

Оптимальное планирование грузоперевозок на базе ГИС-технологий

Косяков С.В., д-р техн. наук, Гадалов А.Б., ст. преп., Жидовинов К.А., студ.

Приведены результаты работ по созданию программных средств оптимального планирования грузоперевозок на базе ГИС. Рассмотрены варианты реализации алгоритмов построения оптимальных планов грузоперевозок, интеграции программных средств оптимизации, ГИС и систем управления предприятиями.

Ключевые слова: оптимальное планирование, грузоперевозки, информационная система.

Optimal Cargo Transportation Planning Based on GIS Technologies

S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering, A.B. Gadalog, Senior Tecturer, K.A. Zhidovinov, Student

The authors describe the results of the work on the creation of cargo transportation optimal planning software based on GIS. The variants of the implementation of search algorithms for optimal shipping plans, integration of software optimization, GIS and enterprise management systems, implementation of user interfaces in the systems of this class are described in the article.

Key words: optimal planning, cargo transportation, information system.

Введение. В настоящее время задача планирования грузоперевозок малотоннажных многоассортиментных продуктов становится все более актуальной для предприятий, осуществляющих поставки различных продуктов в торговые сети крупных городов и густонаселенных территорий. Как правило, поставщики продуктов питания, лекарственных средств и других товаров повседневного спроса ежедневно обслуживают сотни клиентов, что приводит к значительным транспортным расходам. Кроме того, планирование загрузки автомобилей и назначение им маршрута и графика доставки груза должны выполнять опытные диспетчеры, а ошибки в составлении заданий связаны с дополнительными издержками. Поэтому на таких предприятиях возрастает потребность в использовании автоматизированных информационных систем планирования грузовых перевозок (АИС ПГП).

Создание и внедрение информационных систем данного класса связано с решением комплекса научных, технологических и экономических проблем. Практика показывает, что существенным препятствием на пути внедрения таких систем является сложность их использования, связанная с необходимостью обработки большого количества данных в ограниченное время и высокими требованиями к персоналу, эксплуатирующему подобные информационные системы. Ниже анализируются результаты серии выполненных нами разработок по созданию информационных систем и программных средств оптимального планирования грузоперевозок, в которых для сбора обработки и анализа данных использовались средства ГИС.

Объект автоматизации. Класс задач, которые решаются при планировании грузоперевозок, неформально можно описать следующим образом. Имеется предприятие, владеющее несколькими складами. Предприятие имеет мно-

жество (обычно несколько сотен) клиентов, распределенных по территории города и близлежащего региона, которые передают на предприятие заявки на поставку товаров со складов. Заявки подаются до начала планирования, но время планирования ограничено. Например, заявки подаются до начала очередного рабочего дня, а планирование осуществляется в первые часы рабочего дня. Объем и ассортимент заказанного товара заранее (до поступления заявки) неизвестны. Товар должен быть доставлен клиенту в определенный период времени. Этот период может быть коротким (например, для скоропортящихся продуктов питания он составляет несколько часов) или достаточно длинным (например, «в течение дня»). Предприятие имеет в распоряжении множество грузовых автомобилей различной вместимости, которые перевозят товары клиентам (выполняют заявки). При этом объемы заявок меньше вместимости автомобиля, что позволяет ему за один рейс выполнить заявки нескольких клиентов. Целью планирования является определение величины и ассортимента загрузки автомобилей и назначение им таких маршрутов, при которых суммарные затраты предприятия на удовлетворение всех поступивших заявок будут минимальны.

Процесс планирования обычно можно разделить на следующие последовательно решаемые подзадачи (этапы решения задачи):

- 1) ведение данных о клиентах или договорах (клиент заключает долгосрочный договор с поставщиком на поставку товаров);
- 2) ведение данных об автомобилях, осуществляющих поставки, и выполненных ими объемах перевозок;
- 3) создание и поддержание в актуальном состоянии информации о местоположе-

нии клиентов, дистанциях и времени движения автомобилей между ними и складами;

4) прием и формирование списка заявок, для которых осуществляется планирование на заданный период времени (обычно – одни сутки);

5) формирование заданий для автомобилей и их оформление в виде документов (путевых листов);

6) формирование отчетности по итогам планирования и контроль результатов выполнения планов.

