink Environment*. Minsk, Bestprint. 153 p. (in Russian).
11. **Karpovich, S. E.**, Matiushkov, V. E., & Avakov, S. M. (2000) *Development of Mathematical Models for Computer-Aided Designing of Precision Optico-Mechanical Equipment for Electronic Engineering*. Minsk, JSC "Integral". 123 p. (in Russian).

Поступила 09.04.2014

УДК 535.317

## КОМПОЗИЦИИ АТЕРМАЛИЗОВАННЫХ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

*Асп. МУРАВЬЁВ А. В., канд. техн. наук, доц. КУЧЕРЕНКО О. К.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

E-mail: oleg.k.kucherenko@gmail.com

Приборы инфракрасной техники часто эксплуатируются в сложных условиях окружающей среды. В первую очередь это относится к температурному диапазону, который согласно требованиям может достигать  $\pm 60$  °С. Исходя из этого одной из важных задач при проектировании объективов инфракрасных приборов является сохранение их основных характеристик при температурных колебаниях. Изменение температуры внутри объектива приводит к изменению конструктивных параметров оптической системы и как следствие к терморасфокусировке и появлению термоаббераций в изображении, что повлечет за собой резкое снижение частотных и энергетических характеристик системы. В статье рассмотрен вопрос компенсации влияния температурных полей на качество изображения фокусирующих узлов, работающих в инфракрасном спектральном диапазоне, для случая однородного распределения температуры в системе.

Устранение зависимости характеристик ИК-объективов от температуры целесообразно проводить на этапе проектирования фокусирующего узла путем использования методов атермализации. Рассмотрены результаты применения разработанной авторами методики пассивной оптической атермализации для проектирования инфракрасных объективов-триплетов и отмечены их преимущества по сравнению с неатермализованными аналогами. Предложены схемы термнезависимых трехкомпонентных объективов, работающих в дальнем инфракрасном диапазоне спектра 8–14 мкм, с матричными фотоприемниками. Приведены результаты анализа влияния изменения температурного поля на качество изображения как неатермализованных, так и атермализованных ИК-объективов. Рекомендуются комбинации оптических материалов и характеристики оптических систем для создания атермализованных объективов дальней инфракрасной области спектра. Приведена оптическая система триплета, рассчитанного на основе методики атермализации.

**Ключевые слова:** инфракрасная техника, пассивная атермализация, атермализованный объектив.

Ил. 4. Табл. 3. Библиогр.: 10 назв.

## COMPOSITIONS OF ATHERMALIZED THREE-COMPONENT INFRARED OBJECTIVES

MURAVIOV A. V., KUCHERENKO O. K.

*National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*

Devices of infrared equipment are often operating under complicated environmental conditions. First of all it concerns temperature range which can reach  $\pm 60$  °C in accordance with the requirements. Proceeding from this condition one of the most important tasks for designing objectives of the infrared devices is to preserve their main characteristics during temperature fluctuations. Temperature changes in internal part of the objective leads to changes in design values of the optical system and it leads consequently to thermal defocusing and appearance of aberrations in image that entails sharp decrease in frequency and energy characteristics of the system. The paper considers a problem on compensation of temperature field influence on image quality of focusing units operating in infrared spectral range when there is uniform temperature distribution in the system.

It is expedient to remove dependences of infrared objective characteristics on temperature at the designing stage of focusing unit while using an athermalization method. The paper examines application results of the developed methodology for passive optical athermalization for designing infrared triplet objectives and reveals their advantages in comparison with non-athermalized analogues. Schemes of thermal-independent three-component objectives operating in the long-distance infrared range of the spectrum 8–14  $\mu\text{m}$  with matrix photo-receivers have been proposed in the paper. The paper provides results of the analysis on influence of temperature field changes on image quality as non-athermalized so athermalized infrared objectives as well. Combinations of optical materials and characteristics of optical systems for creation of athermalized objectives with long-distance infrared spectrum range have been recommended in the paper. The paper presents an optical system of the triplet which is calculated on the basis of the developed athermalization methodology.

