

УДК 681.5.08

Ю. Л. Караваев, кандидат физико-математических наук  
А. В. Клековкин, аспирант  
С. К. Лесин, магистрант  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ В НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ<sup>1</sup>

В статье рассматривается мультисенсорная информационно-измерительная система для реализации движения в недетерминированной среде на примере высокоманевренного мобильного робота с омниколесами. Приведены алгоритмы распознавания и исключения столкновения с динамическими препятствиями. Получена экспериментальная оценка разработанных алгоритмов для автономного движения мобильного робота по заданному маршруту.

**Ключевые слова:** мобильный робот, Kinect, лидар, БИНС, система технического зрения, недетерминированная среда.

### Введение

Степень автономности современных робототехнических систем определяется их способностью идентификации объектов окружающей среды и возможностью их самолокализации в недетерминированных условиях. На сегодняшний день известно несколько способов решения подобных задач [1], но их успешность напрямую зависит от идеальности условий и стоимости подобных систем. Так, стоимость только сенсорной части известных автономных транспортных средств (например, беспилотных автомобилей) составляет десятки миллионов рублей, что существенно препятствует их широкому распространению. Именно поэтому в последнее время появилось большое количество работ, посвященных разработке алгоритмов автономного движения с использованием относительно недорогой элементной базы (см. работы [2–4] и их библиографию). В работе [5] предлагается функциональная схема мобильного робота и достаточно простой алгоритм распознавания и объезда препятствий по пересеченной местности, однако не проведены экспериментальные исследования.

В настоящее время существует большое количество модификаций метода одновременной локализации и построения карты (SLAM от англ. *Simultaneous Localization and Mapping*), адаптированного для различных сенсорных систем. Но в основе всех модификаций SLAM лежит итеративный алгоритм ближайших точек (ICP от англ. *Iterative Closest Point*). Описание алгоритма ICP и его распространенных вариаций представлено в работе [6].

В данной работе представлено описание мультисенсорной информационно-измерительной системы (МСИИС) мобильного робота (МР), состоящей из однолучевого лазерного сканера, оптического сенсора Kinect и датчика ориентации на основе MEMS акселерометра, гироскопа и магнетометра. Также приведены результаты экспериментальных исследований алгоритма объезда препятствий, появляющихся на пути следования омниколесного мобильного робота.

### Описание мультисенсорной информационно-измерительной системы мобильного робота

Разрабатываемая МСИИС является бюджетным решением для задачи локализации МР и распознавания возможных динамических препятствий. Ее схема приведена на рис. 1.

Ядром системы является одноплатный компьютер Gigabyte N3050N-D2P под управлением операционной системы Windows 10. Одноплатный ПК осуществляет сбор и обработку информации со всех сенсоров, на основании которой в последствие формируется управляющее воздействие для контроллера управления приводами робота.

В состав МСИИС входят: оптическая камера глубины Kinect 2.0, однолучевой лазерный датчик расстояния RPLidar – 360 Laser, модуль ориентации UM7. Kinect оснащен несколькими видами сенсоров, а именно: VGA-камера с разрешением до 1280×1024, сенсор глубины (до 4,5 м, угол обзора 70°), на основании которого строятся 2D- и 3D-карты, массив из четырех микрофонов – для локализации источников звука. Лидар представляет собой однолучевой лазерный датчик расстояния с углом обзора 360° для измерения расстояния до объектов (в диапазоне от 0,05 до 6,5 м) в плоскости лазерного излучателя с частотой 5 Гц. Модуль ориентации состоит из микромехатронных датчиков (MEMS) трехкомпонентного гироскопа (с диапазонами измерения угловых скоростей ± 2000 с<sup>-1</sup>), трехкомпонентного акселерометра (с диапазонами измерения ускорения ±16 g), магнитометра (± 8,1 гаусс). При использовании этих датчиков в связке, а именно, после преобразования с помощью комбинированного фильтра и фильтра Калмана система управления определяет ориентацию и перемещение мобильного робота. Несмотря на то, что технические характеристики всех сенсоров измерительной системы имеют существенные ограничения, за счет комбинирования информации с разных сенсоров предлагаемая система позволяет быстро и однозначно идентифицировать объекты окружающей среды робота. Фото МСИИС, установленной на высокоманевренном омниколесном МР, приведена на рис. 2.