Комплексная автоматизация указанных задач может потребовать реинжиниринга процессов управления на предприятии с учетом используемых прикладных информационных систем. При этом следует учитывать, что рассматриваемые подзадачи решаются с различной периодичностью и в ряде случаев разными подразделениями предприятия. Например, данные о клиентах и задействованных в перевозках автомобилях обычно меняются редко, а соответствующие базы данных ведутся бухгалтерскими службами, обеспечивающими учет заключенных договоров и финансовые расчеты по ним. Заявки обычно принимаются диспетчерскими службами на складах от клиентов, с которыми уже заключены договоры. При этом количество заявок на день может быть меньше общего количества клиентов.

Информационная модель, используемая для назначения маршрутов, в простейшем случае представляет собой карту территории в бумажном виде. Она используется диспетчером для того, чтобы по адресам клиентов определить их местоположение и оценить расстояния между пунктами доставки груза. Часто информационная модель представляется также в виде статичной таблицы (матрицы) расстояний между пунктами доставки. В городской среде при большом количестве пунктов доставки поддержание такой матрицы в актуальном состоянии становится трудоемкой задачей. Поэтому даже традиционные для ГИС средства поиска и измерения длин маршрутов дают существенную экономию времени и затрат на решение рассматриваемых задач.

Проблемы создания АИС ГП. Разработка информационных систем рассматриваемого класса наталкивается на ряд проблем:

- выбор адекватных математических моделей и оптимизационных алгоритмов решения задачи построения плана грузоперевозок с учетом реальных условий использования информационной системы и существующих ограничений;
- организация процессов сбора и актуализации данных, необходимых для выполнения расчетов, в условиях имеющихся неопределенностей, временных и финансовых ограничений;
- интеграция средств оптимального планирования в среду корпоративных информационных систем предприятий и создание удобных

интерфейсов для работы пользователей с пространственными данными.

Названные проблемы при разработке прикладных информационных систем должны взаимно увязываться и решаться с учетом стоимостных факторов разработки и эксплуатации информационной системы. Очевидно, что необходимость приобретения эксплуатирующим предприятием дополнительного оборудования, дорогостоящих компонентов программного и информационного обеспечения, включения в штат новых специалистов приведет к неприемлемо большим срокам окупаемости проектов и, как следствие, к отказу большинства заказчиков от внедрения подобных систем. Поэтому важной задачей разработки является обоснованный выбор упрощений в используемых моделях, рациональное распределение функций между программно-реализованными алгоритмами, администраторами и пользователями системы, организация информационного обмена с существующими автоматизированными системами отношений с клиентами, бухгалтерского и складского учета и т.п.

Выбор и реализация алгоритмов решения задачи. Задачу планирования грузоперевозок в общем случае можно представить как функцию

$$f(Q, A) \xrightarrow{\min_{F(B), b \in Db}} P, \quad (1)$$

где Q – множество заказов на перевозку продукции, каждый элемент которого характеризуется объемом заказа и, в частном случае, временем получения; A – множество автомобилей, каждый из которых характеризуется вместимостью и способом расчета затрат на перевозку; P – множество планов, элементами которого являются маршруты (упорядоченные множества заказов, поставленные в соответствие каждому автомобилю: $a_n \in A$); $F(B)$ – критерий оптимизации, рассчитываемый по множеству параметров $b_i \in B$, для которого определено пространство ограничений Db .

В строгом решении критерий $F(B)$ должен минимизироваться по каждому маршруту и в целом:

$$\min_i \sum \min(F_i(B)). \quad (2)$$

В такой постановке основной алгоритм планирования рейсов должен решать комбинаторную задачу, которая относится к классу NP-полных и не может быть решена в приемлемое время. При решении подобных задач вводятся различные допущения и реализуется поиск псевдооптимальных решений.

При реализации алгоритмов поиска маршрутов рассматриваемую задачу обычно сводят к постановке, которая известна в литературе как задача маршрутизации транспортного средства с учетом грузоподъемно-

сти. Формально она представляется следующим образом.

Пусть $V = \{0, \dots, n\}$ – набор узлов полно-го ненаправленного графа $G = (V, E)$. Узел 0 представляет склад, где имеются транспортные средства, каждое с грузоподъемностью D . Остальные узлы представляют n клиентов, каждый из которых имеет неотрицательный спрос d_i , $i = 1, \dots, n$. Кроме того, для каждой дуги $(i, j) \in E$ определен параметр c_{ij} , обозначающий стоимость проезда по этой дуге. Задача сводится к определению ряда маршрутов с минимальной общей стоимостью таким образом, что каждый клиент посещается единственный раз единственным транспортным средством, которое начинает и заканчивает свой маршрут на складе. При этом полный спрос не превышает грузоподъемности транспортных средств.

