

Мониторинг потоков транспортных средств на платных участках автомобильных дорог на основе применения ГНСС

Кулыгин С.В.^{1*}, Казачков В.О.^{1}, Кочкаров А.А.^{2,3***}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*АО «РТИ», ул. 8 марта, 10/1, Москва, 127083, Россия*

³*Финансовый университет при Правительстве РФ, Ленинградский проспект, 49, Москва, 125993, Россия*

*e-mail: Serega97-never@mail.ru

**e-mail: kazachkovvo@mai.ru

***e-mail: akochkar@gmail.com

Статья поступила 12.02.2021

Аннотация

В работе рассмотрены перспективные вопросы использования оборудования для определения местоположения автотранспорта на основе глобальных навигационных спутниковых систем для модернизации сетей платных дорог и улучшения качества систем мониторинга. Представлено и обосновано инженерное решение оптимизации пунктов регистрации транспортных средств, позволяющее устранить заторы на въездах и/или выездах и снизить стоимость проезда за счет снижения затрат на необходимую для функционирования инфраструктуру.

Проведен анализ электронных систем сборов оплаты проезда, а также ключевых автоматизированных информационных систем на примере «ЭРА-ГЛОНАСС» и систем мониторинга транспортных средств, установленных на

транспортных средствах для приема кодовых сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS с целью определения местоположения. Сформулирован перечень мероприятий для реализации улучшенной системы взимания платы, включающий: установку точек доступа на въездах и выездах, создание специальных центров обработки данных, разработку машинного кода и перепрошивку (обновление) ранее выпущенных устройств.

Для верификации предложенного решения проведен расчет трафика, передающегося от транспортных средств на базовую станцию стандарта GSM, в будни и выходные/праздничные дни на основе системы массового обслуживания М/М/1.

Ключевые слова: «ЭРА-ГЛОНАСС», система мониторинга транспортных средств, платная дорога, системы массового обслуживания.

Введение

За последние годы системы определения местоположения, такие как глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System), завоевали огромную популярность во всем мире. Эти технологии являются основой для построения крупномасштабных систем мониторинга [1 - 3]. Данные технологии открывают возможность организации систем мониторинга за транспортными средствами (ТС) на автомобильных дорогах, что позволяет модернизировать систему платных дорог для улучшения качества и оплаты проезда, не внося критических изменений в уже существующую

инфраструктуру, а также эффективного использования бюджета на их обслуживание [4].

В настоящее время строительство платных автомобильных дорог или организация платного проезда на уже существующей дорожной сети является перспективным направлением в развитии высококачественной системы автомобильных дорог. Как и в зарубежных странах, удельный вес систем платного проезда в общей сложности сетей автомобильных дорог будет небольшой, но именно платные дороги обеспечивают высокое качество дорожного покрытия и позволяют водителю добираться до своего пункта назначения быстрее. Для организации системы платных дорог в условиях недостатка выделяемых бюджетных средств в России, остро встал вопрос привлечения частных инвестиций для строительства дорог. Для привлечения инвестиций для строительства платных дорог, необходимо организовать такую систему платного проезда, чтобы она гарантировала возврат инвестору вложенных инвестиционных средств и достаточный размер прибыли за счет платной эксплуатации объекта, а также экономическую заинтересованность общества, которая будут пользоваться данной системой [5 - 7].

Существующие в России системы платных дорог можно классифицировать на три основные группы: открытая, закрытая, электронная с преобладанием практического применения именно первых двух групп [8]. Рассмотрим преимущества и недостатки каждой из них.

На рисунке 1, а изображена открытая система сбора платы за проезд. Пункты сбора платы за проезд (ПСПП) расположены только на въезде, а выезд с платного участка остается свободным. Данная система дает возможность сохранять доступность дороги для пользователей и в то же время снижает стоимость сбора платы за проезд за счет концентрации и сокращения количества мест сбора платы [9].

