

УДК 621.049.77

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТРАЖАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МИКРОЗЕРКАЛ ОПТОВОЛОКОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

А.И. ФИЛИПЕНКО, Е.А. ЧАЛАЯ, К.Л. ХРУСТАЛЕВ

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина*

*Поступила в редакцию 23 апреля 2018*

**Аннотация.** Целью исследования является определение зависимости геометрических параметров компонентов МЭМС-зеркал в оптоэлектромеханических переключателях к оптическим потерям, возникающим в этих системах. Показано, что геометрические параметры: шероховатость и кривизна зеркал, возникающие на этапах их технологического производства, непосредственно влияют на потери в оптических линиях связи. Проведено моделирование зависимости отражательной способности микрозеркал от величин шероховатости и кривизны.

*Ключевые слова:* переключатель, зеркало, отражающая поверхность, шероховатость, кривизна, потери.

**Abstract.** The main goal of investigation is defining dependency of geometrical parameters of MEMS-mirrors components in opto-electro-mechanical switches to losses appeared in such systems. Geometrical parameters of mirrors such as roughness and curvature, which had appeared on stage of development, have influence on losses in fiber-optic communication lines. The modeling dependency of reflection possibility of micro-mirrors to values of roughness and curvature has been conducted.

*Keywords:* switch, mirror, reflecting surface, roughness, curvature, loss.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 115, No. 5, pp. 65-71**  
**Modeling dependency of micromirrors reflection**  
**in optical fibers components on the geometrical parameters**  
**O.I. Filipenko, O.O. Chala, K.L. Khrustalev**

### Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – одна из наиболее передовых технологий, позволяющая не только значительно улучшить характеристики электронной аппаратуры, но и создавать устройства для решения задач в совершенно новых областях.

МЭМС, которые содержат оптические компоненты, выделяют в отдельную группу – микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС) в основном из-за конструктивных различий, поскольку они требуют наличия прозрачных для света окон в корпусе и применения особых технологических режимов их получения и контроля из-за высоких предъявляемых требований [1]. Микросистема предполагает интеграцию ряда различных технологий (МЭМС, КМОП, DEM, Liga, оптической, гидравлической и т. д.) [2].

Применение оптических систем, в которых используются поворотные механизмы и переключатели с зеркалами, зачастую сопряжено с рядом проблем, которые существенно влияют на количество вносимых потерь в общий комплекс МОЭМС [3].

Для получения высокого разрешения системы на основе микрозеркал необходимо как минимум выполнение следующих условий:

- малые значения статического и динамического искривления зеркала;
- высокий коэффициент отражения поверхности зеркала, зависящий от материала покрытия и поверхностного рельефа (рельеф менее  $\lambda/10$ , где  $\lambda$  – длина волны излучения; материал покрытия – пленки металлов).

При этом максимальное разрешение системы ограничивается дифракцией ее оптических элементов [4].

Как правило, кремниевая поверхность микрозеркала, которая является подложкой [5], не может обеспечить достаточный уровень отражения, что является одним из основных факторов обеспечения низких потерь при распространении светового сигнала. Исследование металлических покрытий и технологии их получения, контроль качества являются актуальными задачами при проектировании, подборе режимов технологического исполнения [1, 2].

Коэффициент отражения функциональных отражающих зеркал в микрооптоэлектромеханических системах в большей мере зависит от качества материала покрытия и поверхностного рельефа.

В настоящее время вопросы, касающиеся точного оценивания геометрических параметров микрозеркал (шероховатости и искривления), их контроля на промежуточных операциях и в форме готовых изделий для внесения уточнений в технологические процессы и улучшения характеристик с целью уменьшения потерь, являются актуальными задачами.

### **Теоретический анализ**

Одной из основных характеристик оптических компонентов является величина обратных потерь, под которыми понимается количество света, распространяющегося в направлении, обратном направлению передачи полезной информации на этапе перенаправления сигнала в переключателях. Первичной причиной обратных потерь является отражение от области изменения показателя микрорельефа оптических зеркал (Френелевское отражение), которое образуется ввиду наличия неровностей на самих зеркальных поверхностях [6]. Этот эффект устраняется путем придания функциональной поверхности зеркала определенной формы и свойств путем полировки и шлифовки на этапе производства или контроля.

