

УДК 535.8

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ГОЛОВКА

Ю.В. Федосов<sup>a,b</sup>, М.Я. Афанасьев<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация

Адрес для переписки: yf01@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 27.03.17, принята к печати 22.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-559-563

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Федосов Ю.В., Афанасьев М.Я. Интеллектуальная лазерная головка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 3. С. 559–563. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-559-563

### Аннотация

Рассмотрены вопросы создания интеллектуальной лазерной головки для работы в составе автоматизированного технологического оборудования с числовым программным управлением. Приведены основные задачи, решаемые подобными устройствами и способы их решения. Представлен ряд аналогичных установок, произведен их анализ и сравнение. Показаны основные виды возможных искажений пятна контакта при лучевой обработке заготовок с поверхностью произвольной формы, а также основные причины их возникновения и способы их интерпретации при математической обработке. Рассмотрена оптико-механическая схема интеллектуальной головки, предназначенная для компенсации подобных искажений при работе в составе технологического оборудования.

### Ключевые слова

лазерная обработка, технологическое оборудование, системы технического зрения, компенсация вибрации, оптическая система

## SMART LASER HEAD

Yu.V. Fedosov<sup>a,b</sup>, M. Ya. Afanasev

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> JSC “Russian Institute for Power Radio Engineering”, Saint Petersburg, 199048, Russian Federation

Corresponding author: yf01@yandex.ru

### Article info

Received 27.03.17, accepted 22.04.17

doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-559-563

Article in Russian

**For citation:** Fedosov Yu.V., Afanasev M.Ya. Smart laser head. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 559–563 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-3-559-563

### Abstract

We consider the issues of creating a smart laser head for operation as a part of automated industrial equipment with computer numerical control. The paper deals with the main tasks solved by such devices and methods for their solution. A number of similar apparatus is examined; comparative analysis is carried out to compare performance and drawbacks. The main types of possible distortions of the contact spot for laser processing of a free-form surface are considered, as well as the main causes of their appearance and the ways of their interpretation during mathematical processing. Also, we have studied the smart head optical-mechanical circuit, designed for compensation of such distortions when working as a part of the technological equipment.

### Keywords

laser processing, industrial equipment, machine vision, shake compensation, optical system

Рассматривая тенденции развития современного производства, нельзя не отметить появление новых типов технологического оборудования, осуществляющего работу с источниками мощного светового излучения. К их числу можно отнести системы построения изображения, считывания и записи информации, установки, осуществляющие работу с лазерным излучением, а также различное лабораторное оборудование. В особенности такие устройства получили свое широкое распространение в обрабатывающей промышленности, находя свое применение для лазерной резки и сварки, в установках фотолитографии и быстрого прототипирования, контрольно-измерительных машинах, маркировщиках, и т.п.

В связи с повышением степени автоматизации оборудования к подобным устройствам предъявляются повышенные требования по автоматизации в целом, в частности, такие устройства все чаще оснащаются дополнительными камерами, системами технического зрения, получают возможности автоматической фокусировки и стабилизации луча, а также отслеживают свое состояние и имеют возможность быстрой переналадки рабочего режима, например, изменения формы пятна или отслеживания формы поверхности.

В настоящей работе рассмотрена автоматизированная головка, осуществляющая лазерную обработку поверхностей произвольной формы и обладающая расширенными возможностями контроля рабочего процесса, самокалибровки и наладки. Головка предназначена для использования в составе интеллектуального технологического оборудования [1–4]. Обсуждаемые конструктивные особенности сравнены с имеющимися техническими решениями, оценены их основные параметры, общие элементы и конструктивные недостатки. Рассматриваемое оборудование относится к классу холонических систем, т.е. состоит из совокупности программно-аппаратных модулей (голонов), связанных между собой посредством открытого интерфейса, позволяющего им оставаться автономными, но способными общаться с другими модулями по сети в случае необходимости. Данный подход при проектировании систем числового программного управления называется интероперабельностью и находит все большее применение при разработке киберфизических производственных систем.