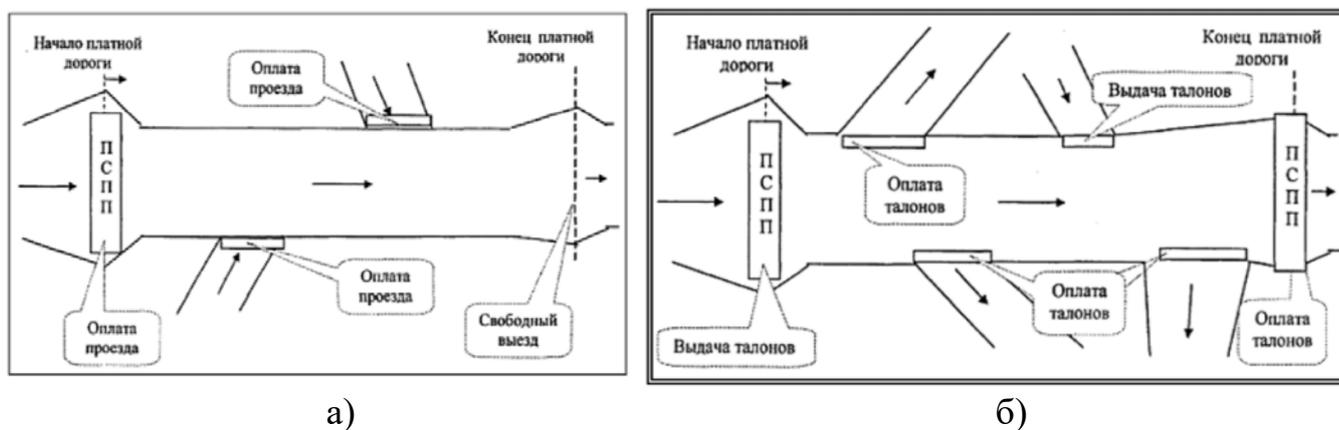


Рис. 1. Системы платных дорог [9]:

- а) открытая система;
- б) закрытая система

На рисунке 1, б изображена закрытая система сбора платы за проезд. В данной системе ПСПП расположены и на въезде, и на выезде. Преимущество закрытой системы - зависимость фактической стоимости проезда от пройденного расстояния, в то время как у открытой системы стоимость остается постоянной вне зависимости от точки въезда [9].

Очевидный недостаток данных систем – это дорогостоящие затраты на обслуживание систем как с точки зрения оборудования контрольно-пропускных пунктов на въезде и/или выезде, так и привлечения штатных операторов. Для

водителей главным недостатком является создание дорожных заторов на въезде и выезде платного участка автомобильной дороги [9].

Целью работы является исследование автоматизированных информационных систем, определяющие местоположение ТС, с целью устранения главной проблемы на платных дорогах: заторов на въездах и/или выездах. Данное решение позволяет создать подходы для модернизации платных дорог в контексте улучшения системы качества оплаты проезда для водителя ТС.

Решение проблемы

Электронная система сборов является решением проблем с дорожными пробками. При реализации данной технологии, водитель без остановки проезжает с заданной скоростью участка сбора средств. Оплата осуществляется посредством использования специальных электронных систем. Такие системы включают в себя электронные устройства генерации сигналов, размещаемые на автомобилях, и приемное оборудование, размещенное на обочинах платного участка [10]. Сегодня данные решения реализуются с помощью транспортной телематики [11].

В ноябре 2020 года на Центральной кольцевой автомобильной дороге была реализована первая в России система взимания платы «свободный поток» (Free Flow). В ее основе лежит технология выделенной связи ближнего действия (Dedicated Short-Range Communications - DSRC). Система подразумевает установку на дороге П-образной опоры, на которой размещены три камеры, лазерный датчик и антенна для радиочастотной идентификации (Radio Frequency IDentification - RFID). Устройства фиксируют факт проезда автомобиля, его регистрационные знаки, а

также габариты и количество осей транспортного средства для корректной классификации ТС и списания средств [12]. Информация с аппаратного комплекса передается в центральную систему обработки данных. Оплату за проезд можно осуществить тремя способами: с помощью транспондера, предварительно пополнив счет в личном кабинете на нужную сумму; предварительной оплатой электронного билета; погашением задолженности за проезд (при не оплате выставляется штраф) [13,14]. В качестве преимущества можно выделить использование нескольких подходов идентификации ТС, в том числе без транспондера. Недостатком данных систем является невозможность считывания сильно загрязненных или умышленно скрытых государственных регистрационных номеров ТС без транспондеров, а также отсутствие гарантии своевременной оплаты проезда при постоплате.

Реализации аппаратной части в виде самостоятельных систем только на основе RFID меток и/или распознавания номеров получили распространение и в мировой практике. В дополнение можно лишь выделить системы на основе ГНСС GPS, а также комбинации представленных подходов.

Относительно концепции RFID различия концентрируются в использовании уже встроенных меток, например, в номерные знаки. Достоинством данной системы является унификация при получении нового регистрационного номера. Существенным недостатком - повышенный потенциал выхода из строя антенны метки из-за обледенения, повреждений и т.д. [14].