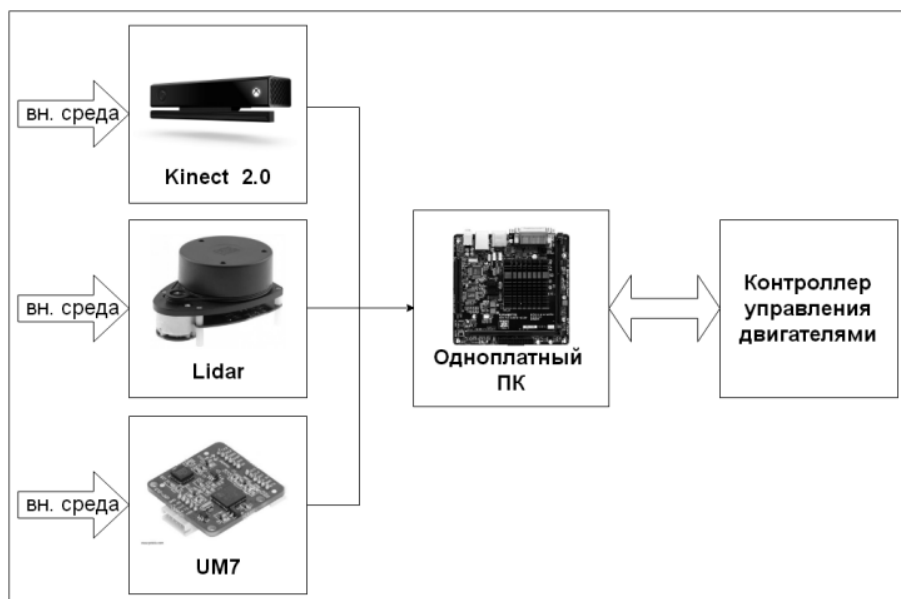


Рис. 1. Структурная схема МСИИС

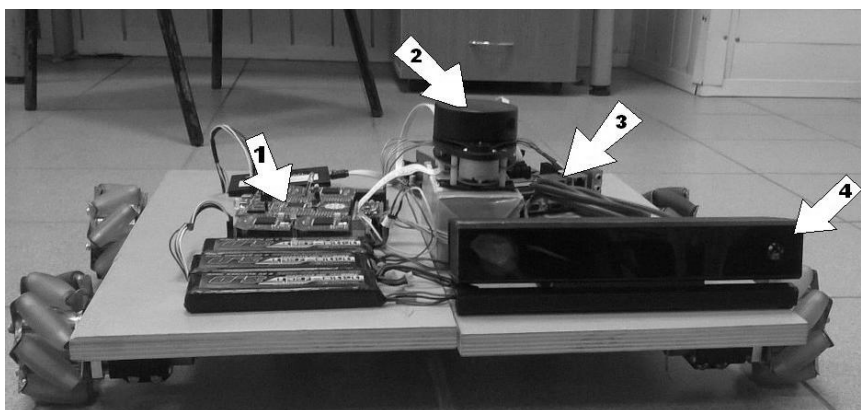


Рис. 2. Фото мобильного робота с МСИИС: 1 – контроллер управления двигателями с модулем ориентации UM-7; 2 – лидар; 3 – одноплатный компьютер; 4 – Kinect 2.0

Мобильный робот, на котором установлена МСИИС, представляет собой сочлененную платформу (состоящую из двух полуплатформ), к которой крепятся омниколеса типа Mecanum [7, 8] (ролики на колесах расположены под углом  $45^\circ$  к оси колеса) с приводами. Индивидуальное оснащение каждого из колес своим приводом дает возможность задавать самые разнообразные сочетания направлений и скоростей вращения колес. Это в сочетании с особенным строением колес позволяет реализовать достаточно сложные перемещения мобильного робота на плоскости, что облегчает задачу управления для объезда динамических препятствий. На каждом приводе колеса установлен датчик обратной связи (энкодер), с помощью которого достигается вращение колеса с заданной скоростью.