Существующие технологические системы для обработки излучением, как правило, представляют собой роботизированные средства, перемещающие вдоль заданной траектории обработку лазерную головку, которая включает в себя источник лазерного излучения либо средства передачи лазерного излучения, набор датчиков, позволяющих отслеживать различные параметры работы, а также средства управления, позволяющие задавать различные режимы работы. Такая конструкция приведена, в частности, в [5]. Здесь же рассмотрен вариант конструктивного исполнения, который реализует принцип работы автоматизированной лазерной головки, приведено описание ее алгоритмов работы и описание аппаратной части.

В ходе работы оборудования может возникать необходимость смены режима работы или компенсации случайной вибрации, которая может иметь источник, не устранимый обычными виброизоляторами. Например, источником вибрации может быть уличное движение. Конструкции, решающие задачу компенсации вибрации оптических систем, разрабатываются достаточно давно и представлены, например, в каталогах [6, 7]. Так, в [6] рассмотрены варианты конструктивного исполнения, которые реализуют принцип работы различных видов систем стабилизации изображения, а в [7] приведено описание алгоритмов работы, математических моделей, электрические схемы и описание аппаратной части.

Патентный анализ и анализ литературы показали, что на сегодняшний день существует ряд устройств, реализующих одну или несколько возможных конструктивных особенностей, однако наиболее близкими аналогами предлагаемого устройства являются устройство, предназначенное для отслеживания процесса лазерной сварки и корректировки фокусировки и положения луча [8], и роботизированная лазерная головка [9]. Подробное описание устройств приведено в [8, 9].

Первое устройство содержит одну или несколько камер, средства фокусировки луча и компьютерную систему, осуществляющую обработку изображений, захваченных камерой, а также выработку команд на фокусировку. Захват и обработка изображений осуществляется непосредственно в ходе выполнения технологической операции – сварки, и в случае, если происходит отклонение внешних характеристик места сварки от заданных, производится корректировка фокусировки пятна. При этом для обработки изображения используется искусственный интеллект, построенный на базе обучающейся нейросети.

Второе устройство содержит линзу и источник излучения. При этом линза расположена в телескопической раме, состоящей из двух частей. На головке размещены средства для определения расстояния до обрабатываемой поверхности и средства предотвращения столкновения телескопической рамы с обрабатываемой поверхностью, посылающие команду на аварийную остановку работы. Заявляется, что за счет изменения положения линзы и, как следствие, изменения фокусного расстояния можно обрабатывать поверхность с переменной высотой, а также производить подстройку фокусного расстояния по фактическому расстоянию до поверхности.

Однако устройство [8] не имеет возможности отслеживания самого пятна лазера – вместо этого отслеживается пятно обработки. Кроме того, устройство предназначено для работы только в двухмерной плоскости, и, как следствие, не учитывается, что изменение фокусировки и формы пятна может быть вызвано не только неверной установкой детали, но и может возникнуть при обработке поверхности с переменной высотой и углом наклона. К числу недостатков устройства [9] можно отнести то, что оно предназначено только для работы с плоскостью, постоянно перпендикулярной оптической оси системы, и не учитывает, что вследствие случайной вибрации может не только изменяться фокусное расстояние (высота до поверхности), но и наблюдаться отклонение луча от места обработки по двум другим осям. Все это ограничивает область применения устройств [8, 9].

Предлагаемая интеллектуальная лазерная головка содержит основание, на котором размещены источник лазерного излучения, фокусирующая система с элементом подстройки хода луча и две камеры.

Обе камеры осуществляют захват пятна. При этом каждая из камер развернута в двух плоскостях так, что захваченное изображение с нее позволяет однозначно установить факт отклонения пятна от первоначальной формы. Вследствие того, что камера развернута в двух плоскостях, возможна фиксация формы пятна, а также относительное увеличение или уменьшение поперечных размеров пятна. За счет использования математических методов обработки изображения, захватываемого с камер, становится возможным вычислять величину расфокусировки системы, а также отклонение формы поверхности от заданной как причину изменения формы пятна.