По структуре элементы коммутационных компонентов в общем случае могут состоять из очень незначительных по площади микро- и наноразмерных металлических, керамических, полимерных и стеклянных слоев, которые имеют различные физико-химические свойства [1]. Полировка поверхности оптического зеркала выполняется в несколько приемов двумя методами: свободным (не фиксированным) и связанным абразивом. Требуемое значение обратных потерь может быть гарантировано только при выполнении тщательного контроля состояния покрытия зеркала после полировки [2, 7].

### **Моделирование зависимости рассеивания сигнала от величин шероховатости функциональной отражающей поверхности зеркал**

После обработки зеркал методами полировки и шлифовки все же могут оставаться дефекты в виде сколов и царапин, которые не только увеличивают потери на этапе отражения-переотражения, но и впоследствии могут вызвать микроразрушение зеркала в процессе воздействия климатических и механических факторов, что, в конце концов, приводит к еще большему возрастанию потерь оптического сигнала.

Любой, обработанный даже тщательным образом компонент не может иметь идеально ровную поверхность. Значение гладкости и ровности поверхности детали в любом случае будет отличаться от номинального значения. При этом отклонение может быть либо макрогеометрическим или микрогеометрическим.

Макрогеометрические отклонения могут быть охарактеризованы кривизной детали и несоответствием формы. Микрогеометрические отклонения, в свою очередь, определяются не чем иным, как шероховатостью поверхности [8].

Даже шероховатость, значение высоты которой меньше длины волны, вносит значительные погрешности в систему, искажает сигнал.

Шероховатость – это совокупность микронеровностей, появляющихся на поверхностях готовых компонентов или деталей. При этом шаг неровностей, который принимается в качестве шероховатости, должен быть очень мал по базовой длине всей поверхности.

Вообще принято выделять три вида шероховатости объекта:

– исходная шероховатость – возникает в результате технологической обработки изделия различными абразивами;

– эксплуатационная шероховатость – возникает в процессе эксплуатации, в результате износа и рабочего трения;

– стабильная шероховатость – это вид эксплуатационной шероховатости, который можно воспроизвести в стационарных условиях трения.

Величину диапазона в зависимости от шероховатости отражающей функциональной поверхности микрзеркала описывают выражением (1). Общий комплексный диапазон используется для измерения рассеяния мощности от идеально гладкой, чистой поверхности.

$$\eta = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{4\pi\sigma \cos\Theta_i}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $\eta$  – процент потерь на рассеивание;  $\sigma$  – среднеквадратичная шероховатость функциональной отражающей поверхности зеркала;  $\Theta_i$  – угол падения луча света;  $\lambda$  – длина волны [4].

Были проведены исследования на зеркале-образце, которое получено нанесением металлизированного слоя испарением в вакууме алюминиевого покрытия на кремниевую подложку. Величина рассеивания энергии сигнала в зависимости от шероховатости поверхности на разной длине волны показана на рис. 1.

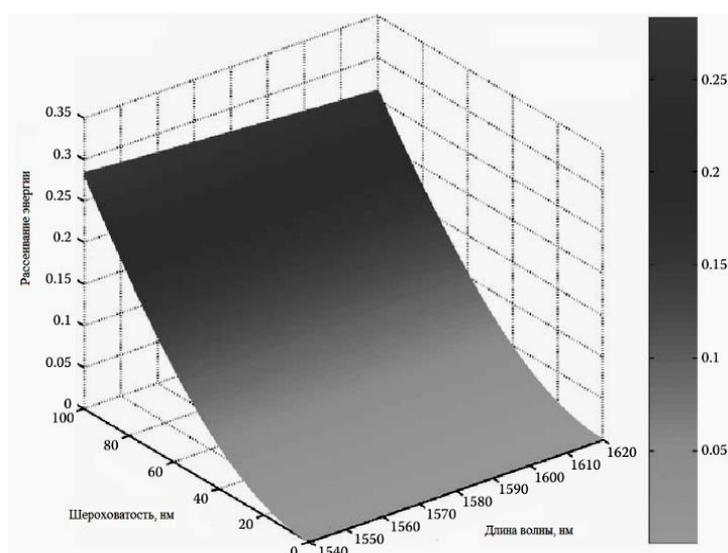


Рис. 1. Зависимость рассеивания сигнала от среднеквадратичной шероховатости функциональной отражающей поверхности зеркала с металлизацией

