УДК 004.415.25

Р.А. Файзрахманов, А.Ф. Хабибулин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА ОПЕРАТОРА ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

Представлена разработка тренажерного комплекса оператора портального крана, предназначенного для обучения и отработки оператором практических навыков в погрузочно-разгрузочных операциях в режиме реального времени. Объектом имитации стал широко распространенный в России портальный кран «Альбатрос».

Рассмотрены проблема подготовки машинистов крана и задача их обучения с помощью компьютерных тренажеров, поскольку обучение с помощью реальных кранов трудозатратно из-за неэффективной их эксплуатации. Рассмотрен электронный тренажер для подготовки крановщиков портальных кранов, разработанный в Пермском политехническом университете, его функционал, выделены его недостатки. Разработана и описана модульная архитектура программного обеспечения разрабатываемого тренажерного комплекса нового поколения. Она состоит из следующих модулей: ядро тренажерного комплекса, которое связывает все остальные модули; среда визуализации, отвечающая за создание и качественную визуализацию окружения порта и рабочего места оператора; модуль физико-математического моделирования; автоматизированная обучающая система; устройства управления, представленные виде реальных пультов крана; устройства вывода. Также в работе рассмотрена сетевая архитектура тренажерного комплекса, представленная в виде рабочего места обучаемого (выполнение различного рода упражнений, отработка навыков управления краном) и места инструктора (выбор и создание учебной обстановки на рабочем месте обучаемого, наблюдение за обучаемым), объединенных друг с другом в локальную сеть. В тренажерном комплексе реализована автоматизированная обучающая система, отличительной особенностью которой является использование аппарата нечеткой логики для оценки выполнения комплекса упражнений обучаемым и редактора уровней упражнений для обучения операторов.

Ключевые слова: компьютерный тренажерный комплекс, автоматизированная обучающая система, оператор, моделирование, физические процессы, программное обеспечение, визуализация, упражнение.

R.A. Faizrakhmanov, A.F. Khabibulin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DESIGNING AND DEVELOPING TRAINING COMPLEX OF PORTAL CRANE OPERATOR

The paper presents the development of a training complex for the portal crane operator to train and test his practical skills in the loading and unloading procedures in real time. A portal crane “Albatros”, the prevalent in Russia, was chosen as the imitation object.

Due to the fact that education by means of real cranes is labor-intensive and time-consuming on account of their ineffective exploitation and maintenance, in this paper, we pay a great attention on the

problem of training crane machinists and the task of educating them with the use of computer simulators. We discuss the first computer simulator for training portal crane operators developed in Perm National Research Polytechnic University, its functionality and single out its shortcomings. We also introduce a module architecture of the training complex software of new generation, developed within our on-going project. It comprises the following modules: the core of the training complex (which connects all other modules together), visualization means (responsible for rendering the environment of the portal crane and the operator's workplace), physical and mathematical modeling module, computer-aided learning system, control devices (represented in terms of a real crane desk) and output device. Furthermore, we introduce a network architecture of the training complex, represented by the trainee's and tutor's workplaces connected with each other by the local network. The training complex incorporates the implemented computer-aided learning system which, in contrast to existing systems, leverages fuzzy logic for assessing the success in fulfilling exercises by the trainee and conveys a manager of different complexity levels for training operators.

Keywords: computer training complex, automated training system, operator, modeling, physical processes, software, visualization, exercise.

Введение. В учебных центрах морских, речных портов и специальных учебных заведениях осуществляется подготовка машинистов кранов по стандартному учебному плану: теоретическое обучение и производственное обучение на кране. При таком подходе к производственному обучению кран длительное время выведен из нормальной эксплуатации и используется только для обучения крановщиков, что приводит к неэффективному использованию грузоподъёмной машины и к частым поломкам. Изменить ситуацию в организации обучения возможно через внедрение в образовательный процесс дополнительного способа обучения будущих специалистов, которым является разработка тренажерных комплексов, воспроизводящих в учебных целях типовой технологический процесс для формирования профессиональных знаний, умений и навыков обучаемых перед их выходом на штатную практику.