В отличие от устройств [8, 9], фокусирующая система с элементом подстройки хода луча может не только изменять размер пятна, осуществляя фокусировку, но также изменять форму пятна таким образом, что при его проецировании на обрабатываемую поверхность с отклонением от плоскости форма пятна будет близка к первоначальной. Привод фокусирующей системы с элементом подстройки хода луча может осуществляться с помощью шаговых двигателей с парами винт-гайка, либо с помощью пьезоприводов.

В качестве источника лазерного излучения используется лазерный блок на основе ультрафиолетового твердотельного лазера с диодной накачкой, соединенный с интеллектуальной головкой оптическим волокном. Длина волны источника – 423 нм, мощность – 1 Вт. Лазерный блок состоит из трех основных модулей: системы отклонения лазерного луча, ловушки лазерного луча и системы контроля параметров лазерного блока. Система отклонения лазерного луча включает в себя подвижное призматическое зеркало и сферическое рассеивающее зеркало. Подвижное зеркало либо пропускает излучение от источника в волокно, либо отклоняет его на сферическое зеркало и в оптическую ловушку. Рассеивающее зеркало необходимо, так как в противном случае поглощающая поверхность оптической ловушки изнашивается неравномерно. Ловушка представляет собой открытый цилиндр с конической полостью, в которой располагается конический элемент, обращенный своим острием наружу в сторону подводимого излучения. Для улучшения эффекта поглощения предлагается специальная форма микрогеометрии всей внутренней поверхности ловушки [10].

Волокно изготавливается из кварцевого стекла, торцы волокна просветлены. Длина волокна может варьироваться в довольно широком диапазоне, что позволяет использовать наиболее выгодную механической схеме сопряжения оптического блока и головки. В процессе экспериментов с интеллектуальной головкой было использовано волокно длиной 340 мм. Диаметр волокна составлял 1200 мкм, измеренная апертура волокна  $NA = 0,11$ . Для фокусировки лазерного излучения при данных параметрах волокна используется оптика из кварцевого стекла. По результатам экспериментов диаметр светового пятна на выходе оптической системы находится в диапазоне 200–300 мкм, при этом значение получаемой мощности составляет 2,5 Вт/мм<sup>2</sup>.

Схема, поясняющая взаимное расположение системы фокусировки луча и камер интеллектуальной лазерной головки, приведена на рис. 1.

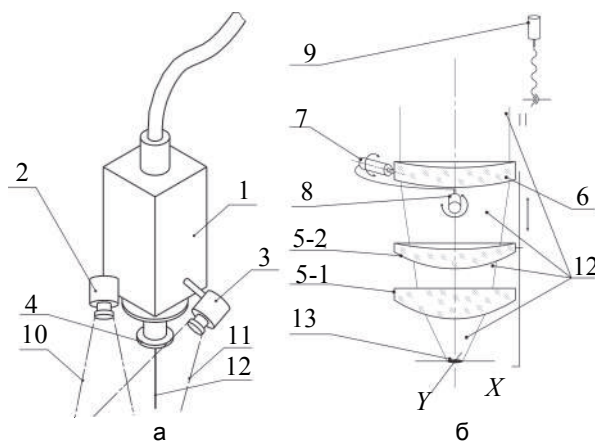


Рис. 1. Схема расположения системы фокусировки луча и камер интеллектуальной лазерной головки:

1 – корпус; 2, 3 – камеры; 4 – система фокусировки и стабилизации; 5 – фокусирующие линзы, 6 – элемент оптической компенсации; 7, 8 – приводы элемента оптической компенсации; 9 – привод фокусировки; 10, 11 – поле зрения камер; 12 – луч лазера (показан упрощенно); 13 – место фокусировки луча (контролируемое пятно): автоматизированная лазерная головка (а); система фокусировки (б)