Чтобы получить значение коэффициента потерь на рассеивание менее 10 %, шероховатость функциональной поверхности зеркала должна быть меньше 57 нм на 1550 нм длины волны. Тем не менее рассеивающая способность слабо зависит от длины волны луча. Например, эта величина составляет 1,4 % для 1520 нм и 1,2 % для 1620 нм при угле падения 45°, а среднеквадратичная шероховатость функциональной отражающей поверхности зеркала – 20 нм. Из этого можно сделать вывод, что одним из основных преимуществ плоскостных МОЭМС-переключателей на основе зеркал является независимость потерь от длины волны.

Тем не менее потери, зависящие от длины волны, определяются также шероховатостью функциональных отражающих поверхностей зеркала. Например, величина рассеиваемой мощности сигнала составит 5,3 % на длине волны 1520 нм и 4,7 % на длине 1620 нм при среднеквадратичной шероховатости поверхности 40 нм по сравнению с 1,4 % и 1,2 % соответственно при среднеквадратичной шероховатости поверхности 20 нм.

### Моделирование интенсивности рассеивания сигнала от кривизны и гладкости функциональной отражающей поверхности зеркал

Опираясь на международный стандарт ISO 10110-5 «Оптические приборы и устройства», можно выделить еще одну немаловажную характеристику зеркал как кривизна или гладкость.

Кривизна оптических компонентов – это собирательное название ряда характеристик, отклонение той или иной геометрии «объекта», в нашем случае поверхности зеркала, от идеально «плоских» объектов.

Кривизна определяется для каждой точки на поверхности и выражается коэффициентом средней кривизны (Гауссовой или полной) через первую квадратичную форму (2) [4]:

$$K = \frac{1}{(EG - F^2)} \begin{bmatrix} E & E_u & E_v \\ F & F_u & F_v \\ G & G_u & G_v \end{bmatrix} - \frac{1}{2(\sqrt{EG - F^2})} \left\{ \left( \frac{E_v - F_u}{\sqrt{EG - F^2}} \right)_v - \left( \frac{F_v - G_u}{\sqrt{EG - F^2}} \right)_u \right\}, \quad (2)$$

где  $E, F, G$  – коэффициенты первой квадратичной формы поверхности.

В оптических МЭМС гладкость поверхности оптических компонентов обусловлена материалом и технологией их производства. Основными причинами рассеивания в переключателях является шероховатость и кривизна поверхности этих компонентов. Дефектная шероховатость и кривизна, высота значений которых меньше длин оптических волн, вносит значительные погрешности в систему, искажает передаваемый сигнал [5].

Следует отметить, что искривленные и не симметрично деформированные поверхности часто встречаются в МОЭМС из-за того, что технологии производства микросистемной техники, и МЭМС в том числе, не могут обеспечить производство идеально ровных сложных структур и компонентов. Иногда кривизна таких зеркал может быть большой и достигать миллиметра в радиусе. Золото и серебро, как наиболее часто используемые материалы, хотя и повышают рефлективность, но, как правило, практически всегда имеют отклонения от идеально ровной поверхности.

Существуют методы для производства сверхгладких и малодефектных зеркальных структур, которые предусматривают создание «поликремний-фосфоркремний-поликремний» структуры для получения зеркал с минимальной кривизной. Такая структура позволяет зеркалу оставаться устойчивым даже тогда, когда слой металла добавляется с целью повышения рефлективности зеркала. Но даже при этих манипуляциях микрозеркала все же могут иметь достаточно выраженную кривизну [5].

Гладкость поверхности измеряется значением  $\sigma$ , что является отправной точкой отсчета, при которой гладкость идеальна ( $\sigma = 0$ ). Как правило, условия гладкости поверхности – это существование в каждой точке поверхности определенной касательной плоскости, кривизны и т. д. Эти требования сводятся к тому, что функции, задающие поверхность, предполагаются однократно, дважды, трижды, а в некоторых вопросах – неограниченное число раз. При этом дополнительно накладывается условие регулярности.

В проведенном моделировании гладкости зеркального слоя оптического переключателя используем значение  $\sigma = 2$ , как отклонение от нормального распределения Гаусса при описании гладкости поверхности. Учитываем, что для каждой ячейки отражательной поверхности позиция конкретной секции зависит от ее номинального расположения и результата вероятностного Гауссова распределения.