**Keywords:** infrared technology, passive athermalization, athermalized objective.

Fig. 4. Tab. 3. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Эксплуатация объективов в широком температурном диапазоне влечет за собой изменение конструктивных параметров оптической системы и как следствие терморасфокусировку и появление термоаббераций в изображении, что приводит к невыполнению указанных требований. Вопросам проектирования термнезависимых объективов инфракрасной (ИК) области спектра посвящен ряд научных работ [1–9]. Анализ этих публикаций дает представление о преимуществах применения по сравнению с другими известными методами пассивной оптической атермализации, среди которых наиболее существенными являются: простота конструкции, высокая точность и надежность, снижение массогабаритных характеристик фокусирующего узла. В [6–8] содержатся общие рекомендации по проектированию атермализованных ИК-объективов, однако в них отсутствует обобщенная методика, основанная на математическом алгоритме целенаправленного расчета атермализованного фокусирующего узла с учетом свойств применяемых материалов, требований к конструктивным параметрам этого узла и диапазону действующих температур. В связи с этим разработка композиций атермализованных ИК-объективов про-

водится путем синтеза с пошаговой оптимизацией конструктивных параметров системы и как следствие занимает длительное время.

**Постановка задачи.** При проектировании ИК-объективов, работающих в диапазоне спектра 8–14  $\mu\text{m}$  и предназначенных для эксплуатации в широком диапазоне температур, возникает задача сохранения их расчетных характеристик качества изображения в этом температурном диапазоне. Целью исследований авторов являлись разработка композиций атермализованных ИК-объективов, анализ их характеристик и преимуществ по сравнению с неатермализованными аналогами.

**Результаты работы и их обсуждение.** При проектировании объективов ИК-техники в спектральном диапазоне 8–14  $\mu\text{m}$  широко применяются трехкомпонентные оптические системы, которые позволяют получить качество изображения, близкое к дифракционному, без применения асферических поверхностей. Анализ известных неатермализованных схем объективов-триплетов для ИК-области спектра, приведенных, например, в [10], показал, что при повышении температуры в оптической системе с фокусным расстоянием 57,55 мм на 40 °C (предполагается однородное температур-

ное распределение) изменение заднего фокального отрезка составляет более 200 мкм. Максимальная величина терморасфокусировки наблюдается у объективов, все компоненты которых изготовлены из германия, характеризующего высоким значением термооптической постоянной. В результате терморасфокусировки в плоскости фотоприемного устройства (ФПУ) диаметр кружка рассеяния увеличивается в восемь раз. Как следствие нарушаются требования к контрасту изображения и концентрации энергии в размере пикселя. Контраст изображения характеризуется модуляционной передаточной функцией (МПФ). Ее значения для объектива, параметры которого содержатся в [10], в зависимости от коэффициента передачи модуляции (КПМ) и пространственной частоты Найквиста  $\mu_H$  приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что на частоте  $\mu_H = 20 \text{ мм}^{-1}$  для приемника излучения с размером пикселя  $25 \times 25 \text{ мкм}$  на краю поля зрения объектива КПМ уменьшается на 40 % для сагиттальной и на 25 % для меридиональной плоскостей при изменении температуры на  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Разработанная авторами методика пассивной оптической атермализации [9] позволила получить ряд комбинаций атермализованных триплетов инфракрасного диапазона спектра 8–14 мкм. Характеристики материалов, использованных в системах, приведены в табл. 1. Характеристики комбинаций атермализованных ИК-триплетов с оптическими силами  $\Phi_{1-3}$  компонентов и оптической силой системы  $\Phi$  содержит табл. 2.