Автоматизированная лазерная головка (рис. 1, а) содержит неподвижное основание 1, камеры 2 и 3 и систему фокусировки 4. Система фокусировки (рис. 1, б) состоит из сборки с линзами 5 и элемента подстройки хода луча 6. При этом элемент подстройки хода луча имеет возможность вращения в двух плоскостях относительно своего начального положения и приводится в действие пьезоприводами 7 и 8. Фокусировка осуществляется посредством перемещения сборки с линзами 5 в направляющих вдоль главной оптической оси посредством двигателя 9. Также механизм перемещения сборки с линзами может

быть выполнен в виде шариковинтовой пары или линейного привода, приводиться в действие шаговым двигателем и т.п. Вся система находится под управлением встроенного контроллера.

Камеры 2 и 3 размещены с наклоном в двух плоскостях, при этом поле зрения 10 камеры 2 и поле зрения 11 камеры 3 таковы, что камеры 2 и 3 захватывают проекцию луча 12, круглое пятно 13, на обрабатываемую поверхность (рис. 2). Отметим, что на рис. 2, а–г, представлены только основные виды искажений изображения. Прочие искажения являются их комбинацией, как это показано на рис. 2, д, е. При этом причиной расфокусировки является изменение расстояния до обрабатываемой поверхности за счет либо удаления, либо приближения поверхности (рис. 3). На рис. 4 изображены проекции искажения пятна вдоль оси вследствие наклона поверхности.