Существует несколько известных подходов решения поставленной задачи на основе комбинаторных методов. Нами были реализованы и исследованы различные алгоритмические подходы, включая:

- подход, в основе которого лежит «жадный алгоритм» и метод ветвей и границ;
- подход на основе метода Кларка-Райта [1];
- подход на основе алгоритма с использованием нечеткой кластеризации [2];
- подход на основе самонастраивающегося генетического алгоритма [3].

Первый подход основывается на следующем главном допущении: некоторого «хорошего» решения поставленной задачи можно достичь, последовательно вычеркивая из множества заказов Q те заказы, которые некоторый автомобиль из множества A может обслужить на данный момент времени оптимальным образом. При этом ключевым вопросом становится выбор из множества Q заказов, наиболее оптимальных для конкретного автомобиля.

Укрупненно алгоритм решения задачи можно представить следующим образом:

1. Для каждого автомобиля строится оптимальный маршрут и выбирается наилучший вариант.

2. Автомобиль наилучшего маршрута становится занятым и удаляется из списка свободных.

3. Заказы, удовлетворенные этим автомобилем, удаляются из списка неудовлетворенных заказов.

4. Если список неудовлетворенных заказов пуст, то задача считается решенной.

5. Если список автомобилей пуст, то решений не существует.

6. Переход к шагу 2.

При таком подходе решается задача выбора оптимального маршрута для одного автомобиля. В этом случае остаются две проблемы:

1. Задача поиска оптимального рейса для одного автомобиля имеет меньшую размерность, но остается NP-полной.

2. По мере удовлетворения заявок в списке неудовлетворенных заявок остается все более «плохой остаток». Последние маршруты становятся «плохими» с точки зрения интегрального критерия (2).

Для нахождения маршрута оптимального рейса автомобиля используется метод ветвей и границ, в котором определены два процесса: во-первых, оценка множества решений и, во-вторых, деление множества решений на подмножества.

Решением локальной задачи является маршрут автомобиля по потребителям, соответственно, множеством решений – совокупность всех возможных маршрутов по рассматриваемым потребителям. Критерий оптимальности в этом случае будет определяться удельными затратами, и, следовательно, минимизируемая функция – формула расчета удельных затрат.

Метод Кларка-Райта был разработан двумя британскими учеными Г. Кларком (G. Clarke) и Дж.В. Райтом (J.W. Right). Несмотря на давность разработки (метод опубликован в 1963 г.), он до сих пор остается самым популярным методом для решения данной задачи, о чем свидетельствует практика его применения.

Суть метода заключается в том, чтобы, отталкиваясь от исходной схемы развозки, по шагам перейти к оптимальной схеме развозки с кольцевыми маршрутами. Для этого вводится такое понятие, как километровый выигрыш. Для пояснения смысла алгоритма обратимся к рис. 1.

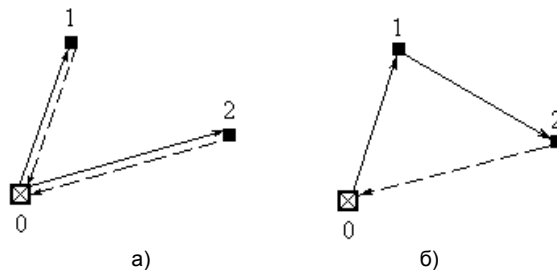


Рис. 1. Схема развозки: а – с радиальными маршрутами б – с кольцевым

В случае перевозки по радиальным маршрутам суммарный пробег автотранспорта равен

$$L_A = d_{01} + d_{10} + d_{02} + d_{20} = 2d_{01} + 2d_{02}. \quad (3)$$

По кольцевому маршруту пробег автотранспорта составляет

$$L_B = d_{01} + d_{12} + d_{02}. \quad (4)$$

Схема рис. 1,б по показателю пробега автотранспорта дает, как правило, лучший результат, чем схема рис. 1,а. Поэтому при выборе схемы рис. 1,б получаем километровый выигрыш:

$$s_{12} = L_A - L_B = d_{01} + d_{02} - d_{12}. \quad (5)$$

В общем случае километровый выигрыш определяется по формуле

$$s_{ij} = d_{0i} + d_{0j} - d_{ij}, \quad (6)$$

где S_{ij} – километровой выигрыш, получаемый при объединении пунктов i и j ; d_{0i} , d_{0j} – расстояние между оптовой базой и пунктами i и j соответственно; d_{ij} – расстояние между пунктами i и j .