При использовании ГНСС GPS предусмотрено применение специального бортового блока (On-Board Unit - OBU). Устройство служит для сравнения текущего

местоположения транспортного средства по GPS-координатам с виртуальным узлом взимания платы, расположенным на въезде платного участка дороги. После въезда ОВУ отправляет сообщение о транзакции в систему центра управления через мобильную сеть, где сохраняются данные о въезде, в ответ отправляется информация о результатах транзакции. В случае неудачной транзакции выставляется штраф. Преимущества данной технологии - снижение объема денежных вложений на ПСПП за счет виртуального узла, широкие возможности применения (навигация по транспортным средствам, мониторинг движения, службы дорожной информации, управление транспортировкой ТС и т.д.). Недостаток – высокая стоимость ОВУ [15].

В настоящее время активно исследуются и вопросы алгоритмической составляющей подобных комплексов. Так предлагается внедрение систем машинного обучения и искусственного интеллекта для обнаружения движения ТС через ПСПП, оптического распознавания символов номерных знаков [16,17].

Таким образом, использование информационно-телекоммуникационных систем на платных дорогах для контроля оплаты проезда ТС предоставляет возможность уменьшить расходы на обслуживание и устранить дорожные заторы на ПСПП [18].

Анализ автоматизированных информационных систем

Наиболее распространенными в современных ТС системами являются «ЭРА-ГЛОНАСС» и системы мониторинга транспортных средств [19, 20].

На рисунке 2 изображены структурные схемы «ЭРА-ГЛОНАСС» и систем мониторинга транспортных средств, рассмотрим каждую из них.

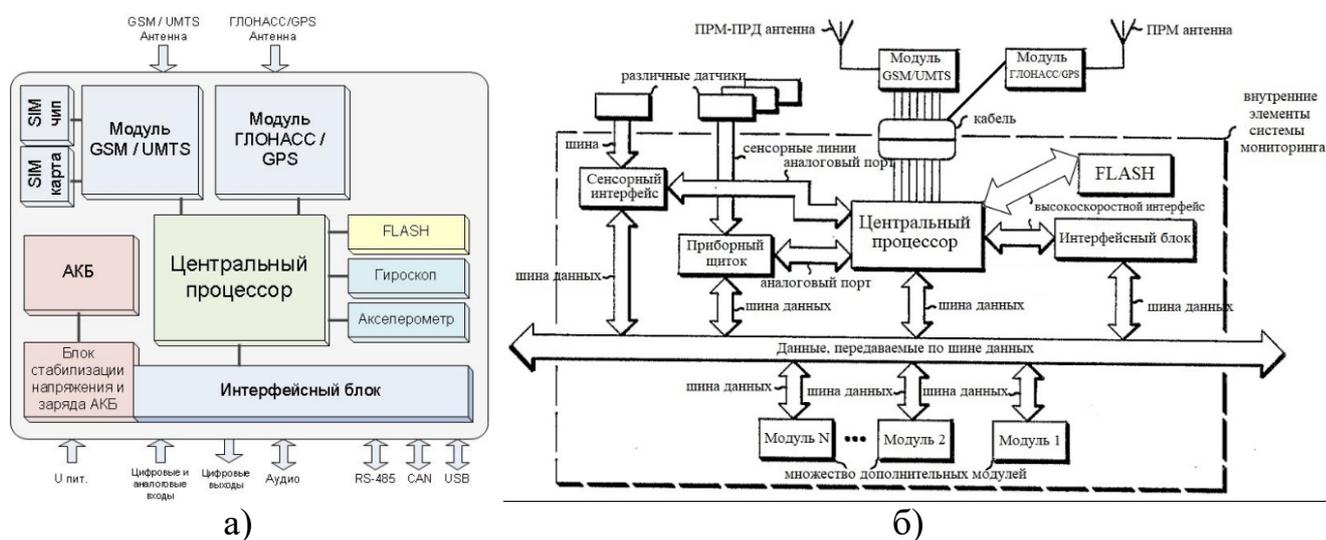


Рис. 2. Структурные схемы:

а) «ЭРА-ГЛОНАСС» [19];

б) систем мониторинга транспортных средств

Представленные системы обладают схожим алгоритмом работы. Они отправляют информацию в центр обработки данных, который обслуживает оператор каждой из систем с применением сетей мобильной связи. В структурных схемах каждой из систем представлены приемо-передающие (ПРМ-ПРД) модули стандартов мобильной связи GSM/UMTS (Global System for Mobile Communications / Universal Mobile Telecommunications System). Исходя из статистических данных о наибольшем радиопокрытии дорожной сети в России сетью GSM, в дальнейшем будем полагаться на данный стандарт мобильной связи.

Модули ГЛОНАСС/GPS служат для приема кодовых сигналов от одноименных глобальных навигационных спутниковых систем для определения местоположения ТС [21].

Центральный процессор выполняет операции в соответствии с загруженным в него машинным кодом. В их число входит обработка всех внутренних и внешних сигналов, а также генерация на их основе сообщений, передаваемых через GSM сеть.