Для каждой ячейки при определенном Гауссовом распределении значение гладкости поверхности добавляется к значению гладкости каждой ячейки, в результате чего наблюдается влияние на дистанцию, которая представляет собой распространение оптического фронта и отражается от поверхности зеркала.

Для проверки поверхностной гладкости было проведено моделирование, при котором луч направлялся на микрозеркало размером  $10 \times 10$  мкм и отражался обратно к источнику. Луч сигнала – на наблюдательном уровне  $25 \times 25$  мм на расстоянии 10 мкм от зеркала. Каждая имитация использует Гауссов квадратурный метод с  $96 \times 96$  ячейками. Такая методика имеет компромисс между точностью и скоростью компиляции для этой конкретной системы. Эксперимент был проведен 5 раз, в каждом случае получены различные значения гладкости поверхности оптического микрозеркала.

На рис. 2–4 показаны контуры интенсивности оптического сигнала. Контур на рис. 2, *a* моделирует идеальный результат, при котором гладкость поверхности приемлема, при этом потери сигнала относительно невелики. Также на рисунках представлено моделирование других вариантов значений гладкости поверхности (при  $\sigma = 10$  (рис. 2, *б*), при  $\sigma = 25$  (рис. 3, *а*), при  $\sigma = 50$  (рис. 3, *б*),  $\sigma = 100$  (рис. 4)). Только сравнивая их с эталонным вариантом (рис. 2, *а*), можно проследить зависимость того, как оптический сигнал ухудшается (коэффициент потерь возрастает) с уменьшением гладкости поверхности зеркала. Это доказывает предположение о том, что увеличение рассеяния света на микрозеркалах зависит от кривизны (гладкости) микрозеркала.

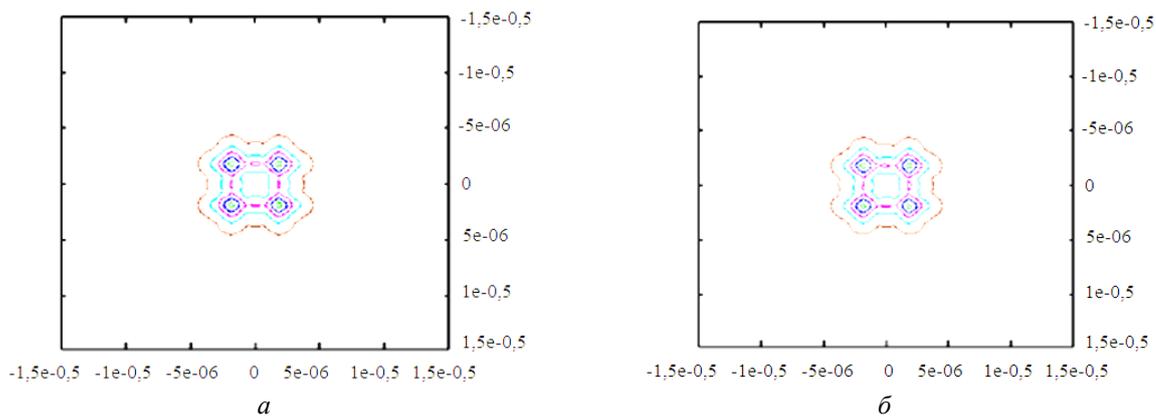


Рис. 2. Контуры интенсивности зеркала: *a* – при  $\sigma = 0$ , потери 0 %; *б* – при  $\sigma = 10$ , потери 0,5 %