Алгоритм Кларка-Райта включает несколько шагов и позволяет анализировать матрицу километровой выигрышей для множества пунктов развозки. С помощью этого алгоритма на матрице возможных километровой выигрышей ищется ячейка (i^*, j^*) с максимальным значением S_{max} .

Алгоритм нечетких k -средних используется для нечеткого разбиения пунктов на равные кластеры (регионы). Перед его использованием нужно рассчитать матрицу расстояний D . В результате работы алгоритма получим матрицу центров кластеров M размера $k \times 1$ и матрицу принадлежности U размера $n \times m$ (m – количество кластеров; n – количество пунктов; U_{ij} – степень принадлежности i -го пункта j -му кластеру).

Свойства матрицы U :

$$1) \sum_{j=1}^k U_{ij} = 1, \forall i, \text{ т.е. сумма элементов в лю-}$$

бом столбце равна 1;

2) $\forall i \forall j, 0 < U_{ij} < 1$, т.е. элемент матрицы не может быть 0 или 1.

Разбиение на кластеры выбирается таким образом, чтобы минимизировать целевую функцию:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k U_{ij}^2 \|X_i - M_j\|^2. \quad (7)$$

«Загрузка» автомобилей производится последовательно с учетом степени принадлежности пункта кластеру.

Минимизация пробега автомобилей методом перебора может проводиться при помощи самонастраивающегося генетического алгоритма. Суть модификации состоит в том, что применяется по три типа каждого генетического оператора изначально с равной вероятностью. Каждый индивид запоминает, в результате применения каких операторов он был создан. После нахождения нового субоптимального решения вероятность применения этих операторов пересчитывается.

Первая популяция может быть сформирована случайным образом или может быть получена в результате применения одного из предыдущих алгоритмов.

Результаты исследований показывают, что самым точным является метод Кларка-Райта, но его временные затраты нелинейно возрастают при увеличении количества пунктов доставки груза. Он становится неэффективным при количестве пунктов больше 500. При большом количестве пунктов решение гарантированно находит генетический алгоритм с первоначальной популяцией, полученной при помощи

метода нечеткой кластеризации. Алгоритм нечетких k -средних может быть использован для получения первой популяции генетического алгоритма и для грубой оценки затрат на доставку. Он является более «быстрым» алгоритмом по сравнению с остальными, но имеет существенные ограничения.

С учетом результатов данных исследований и экспериментов была реализована библиотека программных процедур, обеспечивающая нахождение решения задачи (1) для заданных множеств заказов и автомобилей на готовом графе стоимостей проезда между заказчиками.

Подготовка исходных данных и анализ результатов планирования. Рассмотренные методы решения задачи построения маршрутов предполагают, что имеется полный граф G , в котором определены стоимости всех переездов между всеми узлами S_{ij} . Стоимости обычно считаются пропорциональными расстояниям пробега автомобиля между узлами транспортного графа. Граф удобно представлять матрицей (таблицей) стоимостей маршрутов, в которой строки и столбцы соответствуют вершинам полного транспортного графа. Однако на практике процесс создания, поддержания в актуальном состоянии и использования такой матрицы связан с существенными трудностями. Поэтому внедрение оптимизационных программ без автоматизации процессов построения для них матрицы маршрутов становится неэффективным.

Задача построения матрицы может быть решена на базе ГИС, в которой ведется транспортный граф территории. Данная задача достаточно традиционна для ГИС. В настоящее время модели для поиска оптимальных маршрутов проезда между заданными точками широко используются, например, в автомобильных навигаторах. Алгоритмы поиска оптимального пути между двумя точками на графе, основанные на известном алгоритме Дейкстры, хорошо изучены. Особенностью применения этих алгоритмов в данном классе информационных систем является необходимость их многократного применения. Для N клиентов и одного склада число маршрутов в матрице расстояний, которые нужно рассчитать, составит $N^*(N+1)$. При большом количестве клиентов для рядового компьютера решение такой задачи может затянуться на многие часы, что делает неприемлемым повседневное выполнение такой операции. Выход из данной ситуации заключается в учете реальных условий применения информационной системы, что позволяет сделать ряд существенных упрощений.