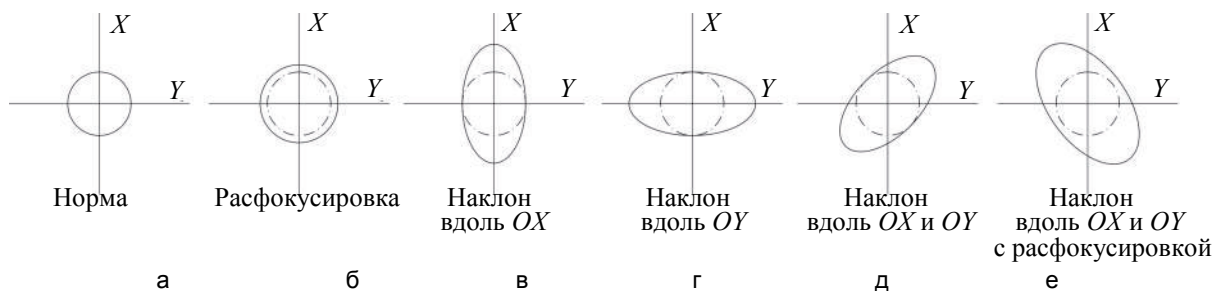


Рис. 2. Возможные искажения пятна контакта

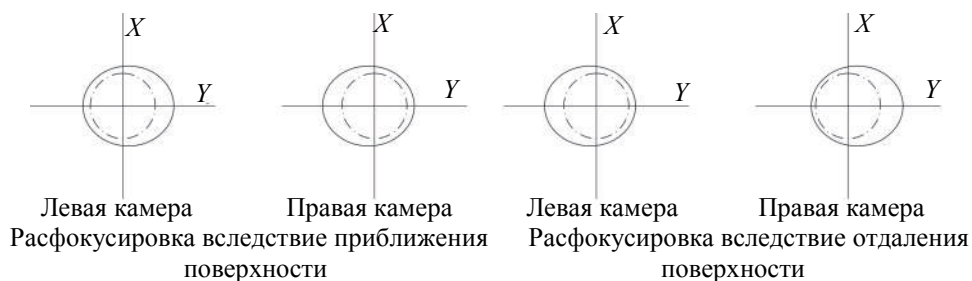


Рис. 3. Искажения вследствие расфокусировки

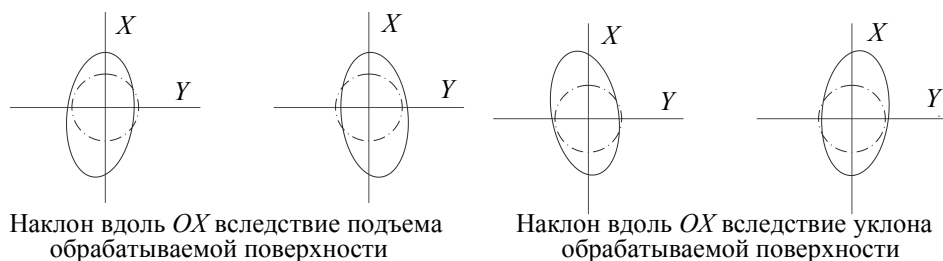


Рис. 4. Искажения вследствие подъема и уклона

Работа устройства происходит следующим образом (рис. 1, а, б). Исходное положение устройства – над эталонной плоскостью. Вначале на контроллер, камеры и приводы подается напряжение, и включается источник лазерного излучения. Изображение с камер обрабатывается контроллером, после чего зафиксированные форма и размеры пятна заносятся в память контроллера и сравниваются с эталонными. Если они отличаются от эталонных, производится автоматическая подстройка оптической системы: при помощи приводов 7 и 8 и двигателя 13 перемещается сборка с линзами 5 и элемент подстройки хода луча 6. В результате форма пятна 12 максимально приближается к эталонной. Затем источник лазерного излучения выключается. Далее при помощи механизма станка устройство перемещается в рабочую зону, источник лазерного излучения включается, и происходит считывание изображения с камер 2 и 3.

Зафиксированные форма и размеры пятна 9 заносятся в память контроллера и сравниваются с эталонными. Если выявляется различие, устройство вновь осуществляет автоматическую подстройку формы пятна и фокусного расстояния. В результате форма пятна максимально приближается к эталонной. Далее устройство при помощи механизма станка перемещается вдоль траектории обработки, при этом постоянно происходит считывание изображения с камер. Зафиксированные форма и размеры пятна заносятся в память контроллера и сравниваются с эталонными. В случае различий устройство осуществляет подстройку оптической системы.

В результате за счет использования математических методов обработки изображения и соответствующих считанным с камер перемещений элементов оптической системы пятно постоянно

остаётся сфокусированным и спроецированным в изначальную форму. Подобная схема работы не требует участия дополнительных настроек, позволяя устройству принимать решение о подстройке оптической схемы самостоятельно, что повышает степень его автоматизации.

С точки зрения системы управления лазерная головка представляет собой программно-аппаратный модуль, построенный на базе микроконтроллера Cortex-M4 с операционной системой FreeRTOS. Модуль автономен и самостоятельно обрабатывает все нештатные ситуации с передачей соответствующих сигналов в сеть; он имеет внутреннее хранилище для размещения базы данных, в которой хранятся журнал событий и компоненты пользовательского интерфейса.

Таким образом, за счет дополнения оптической схемы устройства элементом подстройки хода луча и использования двух камер с соответствующим алгоритмом обработки изображения достигается возможность увеличения степени автоматизации, а введение в оптическую схему устройства дополнительного элемента подстройки хода луча позволяет снизить влияние возникающей в процессе работы вибрации на оптическую систему. При этом устройство, в отличие от рассмотренных ранее, может не только компенсировать вибрацию, но, за счет использования пьезопроводов, оперативно выполнять подстройку рабочего режима, например, изменение формы пятна либо фокусного расстояния.