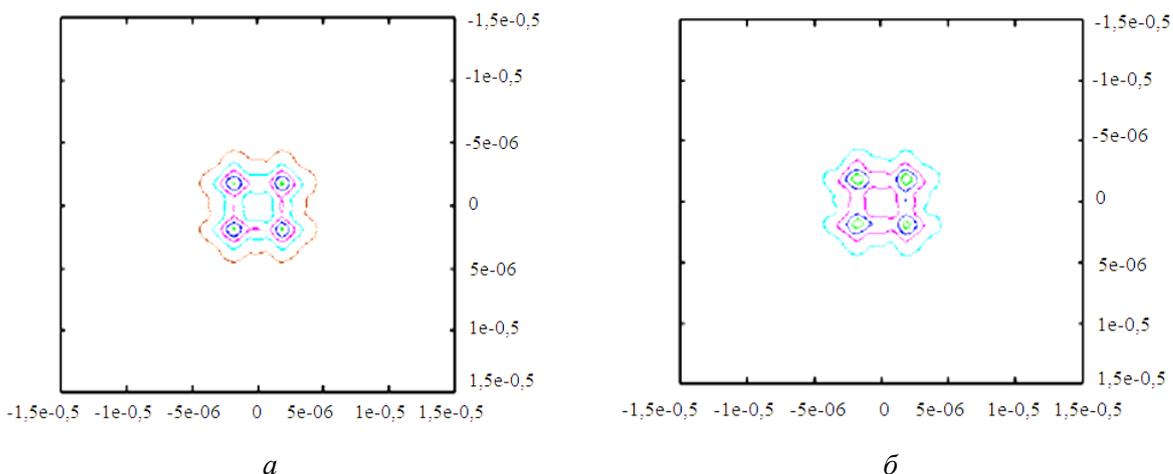


Рис. 3 Контуры интенсивности зеркала: *a* – при  $\sigma = 25$ , потери 3,3 %; *б* – при  $\sigma = 50$ , потери 12,6 %

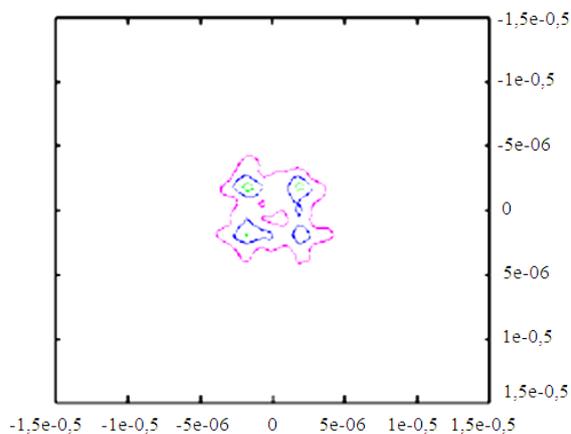


Рис. 4. Контуры интенсивности зеркала: при  $\sigma = 100$ , потери 41,5 %

Для стандартных технологий производства микрозеркал общепринятое значение гладкости поверхности достаточно мало. Типичное значение гладкости поверхности для тонких слоев имеет диапазон от 10 до 50 нм.

Потери от одного оптического зеркала составляют примерно 0–3 %, но даже такие величины могут значительно ослабить оптический сигнал и внести достаточно ощутимые погрешности в работу системы.

### Заключение

В статье приведены результаты моделирования зависимости отражающей способности микрозеркал оптоволоконных компонентов от их геометрических параметров, а именно значений шероховатости, кривизны и гладкости.

Исследования подтверждают, что рассеивание энергии оптического сигнала зависит от геометрии зеркала и практически не зависит от длины волны. Результат моделирования рассеивания энергии светового потока может представлять интерес для технологов и проектировщиков МЭМС и МОЭМС при проектировании технологических процессов изготовления и контроля микрооптозеркал МЭМС-переключателей.

Дальнейшие исследования предлагается направить на разработку технологических процессов и операций, которые бы позволили путем спецобработок функциональных отражающих поверхностей сократить процент потерь на рассеивание мощности в компонентах оптоволоконных линий связи, в частности оптических микрозеркал.