Наш университет уже имеет успешный практический опыт в разработке таких тренажеров. В 1973 г. был введен в эксплуатацию первый образец такого тренажера, который являлся первым в мире электронным тренажером для подготовки крановщиков портальных кранов [1]. Он послужил прототипом других, более совершенных тренажеров, разрабатываемых на кафедре ВТАУ в течение более 10 лет.

В тренажерах 1970-х годов на экране ЭЛТ перед оператором формировалось изображение, соответствующее картине, реально наблюдаемой крановщиком при работе на кране (рис. 1) [1]. Задача обучаемого заключалась в том, чтобы совместить две светящиеся фигуры на дисплее – груз и точку адресации груза. Хотя разработка тренажеров проводилась на базе современной в те годы вычислительной техники, добиться реалистичности изображения на ЭЛТ-экране не удавалось. Тем не менее тренажер успешно эксплуатировался в Пермском порту до 1989 г.



Рис. 1. Внешний вид первого в мире электронного тренажера для подготовки крановщиков портальных кранов

Однако созданные тренажёры не нашли широкого применения в XXI веке по следующим причинам [2]:

– тренажёр предусмотрен для изготовления как индивидуальная конструкция;

– недостаточная визуализация перегрузочного процесса (отсутствует изображение реальных объектов (судна, складов, причала и др.));

– не предусмотрена возможность оперативно менять компьютерную программу для изменения задания обучаемым крановщикам;

– тренажёры устарели морально.

Все описанные выше проблемы были решены в тренажерах нового поколения.

Современное развитие принципов и парадигм создания информационных систем, 3D-технологий визуализации и моделирования, видеокарт, возможность использования свободно распространяемого программного обеспечения позволили продолжить работу над созданием тренажеров нового поколения на высоком программном и аппаратном уровнях. Объектом имитации стал широко распространенный в нашей стране портальный кран «Альбатрос».

Архитектура программного обеспечения тренажерного комплекса. Архитектура программного обеспечения разрабатываемого тренажерного комплекса (рис. 2) включает в себя ядро и вспомогательные модули (устройства управления, устройство вывода, среда визуализации, автоматизированная обучающая система (АОС), физико-математическое моделирование).

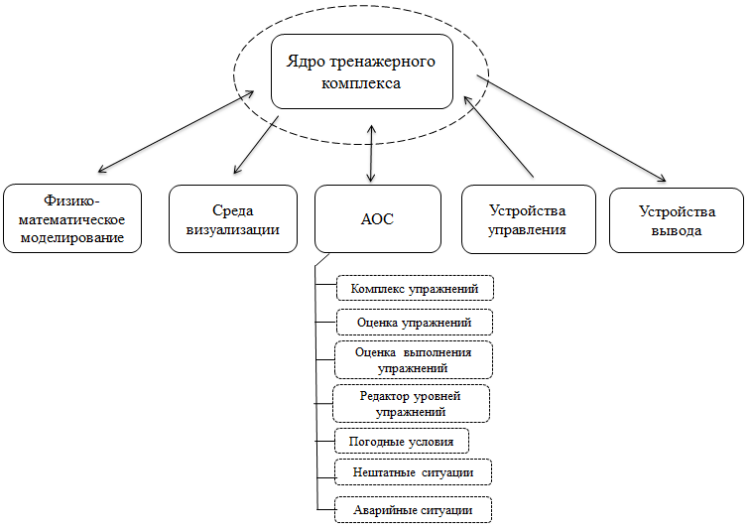


Рис. 2. Архитектура программного обеспечения тренажерного комплекса

К основным задачам ядра относятся:

– обеспечение функционирования всего тренажерного комплекса во время обучения;

– обработка сигналов с органов управления;

– преобразование сигналов с органов управления во входные параметры динамической модели крана.

Ядро связывает все вспомогательные модули, которые отвечают за подготовку и настройку ядра к работе, а также за выполнение функций авторизации, загрузки сценариев в ядро, за интегрирование ядра с автоматизированной обучающей системой.