FLASH-память предназначена для хранения конфигурации устройства, а также для временного хранения данных, которые по каким-либо причинам не могут быть переданы на сервер мониторинга или в центр обработки данных (функция «черный ящик»).

Проведенный анализ показал, что на структурном уровне «ЭРА-ГЛОНАСС» и системы мониторинга транспортных средств имеют схожую архитектуру. Системы имеют необходимые для реализации модули определения местоположения и передачи данных по сотовым сетям связи. Программно-аппаратная концепция построения устройств позволяет реализовать их применение и для контроля на платных участках дорог без изменений архитектуры построения.

Предложенный алгоритм оплаты проезда

Использование автоматизированных информационных систем «ЭРА-ГЛОНАСС» и систем мониторинга транспортных средств открывают возможность для усовершенствования автоматической технологии сбора платы за проезд. Для автомобилей с упомянутыми системами подход не требует установки дополнительного оборудования, а при условии привязки индивидуального идентификатора ТС к VIN (Vehicle Identification Number) номеру ТС и его регистрационному знаку, позволяет разрешить проблему нечитаемых номеров.

Отсутствие изменений аппаратной части на стороне автомобиля также позволяет производить дальнейшую модификацию системы с обновлением устройств путем простой перепрошивки.

Для реализации данного решения необходима модификация машинного кода и обновление ранее выпущенных устройств. При этом на въезде и выезде платного участка дороги будут установлены точки доступа.

В машинный код будет заложен следующий алгоритм действий, изображенный на рисунке 3.

Рисунок 4 показывает принцип передачи и получения данных ТС модернизированной системы.

Современные платные дороги характеризуются развитой коммуникационной инфраструктурой. Такой подход вызван требованиями к обеспечению безопасности и реализации оперативного реагирования на платных дорогах. Так МЧС России использует такие системы как:

- видеонаблюдения и анализа;
- оповещения и информирования населения и водителей всевозможными средствами (телевидение, радиостанции FM-диапазона, рассылки sms);
- приема и обработки информации и сигналов, поступающих от датчиков, установленных на контролируемых стационарных и подвижных объектах (в том числе «ЭРА-ГЛОНАСС») [22].