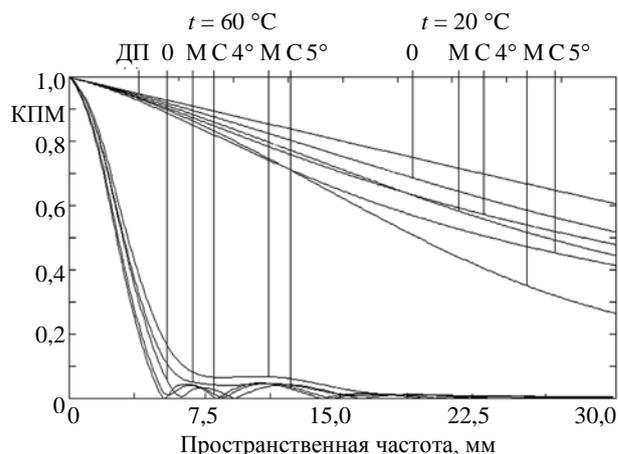


Рис. 1. МПФ неатермализованного объектива при температуре 20 и 60 °C: ДП – дифракционный предел; М, С – меридиональное и сагиттальное сечения; 0, 4°, 5° – углы поля зрения системы

На основе одной из полученных комбинаций (табл. 2) была синтезирована схема атермализованного трехкомпонентного ИК-объектива, окончательную оптимизацию которого проводили в программной среде ZEMAX. Объектив имел фокусное расстояние 60 мм, относительное отверстие 1:1, угол поля зрения  $10^\circ$ . Задний фокальный отрезок данного триплета изменяли в пределах  $\pm 6 \text{ мкм}$  в температурном диапазоне от минус 20 до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\Delta t = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Конструктивные параметры системы приведены в табл. 3.

МПФ и функция концентрации энергии (ФКЭ) синтезированного атермализованного объектива в температурном диапазоне от минус 20 до  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  показаны на рис. 2, 3.

Таблица 1

Оптические и термооптические характеристики материалов

Материал	Показатель преломления $n_\lambda$			Коэффициент дисперсии Аббе $v_{8-14}$	Температурное линейное расширение, $\text{град}^{-1}$ , $\alpha \cdot 10^{-6}$	Термооптическая постоянная, $\text{град}^{-1}$ , $V_t \cdot 10^{-6}$
	$\lambda_1 = 8 \text{ мкм}$	$\lambda_2 = 11 \text{ мкм}$	$\lambda_3 = 14 \text{ мкм}$			
Ge	4,0068	4,0036	4,0018	633,70	6,1	125,0
ИКС25	2,7729	2,7645	2,7542	94,75	20,0	6,4
ИКС29	2,6065	2,5970	2,5850	74,17	18,0	9,40
ИКС34	2,5996	2,5909	2,5788	76,62	11,0	49,0
ZnS	2,2227	2,1860	2,1304	12,86	6,6	30,0
ZnSe	2,4173	2,4000	2,3759	33,86	7,1	36,0

Таблица 2

Комбинации и характеристики атермализованных ИК-триплетов

Материалы 1, 2 и 3 компонентов	$\Phi_1/\Phi$	$\Phi_2/\Phi$	$\Phi_3/\Phi$	$\Phi$	Изменение заднего фокального отрезка, $\times 10^{-3}$ , мм
ИКС25, ZnSe, Ge	1,19	0,68	1,18	0,84	5
ИКС25, ZnSe, ИКС25	1,15	0,72	1,23	0,80	3
ИКС25, ZnSe, ИКС29	1,24	0,99	1,43	0,72	3
ИКС29, ZnSe, Ge	1,41	1,01	1,28	0,86	5
ИКС29, ZnSe, ИКС34	1,60	1,60	1,30	0,68	5
ИКС25, ZnS, Ge	0,72	0,12	1,08	0,91	5

Таблица 3

Конструктивные параметры атермализованного триплета

Радиус кривизны, мм	Толщина по оси, мм	Материал компонента	Световой диаметр, мм
66,33	7,13	ИКС25	60,00
196,12	6,42	–	59,84
682,56	4,52	ZnSe	54,86
120,65	51,24	–	51,61
24,45	4,98	Ge	23,95
24,46	10,27	–	20,08