Управление роботом осуществляется в рамках кинематической модели, описание и подробный вывод которой можно найти в работах [9–11]. В данной работе мы ограничимся рассмотрением прямолинейных траекторий движения омниколесного робота.

#### Алгоритм построения карты проходимости для реализации движения мобильного робота

Задачу предотвращения столкновений МР с объектами окружающей среды можно разделить на две подзадачи: определение находящихся перед роботом препятствий и построение маршрута передвижения в обход препятствий. Для решения первой подзадачи необходимо выполнить следующие действия:

1. Получить карту глубины с сенсоров Kinect.
2. Выделить в карте глубины точки, представляющие интересующую нас информацию (возможно, являющиеся препятствиями).
3. Перенести выбранные точки из пространства карты глубины в пространство камеры (декартово пространство с центром в геометрическом центре сенсора Kinect).
4. Провести квантование пространства камеры с заданным разрешением и по найденным точкам в пространстве камеры определить элементы пространства, которые содержат непроходимые для робота препятствия.

5. Перенести данные препятствия на глобальную карту местности, построенную по данным с лидара и с учетом ориентации робота.

Получение карты глубины выполняется сенсором Kinect и представляет собой растр, каждая точка которого содержит информацию о глубине сцены. Глубина кодируется беззнаковыми 16-битовым значениями. Другими словами, каждый пиксель растра глубины содержит расстояние в декартовых координатах от плоскости виртуальной камеры сенсора до ближайшей точки объекта по заданным координатам  $(x, y)$  плоскости растра.

Задачу распознавания объектов можно существенно упростить, не учитывая высоту и форму объектов в вертикальной плоскости. Для этого достаточно осуществлять поиск препятствия не по всему кадру в вертикальной плоскости, а только на одной

линии, расположенной на определенной высоте от пола. В наших экспериментах эта высота определялась высотой МР.

Для сокращения объемов обрабатываемой информации и упрощения процедуры поиска пути проводится квантование пространства в горизонтальной плоскости. При этом шаг квантования определяется габаритами робота и особенностями алгоритма поиска пути. В соответствии с шагом квантования формируется сетка, на которой размещаются точки, представляющие собой препятствие в области видимости сенсора. После выполнения данной процедуры несложно определить клетки, занятые препятствиями, клетки, скрытые от робота данными препятствиями, а также клетки, свободные для прокладки по ним маршрута движения МР (см. рис. 3).

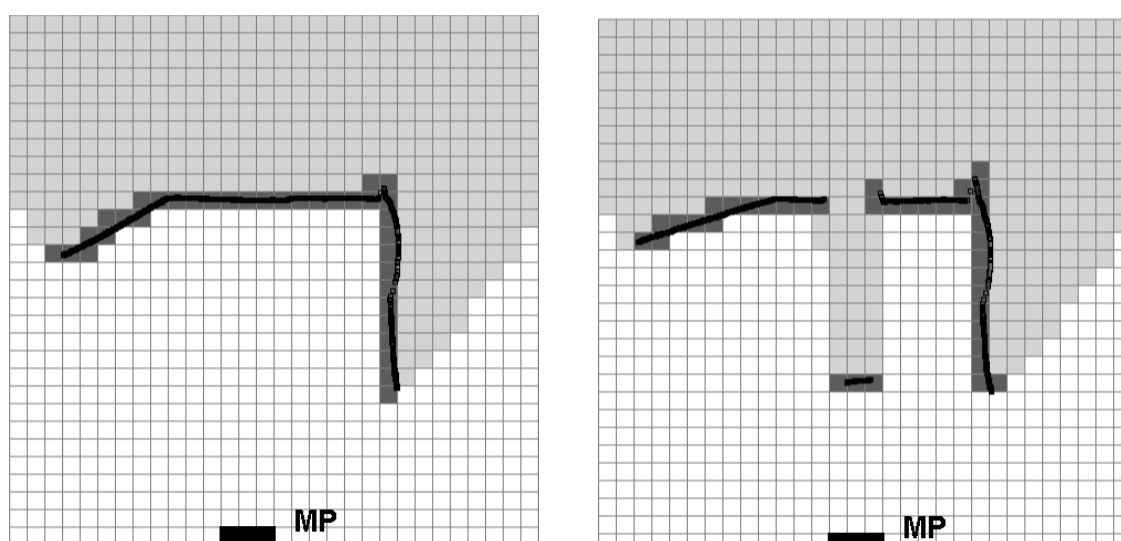


Рис. 3. Карта препятствий, сформированная по данным карты глубины с сенсора Kinect. Белым цветом показаны клетки, являющиеся областями свободными для движения; серым – клетки области непроходимы; черным цветом – контур препятствий, определенный сенсором (размер одной клетки 0,2×0,2 м)