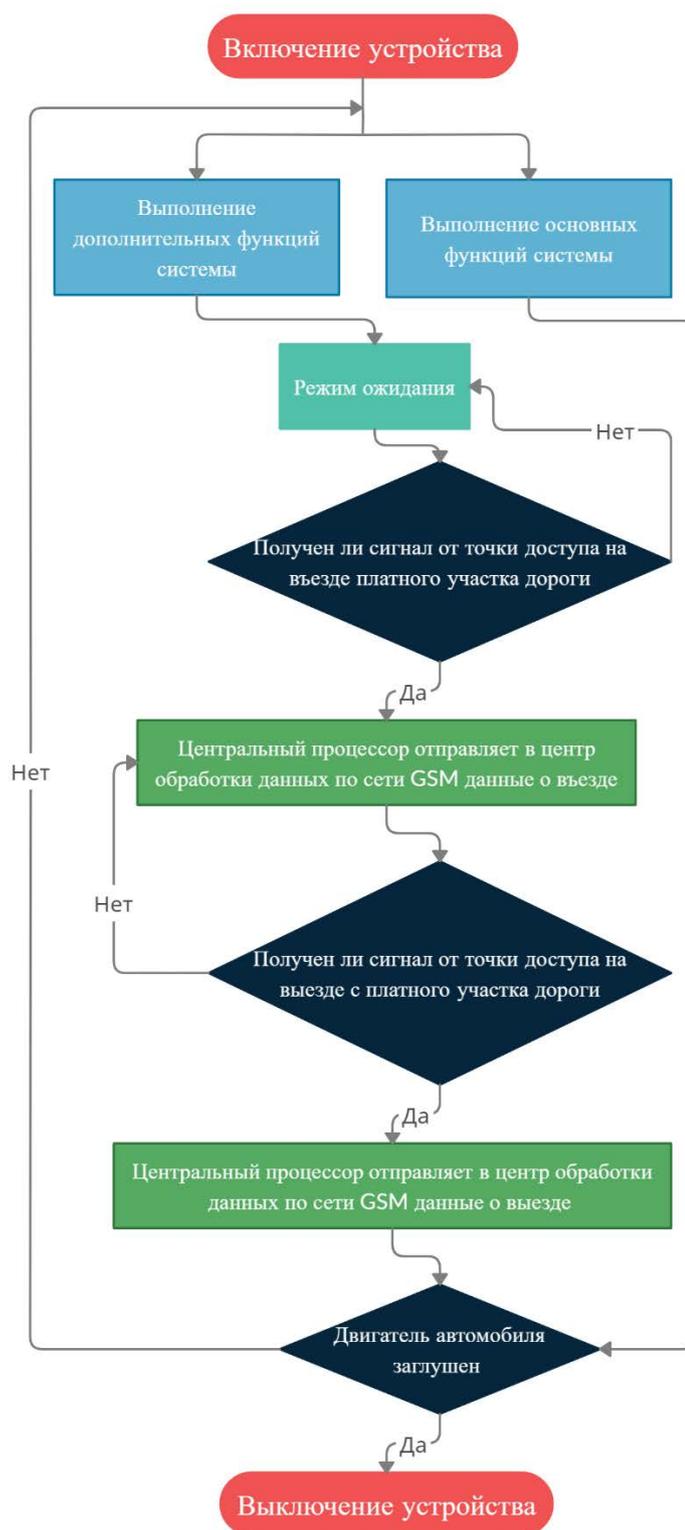


Рис. 3. Алгоритм работы модернизированной информационной системы

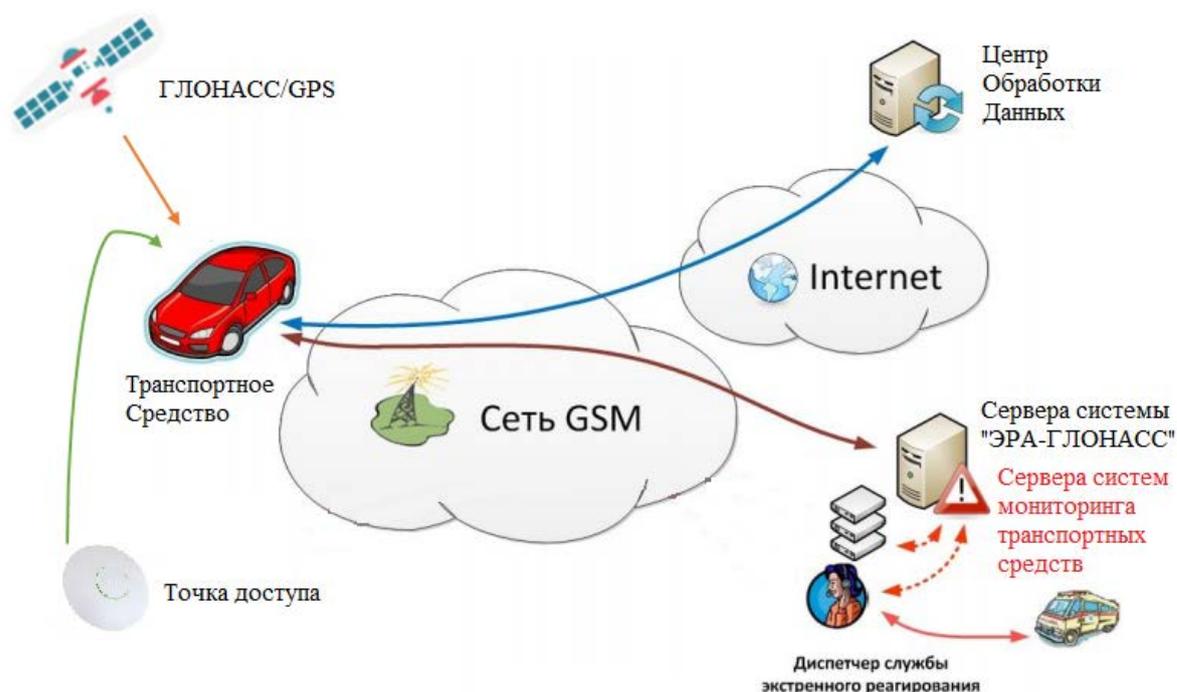


Рис. 4. Принцип передачи и получения данных ТС

Таким образом, предлагаемый подход в большинстве случаев подразумевает интеграцию модернизированной системы платных дорог в уже существующей коммуникационной инфраструктуре с минимальными затратами временных и финансовых ресурсов.

Передача информации в центр обработки данных для контроля за ТС на платном участке дороги будет реализована по мобильной сети GSM, по данным Роскомнадзора обеспечивающей 96.6% радиопокрытия магистральных автомобильных дорог федерального назначения [5, 23]. После обработки данных водителю ТС придет квитанция на оплату за проезд по платному участку дороги, например, по почте или через определенные электронные сервисы, такие как «Госуслуги» и т.п.

С помощью теории массового обслуживания произведем расчет пакетного трафика для базовой станции (БС), покрывающей участок платной дороги. В случае, если радиопокрытие участка платной дороги реализовано несколькими БС, непрерывный контакт «ЭРА-ГЛОНАСС» и/или систем мониторинга с сетью будет обеспечен за счет хендовера [24].