### Список литературы

1. Невлюдов И.Ш., Палагин В.А., Чалая Е.А. Технологиии микросистемной техники // Технология приборостроения. 2014. № 3. С. 7–11.
2. Семенец В.В., Невлюдов И.Ш., Палагин В.А. Введення в мікросистемну техніку та нанотехнології. Навчальний посібник. Харків: «СМІТ», 2011. 416 с.
3. Филипенко А.И., Чалая Е.А., Видешин М.И. Математическое моделирование методом Монте-Карло зависимости направляющей способности оптических компонентов МОЭМС-переключателей при изменении их параметров позиционирования // Технология приборостроения». 2016. № 2. С. 32–35.
4. Ланцов В.Н. Рудаков О.В., Маскеев С.В. Состояние в области проектирования микроэлектромеханических систем. Владимир, 2009. 31 с.
5. Филипенко О.И., Чала О.О., Видешин М.И. Технологічні дефекти виробництва кремнієвих підкладок для функціональних відбиваючих поверхонь МОЕМС-перемикачів // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2017. Т. 2 (42). С. 61–63.
6. Micromachined Bulk Wave Acoustic Bandgap Devices / R.H. Olsson [et al.] // Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. June 2007. P. 317–321.
7. Филипенко О.И., Чала О.О., Видешин М.И. Технологічні фактори виробництва, що впливають на якість покриттів дзеркальних поверхонь МОЕМС-перемикачів // Наукові нотатки. 2017. Вип. 57. С. 178–183.
8. Микрооптические устройства на основе отражающих элементов микрозеркал / Е.С. Горнев [и др.] // Микросистемная техника. 2002. № 9. С. 29–34.

### References

1. Nevljudov I.Sh., Palagin V.A., Chalaja E.A. Tehnologii mikrosistemnoj tehniki // Tehnologija priborostoenija. 2014. № 3. S. 7–11. (in Ukr.)
2. Semenec' V.V., Nevljudov I.Sh., Palagin V.A. Vvedennja v mikrosistemnu tehniku ta nanotehnologii. Navchal'nij posibnik. Harkiv: «SMIT», 2011. 416 s. (in Russ.)
3. Filipenko A.I., Chalaja E.A., Videshin M.I. Matematicheskoe modelirovanie metodom Monte-Karlo zavisimosti napravljajushhej sposobnosti opticheskikh komponentov MOJeMS-pereklyuchatelej pri izmenenii ih parametrov pozicionirovanija // Tehnologija priborostoenija». 2016. № 2. S. 32–35. (in Ukr.)
4. Lancov V.N. Rudakov O.V., Maskeev S.V. Sostojanie v oblasti proektirovanija mikrojelektromehaničeskikh sistem. Vladimir, 2009. 31 s. (in Russ.)
5. Filipenko O.I., Chala O.O., Videshin M.I. Tehnologichni defekti virobničtva kremnievih pidkladok dlja funkcional'nih vidbivajuchih poverhon' MOEMS-peremikachiv // Sistemi upravlinnja, navigacii ta zv'jazku. Zbirnik naukovih prac'. 2017. T. 2 (42). S. 61–63. (in Ukr.)
6. Micromachined Bulk Wave Acoustic Bandgap Devices / R.H. Olsson [et al.] // Int. Conf. on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. June 2007. P. 317–321. (in Russ.)
7. Filipenko O.I., Chala O.O., Videshin M.I. Tehnologichni faktori virobničtva, shho vplivajut' na jakist' pokrittiv dzerkal'nih poverhon' MOEMS-peremikachiv // Naukovi notatki. 2017. Vip. 57. S. 178–183. (in Ukr.)
8. Mikroopticheskie ustrojstva na osnove otrazhajushhijh jelementov mikrozerkal / E.S. Gornev [i dr.] // Mikrosistemnaja tehnika. 2002. № 9. S. 29–34. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Филипенко А.И., д.т.н., профессор, декан факультета автоматизации и компьютеризированных технологий Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Чалая Е.А., ассистент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и

### Information about the authors

Filipenko O.I., D.Sci, professor, dean of faculty of automation and computer technologies of Kharkiv national university of radioelectronics.

мехатроники Харьковского национального университета радиозлектроники.

Хрусталеv К.Л., к.т.н., старший преподаватель кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники Харьковского национального университета радиозлектроники.

**Адрес для корреспонденции**

61166, Украина,  
г. Харьков, пр. Науки, 14,  
Харьковский национальный  
университет радиозлектроники  
тел: 38 (057) 702-14-86;  
e-mail: olena.chala@nure.ua  
Чалая Елена Александровна

Chala O.O., assistant of department of computer-integrated technologies, automation and mechatronics of Kharkiv national university of radioelectronics.

Khrustalev K.L., PhD, senior lecturer of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics Department of Kharkiv national university of radioelectronics.

**Address for correspondence**

61166, Ukraine,  
Kharkiv, Nauki ave., 14,  
Kharkiv national  
university of radioelectronics.  
tel. 38 (057) 702-14-86;  
e-mail: olena.chala@nure.ua  
Chala Olena Oleksandrivna