В примере, представленном на рис. 3, видно, что в случае если размер появившегося объекта меньше 20 см, область, в которой он находится, помечается непроходимой. Непроходимыми также являются клетки за объектом до момента уточнения, которое происходит при попадании объекта в поле зрения МСИИС под другим углом.

#### Экспериментальная оценка траектории движения мобильного робота в недетерминированных условиях

Для экспериментальной апробации предложенного алгоритма рассмотрим задачу объезда препятствий, возникающих на пути следования МР по заданному в виде прямой маршруту. В случае появления на пути робота препятствия он объезжает его в автоматическом режиме или ожидает, когда объект удалится с планируемого маршрута движения, при этом расстояние до объекта не должно быть меньшим 20 см. Схема маршрута движения показан на рис. 4, а.

Построение маршрута объезда препятствия осуществляется выбором по принципу наименьшего действия областей (клеток) на карте препятствий, построенной с помощью МСИИС. На рис. 4, б показана траектория движения мобильного робота при объезде динамического препятствия (человека), появившегося на пути движения МР. Экспериментальная траектория восстановлена с помощью системы захвата движения (Motion Capture) по маркерам, которые также устанавливались на МР. Пунктирной линией на рис. 4, б показана траектория, построенная по результатам численного моделирования системы уравнений, описывающих кинематику МР [13]. Управляющие воздействия (угловые скорости вращения колес), необходимые для выполнения маневров для объезда препятствий сведены в таблицу. Знак «←→» означает смену направления вращения.