В отличие от навигационных систем, в которых важен сам маршрут движения, в матрице расстояний отображается только

длина маршрутов. С учетом практических соображений и наличия неопределенностей, которые невозможно учесть заранее, для решения данной задачи вполне достаточна точность определения расстояния с ошибкой до 10 %. Очевидно, что водитель будет сам выбирать маршрут с учетом реальной обстановки, поскольку на этапе планирования невозможно предвидеть, например, наличие затруднений движения на различных участках дорог, возникающих в течение дня. Введение таких допущений позволяет абстрагироваться от «сиюминутных» условий и проводить полный расчет матрицы только в начале эксплуатации системы и при появлении существенных изменений в схеме движения на территории. Кроме того, при таких допущениях расстояние между клиентами при движении в обоих направлениях можно считать одинаковым, что превращает матрицу в симметричную и вдвое сокращает объем расчетов. Появление новых клиентов в этом случае сопровождается пересчетом только одной строки матрицы.

Таким образом, ведение матрицы стоимостей маршрутов можно выделить в отдельную подсистему, реализуемую средствами ГИС.

Реализация программных средств планирования грузоперевозок. Результаты проведенных исследований позволили создать комплекс программных средств, который может использоваться как самостоятельное приложение и в составе корпоративных информационных систем с учетом существующих бизнес-процессов на предприятиях.

На рис. 2 показана структура одной из практически реализованных информационных систем, построенных в технологии «клиент-сервер» и интегрированных с системой управления на базе программного комплекса «1С Предприятие».

В данной системе функции ведения баз данных клиентов, приема заявок и выдачи маршрутных заданий реализуются средствами «1С». В специализированном программном комплексе планирования грузоперевозок, который установлен на отдельном сервере, реализовано ведение карты территории, включающей адресную модель, транспортную модель, точки местоположения клиентов, средства построения матрицы маршрутов, средства построения оптимальных планов грузоперевозок. Обмен данными с приложением конечного пользователя осуществляется через XML-файлы. Вызов процедур оптимизации и передачи данных осуществляет специальный клиент сервера «1С».

Работа конечного пользователя при формировании планов ведется в программе «1С». При этом он не видит карты города. Размещение новых клиентов на карте осуществляется автоматически путем адресного геокодирования. За счет использования в ГИС и базе данных программы «1С» единого адресного справочника эта операция гарантированно приводит к корректному результату. Планирование осуществляется путем передачи списка заявок и списка машин в модуль оптимизации. В результате оптимизации заявки распределяются по машинам и выводятся в виде упорядоченных списков по каждой машине. Просмотр данных средствами ГИС осуществляется при необходимости администратором системы.

Те же программные модули оптимизации использованы в приложении, ориентированном на одного пользователя. Данное приложение реализовано в среде ГИС. На рис. 3 показан пример работы этой программы.