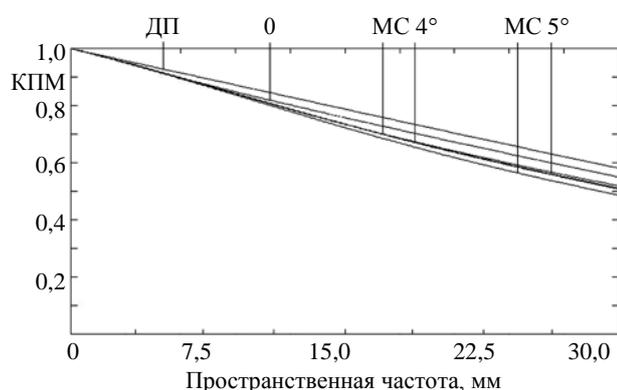


Рис. 2. МПФ синтезированного атермализованного объектива

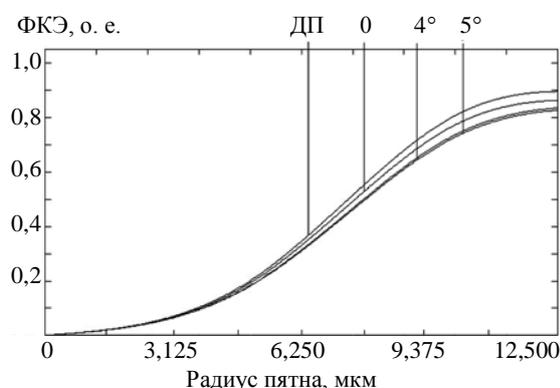


Рис. 3. ФКЭ синтезированного атермализованного объектива

Фотоприемные устройства (ФПУ) современных тепловизионных камер разрабатываются с применением неохлаждаемых микроболометрических матриц с размером пикселя  $q = 17\text{--}25$  мкм. Для приборов ИК-техники обязательным условием является, чтобы концентрация энергии  $\eta$  в размере пикселя составляла не менее 75 %. Для тепловизоров, формирующих изображение объектов конечных размеров, необходимо, чтобы значение КПМ на частоте Найквиста  $\mu_H = 1/2q = 20\text{--}30$  мм<sup>-1</sup> было не менее 0,6. При этом на объективы накладываются требования по минимизации габаритов, увеличению светосилы и угла поля зрения системы, а также сохранению их характеристик и качества изображения в необходимом диапазоне рабочих температур, который может достигать  $\pm 60$  °С и выше.

КПМ синтезированного триплета на пространственной частоте Найквиста для приемника излучения с размером пикселя  $25 \times 25$  мкм составляет на краю поля зрения 0,66 и изменяется в пределах  $\pm 1$  % в диапазоне температур  $\Delta t = \pm 40$  °С. Концентрация энергии в кружке рассеяния диаметром 25 мкм на краю поля зрения объектива, как видно из рис. 3, близка к дифракционному пределу и составляет 83 %, а ее изменение в диапазоне температур  $\Delta t = \pm 40$  °С не превышает  $\pm 0,8$  %. Это дает возможность использовать объектив в тепловизионных камерах с современными микроболометрическими матричными приемниками излучения.

Как следует из табл. 2, существует возможность создания атермализованных объективов-триплетов, два оптических компонента которых состоят из одного материала. Примером такой комбинации является схема объектива, пока-

занная на рис. 4, где первый и третий оптические компоненты системы выполнены из ИКС25, материалом второго компонента является ZnSe. Фокусное расстояние объектива 80 мм, угол поля зрения  $10^\circ$ , относительное отверстие 1:1. Изменение заднего фокального отрезка объектива в диапазоне температур  $\Delta t = \pm 40^\circ\text{C}$  не превышает 5 мкм, а диаметр кружка рассеяния в плоскости ФПУ изменяется в пределах  $\pm 1$  мкм. Концентрация падающей энергии в пятне рассеяния размером 25 мкм составляет 82 % на всем поле зрения объектива.