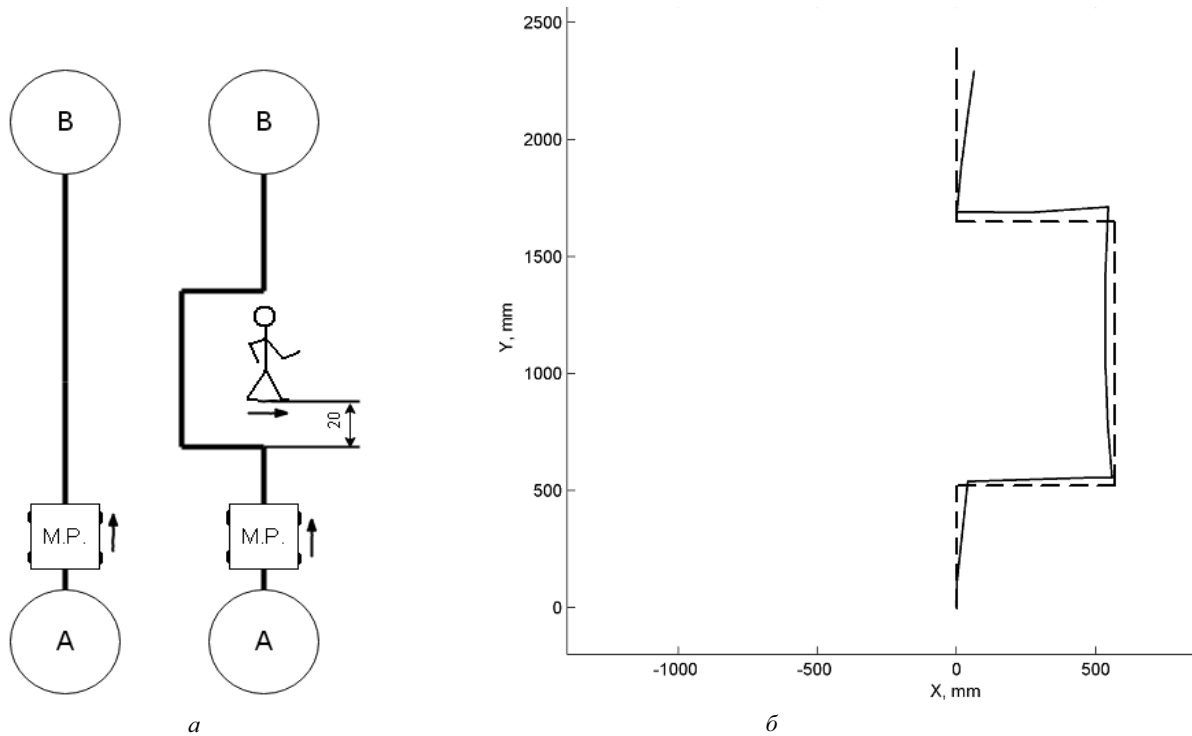


Рис. 4. Траектория движения МР: а – следование по прямолинейному маршруту от А до В и схема объезда препятствия; б – полученная при проведении натурального эксперимента (пунктирной линией показана траектория, построенная по теоретической модели [12])

**Управляющие воздействия для реализации базовых маневров**

Управляющие воздействия	Движение «вперед»	Движение «назад»	Движение «влево»	Движение «вправо»
$\omega_1$	70 об/мин	-70 об/мин	-70 об/мин	70 об/мин
$\omega_2$	70 об/мин	-70 об/мин	-70 об/мин	70 об/мин
$\omega_3$	70 об/мин	-70 об/мин	70 об/мин	-70 об/мин
$\omega_4$	70 об/мин	-70 об/мин	70 об/мин	-70 об/мин

Пример графического представления данных, полученных с лидара, приведен на рис. 5. Благодаря большому углу обзора лидара по сравнению с Kinect система управления определяет возможное появле-

ние объекта на пути следования, а также скорость его движения. Полученные данные также учитываются при прокладке маршрута, исключающего столкновение с препятствиями.

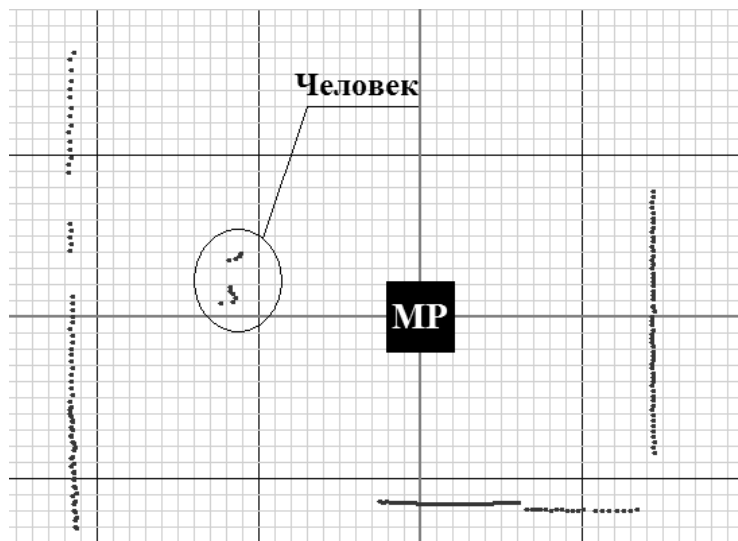


Рис. 5. Визуализация данных с лидара МСИИС мобильного робота, при появлении в зоне видимости человека

Отклонение экспериментальной траектории движения от теоретической (см. рис. 4, б) вызвано использованием кинематической модели для управления, хотя в реальности необходимо учитывать разгон робота из состояния покоя до заданной скорости и его последующую остановку, а также инерционность при мгновенном изменении управляющего воздействия. Данная проблема может быть решена с использованием динамической модели для расчета управляющих воздействий [14, 15], а также алгоритмов стабилизации мобильного робота при движении [16, 17].

#### Заключение

Разработанная мультисенсорная информационно-измерительная система является недорогим техническим решением, позволяющим повысить автономность МР. Представленный в работе алгоритм выделения объектов и построения карты проходимости (объезда препятствий) на основе квантования раstra МСИИС позволил сократить объем вычислений, что снижает требования к вычислительной системе и емкости аккумуляторов, что для МР является особенно актуальным. Дальнейшая работа будет направлена на адаптацию МСИИС для управления движением МР других конструкций, а также разработку алгоритмов построения маршрутов движения при большом количестве подвижных объектов с нелинейным характером движения.