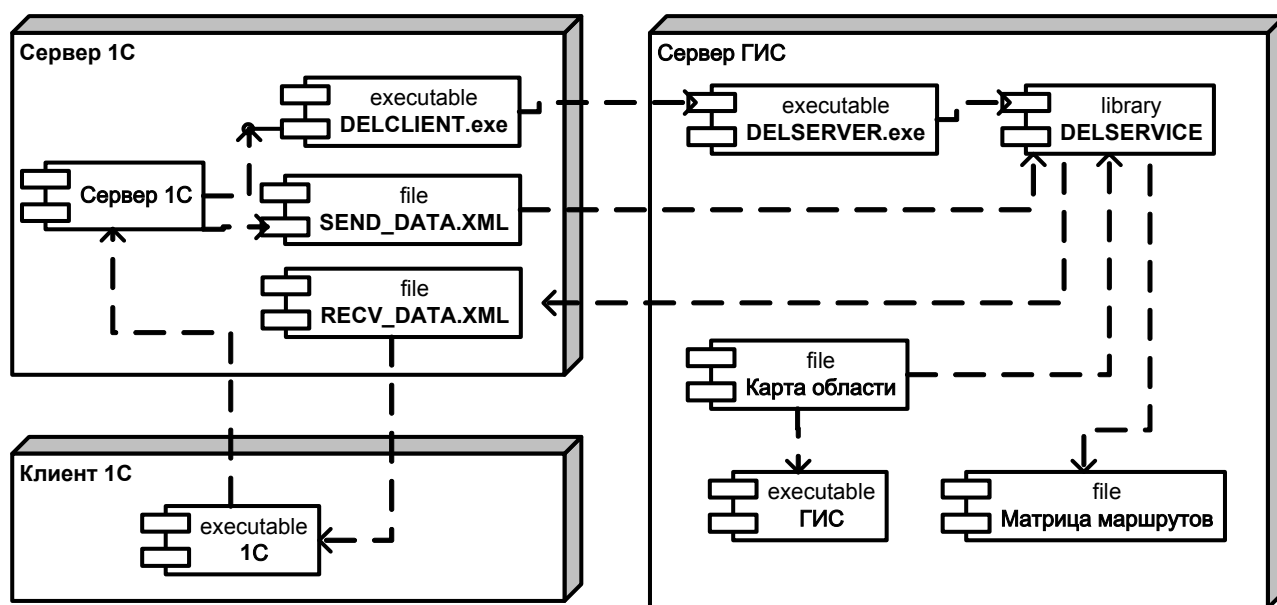


Рис. 2. Структура информационной системы, включающей функции планирования грузоперевозок

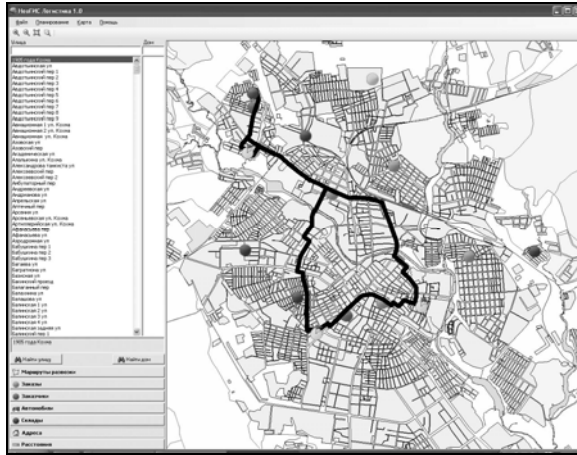


Рис 3. Пример работы программы планирования грузоперевозок

Данные, используемые в программе, также хранятся в XML-файлах. В программу включены возможности установки и редактирования местоположения заказчиков на карте в виде значков, назначения маршрутов в ручном и автоматическом режиме. Данная программа, в отличие от первой, позволяет пользователю полностью контролировать процессы формирования маршрутов и последова-

тельно решать все рассмотренные выше задачи планирования грузоперевозок.

Два выше приведенных примера показывают крайние варианты архитектуры информационных систем рассматриваемого класса. На практике могут возникать ситуации, требующие других комбинаций разделения функций между пользователями. Разработанное решение позволяет встраивать средства формирования матрицы маршрутов в среде ГИС и расчетные программы оптимизации в различные информационные системы и получать эффективные решения, учитывающие потребности и возможности пользователя.

Список литературы

1. **Ванчукевич В.Ф., Седюкевич В.Н., Холупов В.С.** Автомобильные перевозки. – Минск: Дизайн ПРО, 1999.
2. **Смирнов М.И., Хайруллин Р.З.** Математические модели, используемые в системе оптимизации доставки товаров автотранспортом «Диспетчер» // Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. № 13. – М., 2002.
3. **Maria Battarra, Bruce Golden, Daniele Vigo.** Tuning a Parametric Clarke-Wright. Heuristic via a Genetic Algorithm Università di Bologna, Dipartimento di Elettronica Informatica e Sistemistica Via Venezia, 52, 47023 Cesena, Italy. <http://or.ingce.unibo.it/ricerca/technical-reports-or-ingce/papers/gacw-sito.pdf>.

Косяков Сергей Витальевич,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой программного обеспечения компьютерных систем,
телефон (4932) 26-98-40,
e-mail: ksv@igt.ispu.ru

Гадалов Александр Борисович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
старший преподаватель кафедры программного обеспечения компьютерных систем,
телефон (4932) 26-98-40,
e-mail: gadalovab@dsn.ru

Жидовинов Константин Александрович,

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент,
телефон (4932) 42-49-30,
e-mail: kzhidovinov@ya.ru