Расчеты и результаты

На платных участках дороги в передаче данных в центр обработки через БС участвуют разные категории ТС.

В таблице 1 описаны потоки данных. Категория М1 – легковые автомобили. Категория М2 и М3 – пассажирский транспорт (автобусы, маршрутный транспорт и т.д.). Категория N, включая N1, N2 и N3 – грузовые авто, перевозящие обычный и опасный груз.

Таблица 1

Описание потоков данных от ТС разных категорий

Категория ТС	М ₁	М _{2,3}	N _{1,2,3}
Средний объём передаваемой информации, байт [12]	140		
Скорость передачи пакета по каналу, кбит/с	13,4		

Расчеты будем вести для худшего случая пропускной способности сети GSM – GPRS (General Packet Radio Service). Процесс передачи данных GPRS состоит из размещения пакета в буфере и передачи пакета по каналу. В соте предусмотрено N каналов для передачи данных, из которых для передачи GPRS выделено d каналов. А остальные каналы N-d могут использоваться как для передачи голоса, так и

передачи пакетов данных (по требованию). Голосовой трафик имеет приоритет перед пакетной передачей данных.

Сформулируем необходимые условия для учета в математической модели:

а) В системе всего N каналов для передачи данных, из которых d каналов выделено для пакетной передачи GPRS. Остальные $N-d$ каналы могут использоваться как для GSM, так и GPRS передачи.

б) Если на БС нет свободных каналов для обслуживания GPRS, то пакеты направляются в буфер, рассчитанный на b пакетов.

в) Голосовые вызовы GSM имеют более высокий приоритет, что означает при отсутствии свободных каналов при поступлении вызова GSM, немедленно освобождаются каналы для передачи GPRS.

г) Заявки обслуживаются по типу FIFO (First In, First Out).

Основные обозначения в модели указаны в таблице 2.

Таблица 2

Основные обозначения в модели

Символ	Обозначение
N	Число каналов в системе для передачи данных
d	Число каналов, выделенных для передачи GPRS
b	Емкость буфера (очередь пакетного трафика)
λ_{GSM}	Интенсивность поступления голосовых вызовов
λ_{GPRS}	Интенсивность поступления пакетов данных
$1/\mu_{GSM}$	Средняя продолжительность разговора
Символ	Обозначение
$1/\mu_{GPRS}$	Среднее время передачи пакета данных по каналу
$P_{отк}$	Вероятность отказа в обслуживании

Схематическое описание (представление) математической модели приведено на рисунке 5.