#### Библиографические ссылки

1. *Lozano-Perez T.* Autonomous robot vehicles. – Springer Science & Business Media, 2012.
2. *Kamarudin K. et al.* Performance Analysis of the Microsoft Kinect Sensor for 2D Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Techniques // *Sensors*. 2014. Т. 14. № 12. С. 23365–23387.
3. *Oliver A. et al.* Using the Kinect as a navigation sensor for mobile robotics // *Proceedings of the 27th Conference on Image and Vision Computing New Zealand*. – ACM, 2012. – С. 509–514.
4. *Yeon A. S. A. et al.* Feasibility analysis of 2D-SLAM using combination of Kinect and laser scanner // *Jurnal Teknologi*. – 2015. – Т. 76. № 12.
5. *Евстигнеев М. И., Литвинов Ю. В., Мазулина В. В., Мищенко Г. М.* Алгоритмы управления четырехколесным роботом при движении по пересеченной местности // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2015. – Т. 58, № 9. – С. 738–741.
6. *Абрамов А. И., Абрамов И. В., Мазитов Т. А.* Модификация алгоритма ИСР путем внедрения коэффициента усиления для ускорения совмещения двумерных облаков точек // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2016. – № 2 (29). – С. 4–9.
7. *Борисов А. В., Килин А. А., Мамаев И. С.* Тележка с омниколесами на плоскости и сфере // *Нелинейная динамика*. – 2011. – Т. 7; № 4. – С. 785–801.
8. *Караваяев Ю. Л., Килин А. А.* Динамика сфероробота с внутренней омниколесной платформой // *Нелинейная динамика*. – 2015. – Т. 11; № 1. – С. 187–204.
9. *Борисов А. В., Килин А. А., Мамаев И. С.* Тележка с омниколесами на плоскости и сфере // *Нелинейная динамика*. – 2011. – Т. 7; № 4. – С. 785–801.
10. *Килин А. А., Бобыкин А. Д.* Управление тележкой с омниколесами на плоскости // *Нелинейная динамика*. – 2014. – Т. 10; № 4. – С. 473–481.
11. *Караваяев Ю. Л., Трефилов С. А.* Дискретный алгоритм управления по отклонению мобильным роботом с омниколесами // *Нелинейная динамика*. – 2013. – Т. 9; № 1. – С. 91–100.
12. Там же.
13. *Клековкин А. В.* Управление учебным высокоманевренным роботом с омниколесами // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. Ижевск, 22–23 апреля 2015 г.* – С. 181–186.
14. *Борисов А. В., Килин А. А., Мамаев И. С.* Тележка с омниколесами на плоскости и сфере // *Нелинейная динамика*. – 2011. – Т. 7; № 4. – С. 785–801.
15. *Килин А. А., Бобыкин А. Д.* Управление тележкой с омниколесами на плоскости // *Нелинейная динамика*. – 2014. – Т. 10; № 4. – С. 473–481.
16. *Андреев А. С., Перегудова О. А.* Об управлении движением колесного мобильного робота // *ПММ*. – 2015. – 79 (4). – С. 451–462.
17. *Андреев А. С., Перегудова О. А.* Синтез робастных алгоритмов стабилизации программных движений мобильного робота с омниколесами методом вектора-функции Ляпунова // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2015. – 16(12). – С. 813–821.

\*\*\*

*Yu. L. Karavayev*, Kalashnikov ISTU  
*A. V. Klekovkin*, Post-graduate, Kalashnikov ISTU  
*S. V. Lesin*, Master's degree student, Kalashnikov ISTU

#### Multisensory information and measurement system of mobile robot for implementation of motion in non-deterministic environment

*The paper presents a multisensory system for motion in a non-deterministic environment by the example of the high manoeuvrable mobile omnicycle robot. Algorithms of recognition and collision prevention with dynamic objections are described. Experimental estimation of developed algorithms for autonomous moving of the mobile robot on the required path is obtained.*

**Keywords:** mobile robot, Kinect, lidar, computer vision system, non-deterministic environment.

Получено: 02.12.16