Физико-математическое моделирование тренажерного комплекса учитывает основные параметры, встречающиеся в реальной обстановке погрузочно-разгрузочных работ на грузоподъемной машине, а именно:

– моделирование колебаний конструкций (натяжение троса, рывки, колебания крана);

– моделирование внешних воздействий (ветер, дождь, освещенность);

– моделирование столкновения и коллизии грузов (разрушение контейнеров при соударениях, разрыв троса);

– моделирование поведения сыпучего груза.

Для моделирования колебаний троса использованы движок *Blender Game Engine (BGE)*, позволяющий моделировать колебания троса с учетом изменения его длины и массы грузов, а также модифицированный алгоритм численного интегрирования Верле [3]. Внешние силы, возникающие при взаимодействии между телами, учитываются с помощью физического движка *Bullet*, встроенного в *BGE*.

Для моделирования внешнего окружения порта в тренажерном комплексе были выделены следующие ключевые объекты:

– *стационарные* (причал, склад, железнодорожные пути, автомобильный подход);

– *динамические* (судно у причала, груз на складе, груз в трюмах, расстановка рабочего персонала).

Создание и визуализация трехмерных моделей ключевых объектов происходят с помощью кроссплатформенного, свободно распространяемого программного пакета *Blender*, а именно приложения *Blender 3D* (рис. 3, 4) [4]. Качественная визуализация окружения порта позволяет обучаемому увидеть общую картину связей и отношений между всеми объектами в процессе погрузочно-разгрузочных работ.



Рис. 3. Моделирование окружения порта



Рис. 4. Вид из кабины оператора портального крана

Визуализация в тренажерном комплексе предусмотрена как на один монитор, так и на несколько (рис. 5).

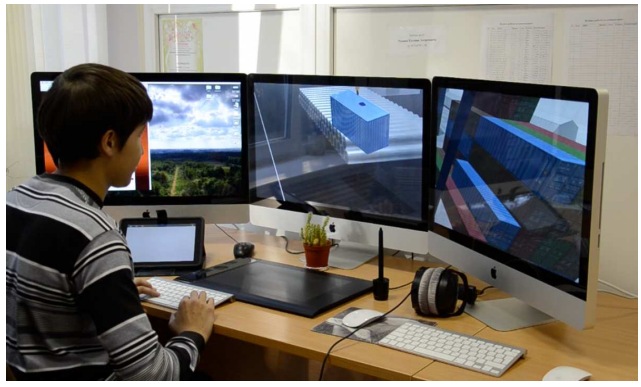


Рис. 5. Вывод изображения на несколько мониторов

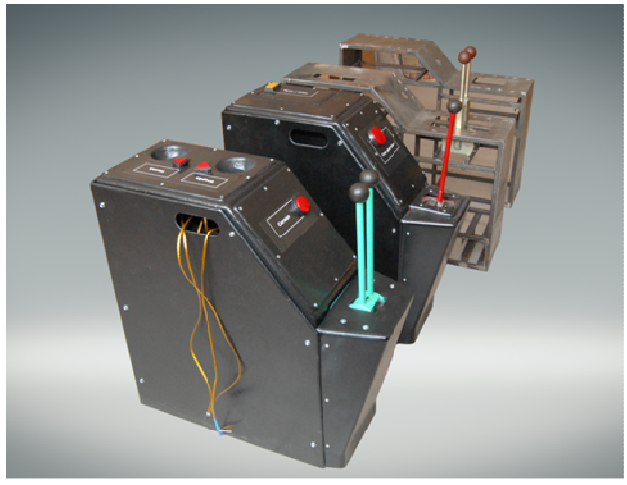


Рис. 6. Реального пульты управления портального крана

В качестве устройств управления в тренажерном комплексе представлены варианты комплектаций: мобильные пульты, кресло-пульт, игровые джойстики, клавиатура [5]. Мобильный пульт является устройством управления, подключаемым к ПК, для взаимодействия с программной частью тренажерного комплекса. Связь мобильного пульта с ПК осуществляется по интерфейсу *USB* с использованием профиля *USB HID*. Для подключения такого устройства к ПК не требуется установки дополнительных драйверов, а программы воспринимают пульт как обычную клавиатуру. Кресло-пульт разработано на основе реального устройства управления портального крана «Альбатрос» (рис. 6) [6].