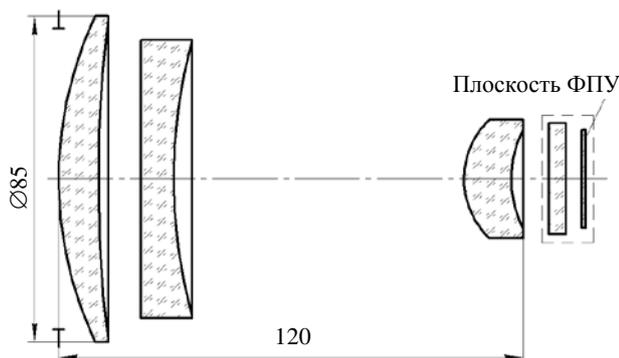


Рис. 4. Атермализованный триплет, состоящий из двух оптических материалов

## ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенного исследования установлено, что для неатермализованного объектива на пространственной частоте Найквиста для приемника излучения с размером пикселя  $25 \times 25$  мкм коэффициент передачи модуляции на краю поля зрения уменьшается на 40 % для сагиттальной и на 25 % для меридиональной плоскостей при изменении температуры в диапазоне  $\Delta t = \pm 40^\circ\text{C}$ .

2. На основе ранее разработанной авторами методики пассивной оптической атермализации получены комбинации ИК-атермализованных триплетов. Композиции атермализованных трехкомпонентных инфракрасных фокусирующих узлов обладают высоким качеством изображения, близким к дифракционному пределу, и сохраняют свои характеристики в диапазоне температур от минус 20 до  $60^\circ\text{C}$ . Выбор той или иной композиции материалов для синтеза атермализованного ИК-объектива определяется технологическими возможностями разработчика. Большинство вариантов композиций объек-

тивов содержат три разных материала, но возможны варианты и с двумя оптическими материалами.

3. Синтезированный ИК-триплет с фокусным расстоянием 60 мм, относительным отверстием 1:1, углом поля зрения  $10^\circ$  характеризуется в температурном диапазоне  $\Delta t = \pm 40^\circ\text{C}$  изменением заднего фокального отрезка 6 мкм, что на 1–2 порядка меньше, чем для неатермализованных объективов с аналогичными характеристиками. Установлено, что коэффициент передачи модуляции синтезированного атермализованного ИК-объектива на пространственной частоте Найквиста для матричного микроболометрического приемника с размером пикселя  $25 \times 25$  мкм характеризуется значением 0,66 и изменением в пределах  $\pm 1\%$  в диапазоне температур от минус 20 до  $60^\circ\text{C}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Jamison, Т. Н.** Athermalization of Optical Instruments from the Optomechanical Viewpoint / Т. Н. Jamison // Optical Design. – 1992. – Vol. CR43. – P. 131–159.
2. **Jamison, Т. Н.** Thermal Effects in Optical Systems / Т. Н. Jamison // Optical Engineering. – 1981. – Vol. 20, No 2 – P. 156–160.
3. **Tejada, J.** Passive Athermalization: Maintaining Uniform Temperature Fluctuations / J. Tejada // Photonics Handbook, May 2006. Optical Design. – 2006. – P. 341–345.
4. **Латышев, С. М.** Компенсация погрешностей в оптических приборах / С. М. Латышев. – Л.: Машиностроение, 1985. – 248 с.
5. **Слюсарев, Г. Г.** Методы расчета оптических систем / Г. Г. Слюсарев. – Л.: Машиностроение, 1969. – С. 273–285.
6. **Кучеренко, О. К.** Атермализация объективов тепловизоров в артиллерийских и танковых системах наблюдения и прицеливания / О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – № 3. – С. 28–33.
7. **Кучеренко, О. К.** Ахроматизація та атермалізація об'єктивів інфрачервоної техніки / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, В. М. Тягур // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – № 5. – С. 114–117.
8. **Кучеренко, О. К.** Вплив температури на абераційні властивості об'єктивів / О. К. Кучеренко, О. В. Муравйов, Д. О. Остапенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 1. – С. 99–105.
9. **Тягур, В. М.** Пассивная оптическая атермализация инфракрасного трехлинзового ахромата / В. М. Тягур, О. К. Кучеренко, А. В. Муравьев // Оптический журнал. – 2014. – № 4. – С. 42–47.
10. **Светосильный** объектив для инфракрасной области спектра: пат. № 2449327 РФ: МПК G02B9/34 / М. Н. Сокольский, И. Е. Совз; дата публ.: 27.04.2012.