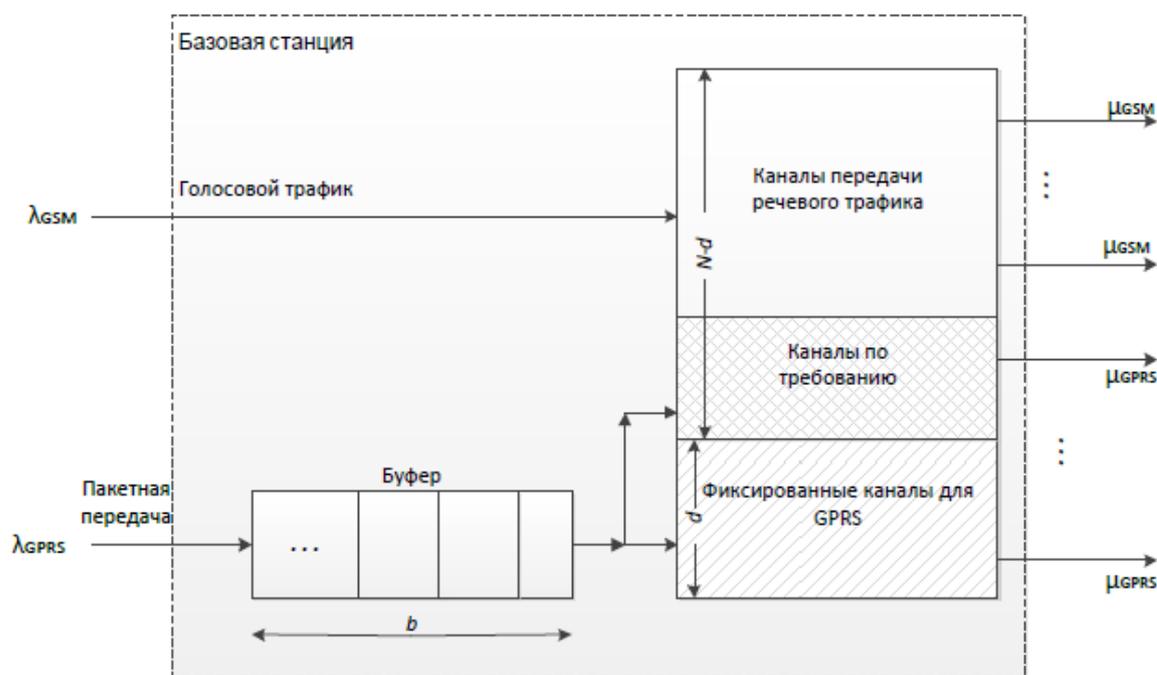


Рис. 5. Схематическое описание (представление) математической модели

Расчеты будут производиться относительно одной БС GSM, принципы передачи данных от ТС на БС показана на рисунке 6 [24].

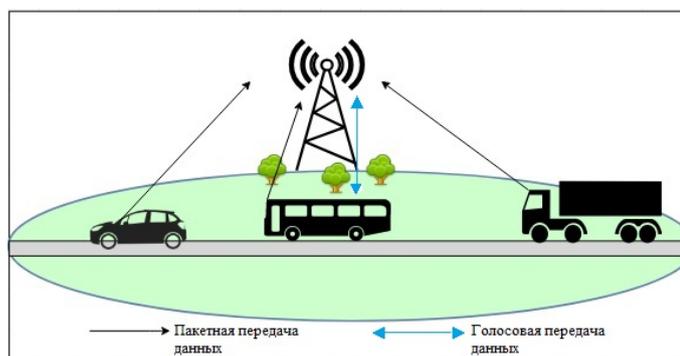


Рис. 6. Передача данных через одну базовую станцию GSM

Рассмотрим наихудший случай, когда на БС из восьми имеющихся каналов для передачи данных выделено $N=7$ каналов, а для пакетной передачи GPRS $d=1$ канал. Тогда модель для пакетной передачи данных соответствует системе

массового обслуживания (СМО) М/М/1. В этой модели М – простейший поток событий, 1 – канальность прибора обслуживания пакетного трафика. Основные параметры и характеристики модели указаны в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры и характеристики СМО М/М/1

Переменная	Определение
λ	Интенсивность потока заявок
μ	Интенсивность обслуживания заявок
w	Среднее время ожидания обслуживания (пребывания в очереди)
l	Средняя длина очереди, фактически соответствует вероятности $P(l=i)$, что система находится в i -ом состоянии
u	Среднее время пребывания заявок в системе
n	Среднее число заявок в системе в целом

Проведем расчет интенсивности нагрузки пакетной передачи для буднего и выходного/праздничного дня.

Для удобства присвоим каждой категории ТС переменную, представляющую количество автомобилей, передающих информацию на БС. Обозначим $M_{лег}$ – количество ТС категории М1, $M_{авт}$ – количество ТС категории М2 и М3, $M_{груз}$ – количество ТС категории N1, N2 и N3.

По статистике в среднем за час в будний день по трассе проезжает [25]:

а) $M_{лег} = 1210$ ед;

б) $M_{авт} = 54$ ед;

в) $M_{груз} = 1220$ ед.

В выходной/праздничный день [25]:

а) $M_{\text{лег}} = 2570$ ед;

б) $M_{\text{авт}} = 109$ ед;

в) $M_{\text{груз}} = 1320$ ед.

Интенсивность поступления пакетов данных рассчитывается по формуле 1 [26]:

$$\Lambda = M_{\text{лег}} \cdot \lambda_{\text{лег}} + M_{\text{авт}} \cdot \lambda_{\text{авт}} + M_{\text{груз}} \cdot \lambda_{\text{груз}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{лег}} = 1.08[\text{Эрл/ч}]$, $\lambda_{\text{авт}} = 0.433[\text{Эрл/ч}]$, $\lambda_{\text{груз}} = 2.973[\text{Эрл/ч}]$ -

интенсивности входного потока пакетов данных от разных категорий ТС [25], тогда

интенсивность нагрузки пакетов данных рассчитывается по формуле 2 [26]:

$$\rho_{GPRS} = \frac{\Lambda}{\mu} = \Lambda \cdot t_n, \quad (2)$$

где $\mu = \frac{1}{t_n}$ - интенсивность обслуживания пакета данных,

t_n - время передачи пакета данных.