### Литература

1. Афанасьев М.Я., Грибовский А.А. Концепция адаптивной платформы технологического оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 4. С. 268–272. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272
2. Федосов Ю.В., Афанасьев М.Я. Устройство для обработки лазерным излучением поверхности объекта произвольной формы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 1. С. 191–195. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-191-195
3. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В. Устройство для обработки лазерным излучением поверхности произвольной формы. Патент РФ № 161667. Бюл. 2016. № 12.
4. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В. Оптико-механическая система. Патент РФ № 2583163. Бюл. 2016. № 13.
5. Cieszyński W., Zięba M., Reiner J. Real time trajectory correction system of optical head in laser welding // Acta Mechanica et Automatica. 2015. V. 9. N 4. P. 265–269. doi: 10.1515/ama-2015-0042
6. FUJIFILM Corporation. Fujilm x-mount lenses and accessoires [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.fujifilm.com/products/digital\\_cameras/pdf/lenses\\_accessories\\_catalogue\\_01.pdf](http://www.fujifilm.com/products/digital_cameras/pdf/lenses_accessories_catalogue_01.pdf), свободный, яз. англ. (дата обращения 24.03.2017).
7. Sachs D., Nasiri S., Goehl D. Image stabilization technology overview [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.digikey.com/en/pdf/i/invensense/image-stabilization-technology>, свободный, яз. англ. (дата обращения 13.03.2017).
8. Wersborg I.S.G. Method and device for monitoring a laser processing operation to be performed on a workpiece and laser processing head having such a device. Patent US 20110284512A1, publ. 24.11.2011.
9. Hermann G.F., Leybzun M.S. Robotically operated laser head. Patent WO2000054925 A1, publ. 21.09.2000.
10. Афанасьев М.Я., Федосов Ю.В., Немкова А.А. Некоторые особенности конструирования силовых оптических блоков для технологического оборудования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 2. С. 244–250. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-244-25

### Авторы

**Федосов Юрий Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, ОАО «Российский институт мощного радиостроения», Санкт-Петербург, 199048, Российская Федерация, yf01@yandex.ru

**Афанасьев Максим Яковлевич** – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, amax@niuitmo.ru

### References

1. Afanasev M.Ya., Gribovsky A.A. Concept of adaptive platform of technological equipment. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 268–272. doi: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-268-272
2. Fedosov Yu.V., Afanasev M.Ya. Apparatus for surface treatment of free-form object by laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 191–195. doi: 10.17586/2226-1494-2017-17-1-191-195
3. Afanasev M.Ja., Fedosov Ju.V. *Apparatus for Laser Radiation Machining of Surface of Arbitrary Form*. Patent RU161667, 2016.
4. Afanasev M.Ja., Fedosov Ju.V. *Optical-Mechanical System*. Patent RU 2583163, 2016.
5. Cieszyński W., Zięba M., Reiner J. Real time trajectory correction system of optical head in laser welding. *Acta Mechanica et Automatica*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 265–269. doi: 10.1515/ama-2015-0042
6. FUJIFILM Corporation. Fujilm x-mount lenses and accessoires. Available at: [http://www.fujifilm.com/products/digital\\_cameras/pdf/lenses\\_accessories\\_catalogue\\_01.pdf](http://www.fujifilm.com/products/digital_cameras/pdf/lenses_accessories_catalogue_01.pdf) (accessed 24.03.2017).
7. Sachs D., Nasiri S., Goehl D. Image stabilization technology overview. Available at: <http://www.digikey.com/en/pdf/i/invensense/image-stabilization-technology> (accessed 13.03.2017).
8. Wersborg I.S.G. *Method and device for monitoring a laser processing operation to be performed on a workpiece and laser processing head having such a device*. Patent US 20110284512A1, 2011.
9. Hermann G.F., Leybzun M.S. *Robotically operated laser head*. Patent WO2000054925 A1, 2000.
10. Afanasyev M.Ya., Fedosov Yu.V., Nemkova A.A. Designing features of power optical units for technological equipment. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 244–250, doi:10.17586/2226-1494-2016-16-2-244-250

### Authors

**Yuri V. Fedosov** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; engineer, JSC “Russian Institute for Power Radio Engineering”, Saint Petersburg, 199048, Russian Federation, yf01@yandex.ru

**Maxim Ya. Afanasev** – PhD, Associate professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, amax@niuitmo.ru