Архитектура тренажёрного комплекса. Основной целью создания тренажерного комплекса является обеспечение процесса обучения и тренировки операторов портального крана в режиме реального времени с возможностью имитации деятельности. Без реализации процесса обучения такой тренажер – это всего лишь очередная незаурядная видеоигра. В тренажере участниками образовательного процесса являются обучаемый и учитель (инструктор) со своими рабочими местами. Обучающий модуль представляет собой распределенную систему, в которой все элементы объединены друг с другом через локальную сеть. Рабочее место обучаемого предназначено для отработки навыков управления краном и позиционирования грузов в обстановке, максимально приближенной к реальным условиям, а место инструктора – для выбора и создания учебной обстановки на рабочем месте обучаемого, а также для наблюдения и оперативного взаимодействия с обучаемым в процессе выполнения упражнений. Архитектура комплекса представлена на рис. 7.

В состав рабочего места инструктора входит компьютер на базе операционной системы *Windows/Linux/MacOS*, на котором установлено специализированное ПО тренажерного комплекса оператора портального крана.

Ключевые возможности рабочего места инструктора:

– мониторинг процесса обучения;

– анализ результатов процесса обучения;

– разработка новых сценариев обучения и модификация уже существующих;

– возможность изменения сцены обучения методом расстановки на карте объектов, таких как кран, контейнеры, различные объекты окружающего мира;

– возможность изменения инструктором при создании упражнений следующих характеристик: интенсивности дождя и тумана для изменения видимости, силы и направления ветра, освещения порта или судна.

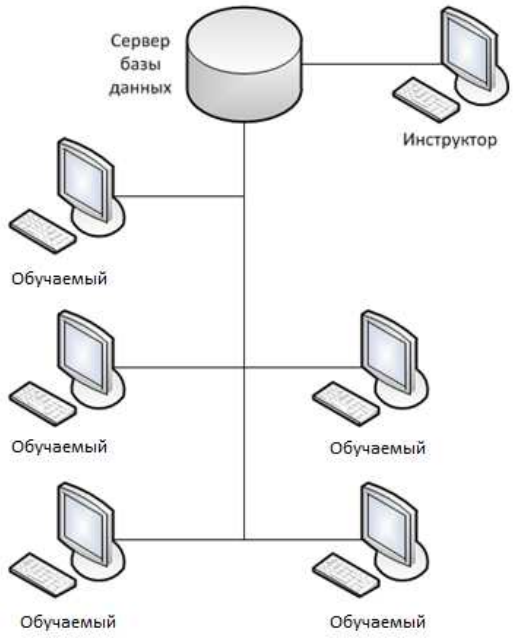


Рис. 7. Архитектура тренажёрного комплекса

Основными возможностями рабочего места обучаемого являются выполнение сценариев обучения в различных режимах, просмотр результатов и статистики обучения.

Автоматизированная обучающая система. В тренажерном комплексе реализована автоматизированная обучающая система (АОС), состоящая из комплекса (набора) упражнений, подсистемы оценки качества выполнения упражнений обучаемым, подсистемы оценивания сложности самих упражнений, редактора уровней упражнений, а также подсистем генерирования погодных условий, нештатных и аварийных ситуаций.

Для тренажерного комплекса разработана база данных, содержащая структуру и описание упражнений, результаты выполнения упражнений,

статистические данные прохождения упражнений. Структура упражнений представляет собой связь между упражнениями, действиями и показателями. Любое упражнение строится на основе этих связей.

Упражнения развивают моторные (двигательные) навыки оператора, специфические при работе на портальном кране. Многократное повторение с коррекцией по результату – основной путь в освоении моторных навыков [7]. Для освоения простой операции (например, поднятие груза над причалом) до уровня, позволяющего совершать ее без подсказок, необходимо в среднем 4–8 повтора.

Каждое упражнение на тренажерном комплексе оператора портального крана соответствует определенной технологической операции. Например, для портального крана технологическими операциями являются «поднятие груза», «опускание груза» и т.п. Любое упражнение представляется как множество учебных задач, выполняемых в определенной последовательности. Причем для упражнения, соответствующего определенной технологической операции, учебные задачи могут отличаться в зависимости от роли обучаемого.