## REFERENCES

1. **Jamison, T. H.** (1992) Athermalization of Optical Instruments from the Optomechanical Viewpoint. *Optical Design*, Vol. CR43, 131–159.
2. **Jamison, T. H.** (1981) Thermal Effects in Optical Systems. *Optical Engineering*, 20 (2), 156–160.
3. **Tejada J.** (2006) Passive Athermalization: Maintaining Uniform Temperature Fluctuations. *Photonics Handbook, May 2006. Optical Design*, 341–345.
4. **Latyev, S. M.** (1985) *Error Compensation in Optical Devices*. Leningrad, Mashinostroenie. 248 p. (in Russian).
5. **Slyusarev, G. G.** (1969) *Calculation Methods for Optical Systems*. Leningrad, Mashinostroenie, 273–285 (in Russian).
6. **Kucherenko, O. K., & Muraviov, A. V.** (2011) Athermalization of Thermal Imagery Device Objective in Artillery and Tank Sighting Systems. *Artileriyskoye i Strelkovoye Vooruzhenie* [Artillery Armament and Small Arms], 3, 28–33 (in Russian).
7. **Kucherenko, O. K., Muraviov, O. V., & Tiagur, V. M.** (2012) Achromatization and Athermazation of Objectives in Infrared Equipment. *Naukovi Visti Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kiivs'kii Politekhnichnii Institut"* [Science News National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"], 5, 114–117 (in Ukrainian).
8. **Kucherenko, O. K., Muraviov, O. V., Ostapenko, D. O.** (2013) Influence of Temperature on Operational Characteristics of Objectives. *Naukovi Visti Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu Ukraini "Kiivs'kii Politekhnichnii Institut"* [Science News National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"], 1, 99–105 (in Ukrainian).
9. **Tiagur, V. M., Kucherenko, O. K., & Muraviov, A. V.** (2014) Passive Optical Athermalization of Infrared Three-Lens Achromat. *Optichesky Zhurnal* [Optical Journal], 4, 42–47 (in Russian).
10. **Sokolsky, M. N., & Sovz, I. E.** (2012) High-Aperture Objective for Infrared Spectral Region. Patent RF No 2449327 (in Russian).

Поступила 24.01.2014

УДК 681.515

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ С ЦИФРОВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

*Канд. техн. наук, доц. СТРИЖНЕВ А. Г.<sup>1)</sup>, асп. РУСАКОВИЧ А. Н.<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>Научно-производственное общество с ограниченной ответственностью «ОКБ ТСП»,

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

E-mail: skb@tspb.com

В статье рассматривается проблема синтеза систем автоматического управления, работающих в различных режимах, например обработки скачкообразных воздействий и слежения за медленно изменяющимися входными сигналами. В большинстве случаев один регулятор не позволяет достичь требуемых показателей качества работы во всех режимах. Одним из способов решения данной задачи может служить создание системы переменной структуры. Предложена система автоматического управления переменной структуры, содержащая два цифровых регулятора, один из которых включен в прямую цепь последовательно, а второй – параллельно объекту управления, имеющему дополнительный усилитель и единичную обратную связь. Такая схема построения отличается простотой и обладает хорошим качеством при обработке ступенчатых и синусоидальных входных сигналов различной амплитуды.

Представлена разработанная структурная схема системы переменной структуры и описан принцип ее действия. Для проверки работы системы выбраны три различных объекта управления. С учетом требований, предъявляемых к качеству функционирования системы, выбраны цифровые регуляторы и определены их параметры. Для проверки работы предложенной системы с различными объектами управления и цифровыми регуляторами проведено математическое моделирование. Подтверждены хорошее быстродействие системы автоматического управления при обработке ступенчатых сигналов, обеспечение минимальной для данных регуляторов динамической ошибки и времени запаздывания при обработке гармонических воздействий различной амплитуды. Полученные результаты доведены до инженерного уровня и могут быть использованы при создании систем автоматического управления, содержащих другие объекты управления и цифровые регуляторы, к качеству работы которых предъявляются различные, порой противоречивые требования.

**Ключевые слова:** цифровая система автоматического управления переменной структуры, прямая цепь, обратная связь, цифровой регулятор, объект управления.

Ил. 4. Табл. 4. Библиогр.: 10 назв.