В процессе обучения накапливается определенный массив статистических данных о показателях обучаемого, на основе которых происходят анализ и выработка полезных советов для оператора. Также каждое последующее упражнение оценивается с учетом показателей, имеющихся в предыдущем упражнении. Данный подход позволяет сформировать рекомендации для руководителя занятий (инструктора): нужен ли повтор темы, нужны ли упражнения с незначительно отличающимися показателями, возможен ли переход на новую тему.

При оценке качества обучения учитываются следующие показатели выполнения упражнений:

- время выполнения упражнения;
- скорость движения груза;
- угол отклонения троса;
- столкновение с контейнерами или иными объектами;
- точность переноса сыпучих грузов;
- точность переноса контейнеров.

Автоматизированная обучающая система может работать в следующих режимах [8]:

– режим симуляции с подсказками, в котором предусмотрено указание на объекты или действия над объектами с помощью курсора;

– режим симуляции без подсказок;

– режим контроля, в котором выдается сообщение о пройденном упражнении с оценкой за его выполнение и количеством ошибок по всем показателям;

– режим тестирования, включающий в себя проверку знаний материально-технической части крана, эксплуатационных характеристик, техники безопасности и др.

Для контроля качества выполнения упражнений обучаемым используется коэффициент усвоения K, который определяется как отношение количества правильно выполненных операций M к общему количеству операций в упражнении N:

$$K = \frac{M}{N}, \quad M = N - \sum_{i}^{k} \varepsilon_i,$$

где ε_i – ошибка при выполнении очередной операции, которая определяется как [8] $\varepsilon_1 = 1$, если время выполнения t больше отведенного под упражнение; $\varepsilon_2 = 2$, если скорость движения грузка v превышает допустимую скорость; $\varepsilon_2 = 3$, если угол отклонения троса превышает максимально допустимый; $\varepsilon_4 = 4$, если при выполнении упражнения было совершено столкновение с контейнерами или иными объектами; $\varepsilon_5 = 5$, если при выполнения упражнения песок был просыпан мимо целевого объекта или контейнер поставлен за пределы указанной площадки.

Тогда оценку O можно ставить, исходя из следующих соотношений: оценка 5 $K \geq 0{,}9$; оценка 4 $K = 0{,}8\ldots0{,}9$; оценка 3 $K = 0{,}7\ldots0{,}8$; при $K < 0{,}7$ положительную оценку выставлять нельзя [8].

На основе описанной методики был разработан комплекс из 11 упражнений. Каждое из упражнений помогает освоить и закрепить оператору какой-либо двигательный навык. Все разработанные интерфейсы для обучаемого и инструктора в тренажерном комплексе разработаны с помощью языка программирования *Java*. Особенностью АОС является дополнительно разработанный набор упражнений со стропальщиком, анимация которого реализована с помощью *Kinect* [9].

Эксплуатация тренажерных комплексов показывает, что их внедрение в образовательный процесс оказывает значительный экономический и дидактический эффект [10]. Благодаря их внедрению значительно повышается безопасность обучения, снижаются аварийность и сроки подготовки операторов. Разработанный подход в проектировании и реализации

тренажерного комплекса оператора портального крана обладает свойством универсальности и применим к разработкам тренажеров различных сфер деятельности.

Библиографический список

1. Тер-Мхитаров М.С. История развития электронных тренажёров операторов грузоподъёмных машин // Тренажёры и тренажёрные комплексы: тезисы докладов областного научно-технического семинара. – Пермь, 1990. – С. 5–8.

2. Шаталин О.Г. Методика создания тренажеров крановщиков для эксплуатации кранов в морских и речных портах: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004.

3. Verlet L. Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard−Jones Molecules // Physical Review. – 1967. – Vol. 159, № 1. – P. 98–103.

4. Blender 3D [Электронный ресурс]. – URL: http://www.blender.org/about (дата обращения: 12.06.2014).

5. Особенности разработки и реализации мобильных пультов тренажерного комплекса оператора портального крана / Р.А. Файзрахманов, А.С. Мехоношин, Р.Р. Бакунов, А.Б. Федоров, Р.Р. Бикметов [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4. – URL: http://blog.cyberlife.nl/magazine/archive/n4p1y2012/1267 (дата обращения: 12.06.2014).

6. Файзрахманов Р.А., Федоров А.Б. Разработка аппаратной части тренажера оператора портального крана // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2010. – № 4. – С. 119–123.

7. Назаров А.И. Перспективы применения ручных движений в психофизических экспериментах // Вестник Московского университета. Сер. 14. Психология. – 1988. – № 4. – С. 33–45.

8. Щемелева Т.К. Система подготовки крановщиков с применением тренажера // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2009. – № 3. – С. 102–107.

9. Moeslund T.B., Hilton A., Kruger V. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis // Computer Vision and Image Understanding. – 2006. – Vol. 104. – P. 90–126.

10. Файзрахманов Р.А., Старосельцев В.Б. Разработка компьютерного тренажера для подготовки крановщиков // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2005. – № 1. – С. 115–124.

References

1. Ter-Mkhitarov M.S. Istoriia razvitiia elektronnykh trenazherov operatorov gruzopod"emnykh mashin [History of the development of electronic simulators operators hoisting machines]. *Tezisy dokladov oblastnogo nauchno-tekhnicheskogo seminara "Trenazhery i trenazhernye kompleksy"*. Perm', 1990, pp. 5-8.

2. Shatalin O.G. Metodika sozdaniia trenazherov kranovshchikov dlia ekspluatatsii kranov v morskikh i rechnykh portakh [Methodology of creating simulators for crane operation of cranes in sea and river ports]. Abstract of the thesis of the candidate of technical sciences. – Moscow, 2004.

3. Verlet L. Computer "Experiments" on Classical Fluids. I. Thermodynamical Properties of Lennard−Jones Molecules. *Physical Review*, 1967, vol. 159, no. 1, pp. 98-103.

4. Blender 3D, available at: http://www.blender.org/about (accessed 12 June 2014).

5. Faizrakhmanov R.A., Mekhonoshin A.S., Bakunov R.R., Fedorov A.B., Bikmetov R.R. Osobennosti razrabotki i realizatsii mobil'nykh pul'tov trenazhernogo kompleksa operatora portal'nogo krana [Features of the development and implementation of mobile remote training complex of portal crane operator]. *Engineering journal of Don*, 2012, no. 4, available at: http://blog.cyberlife.nl/magazine/archive/n4p1y2012/1267 (accessed 12 June 2014).

6. Faizrakhmanov R.A., Fedorov A.B. Razrabotka apparatnoi chasti trenazhera operatora portal'nogo krana [Development of hardware simulator of portal crane operator]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2010, no. 4, pp. 119-123.

7. Nazarov A.I. Perspektivy primeneniia ruchnykh dvizhenii v psikhofizicheskikh eksperimentakh [Prospects of application of hand movements in the psychophysical experiments]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Psikhologiia*, 1988, no. 4, pp. 33-45.

8. Shchemeleva T.K. Sistema podgotovki kranovshchikov s primeneniem trenazhera [Training system of operator with the use of the crane simulator]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2009, no. 3, pp. 102-107.

9. Moeslund T.B., Hilton A., Kruger V. A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, vol. 104, pp. 90-126.

10. Faizrakhmanov R.A., Starosel'tsev V.B. Razrabotka komp'iuternogo trenazhera dlia podgotovki kranovshchikov [Development of a computer simulator for the training of crane operators]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2005, no. 1, pp. 115-124.

Сведения об авторах

Файзрахманов Рустам Абубакирович (Пермь, Россия) – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных технологий и автоматизированных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: fayzrakhmanov@gmail.com).

Хабибулин Айрат Фаданисович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры информационных технологий и автоматизированных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shimakenshi@gmail.com).

About the authors

Fayzrakhmanov Rustam Abubakirovich (Perm, Russian Federation) is PhD of Economic Sciences, Professor, the Head of the Department of Information Technologies and Computer-Aided Systems Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: fayzrakhmanov@gmail.com).

Khabibulin Aydar Fadanisovich (Perm, Russian Federation) is a postgraduator of the Department of Information Technologies and Computer-Aided Systems Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shimakenshi@gmail.com).

Получено: 26.03.2014