Результаты расчета интенсивности поступления пакетов Λ и интенсивности нагрузки ρ_{GPRS} в зависимости от типа дня (будни, выходной/праздник) сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Расчёт интенсивности поступления пакетов и интенсивности нагрузки поступления пакетов в будни и выходные/праздничные дни

Параметр	Результат	
	Будни	Выходной/ праздник
Λ , Эрл/ч	4 958	6 748
ρ_{GPRS} , Эрл	0.149	0.202

Вероятность простоя канала связи при рассчитанных значениях нагрузки определяется по формуле 3 [26]:

$$\eta = 1 - \rho_{GPRS}. \quad (3)$$

Количество заявок в системе рассчитывается как [26]:

$$n = \rho_{GPRS} + l = \frac{\rho_{GPRS}}{1 - \rho_{GPRS}}. \quad (4)$$

Число заявок в очереди из (4) определяется по формуле 5 [26]:

$$l = n - \rho_{GPRS} = \frac{\rho_{GPRS}}{1 - \rho_{GPRS}} - \rho_{GPRS} = \frac{\rho_{GPRS}^2}{1 - \rho_{GPRS}}. \quad (5)$$

Так как w – среднее время ожидания заявок в очереди, то [26]:

$$w = \frac{l}{\Lambda}. \quad (6)$$

Полное время пребывания заявок в СМО определяется как формула Литтла для полного времени пребывания заявок в системе [26]:

$$u = \frac{l + \rho_{GPRS}}{\Lambda} = \frac{n}{\Lambda}. \quad (7)$$

Функция распределения времени ожидания определяется по формуле 8 [26]:

$$w(t) = 1 - \rho_{GPRS} \cdot e^{-\frac{1 - \rho_{GPRS}}{\rho_{GPRS}} \cdot \Lambda \cdot t} \quad (8)$$

График функции распределения времени ожидания представлен на рисунке 7.

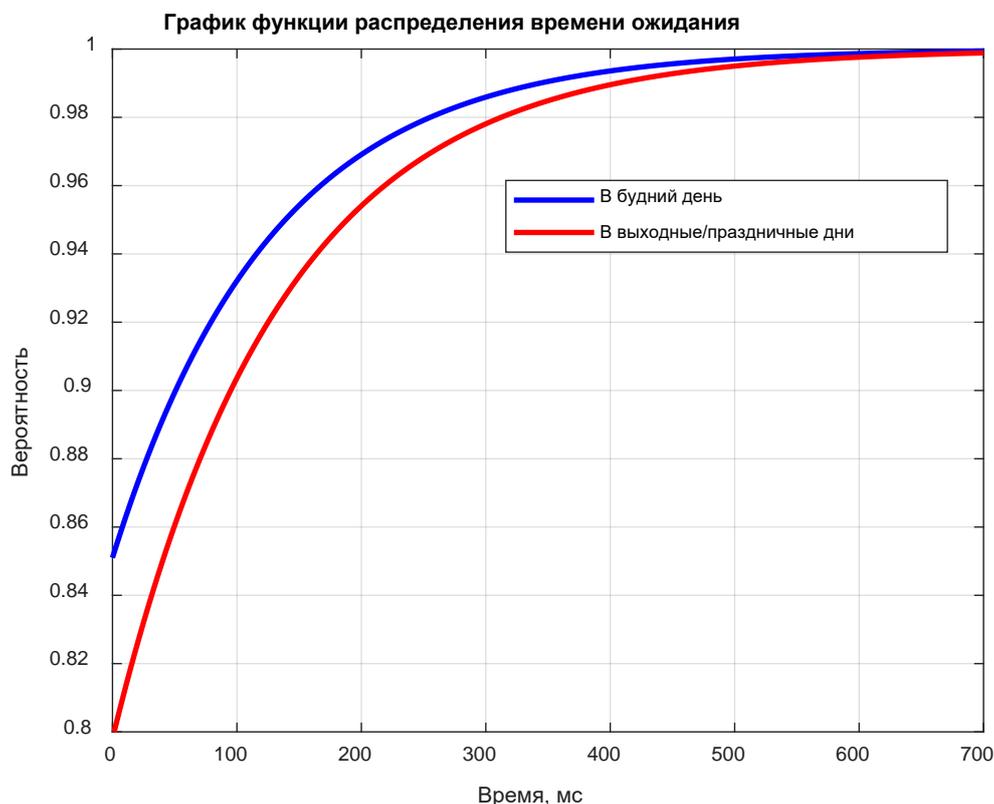


Рис. 7. Функция распределения времени ожидания

На данном графике длина очереди в начальный момент времени определяется вероятностью простоя η обслуживающего прибора. По графику можно сделать вывод, что время ожидания для обслуживания ТС на платной дороге одной БС составит меньше 400 мс с вероятностью порядка 0.99 в будний день и праздничный день.

Результаты расчетов по формулам 3 – 7 сведены в таблицу 5.

Результаты расчетов основных параметров СМО М/М/1

Параметр	$\rho_{GPRS}=0.149$	$\rho_{GPRS}=0.202$
η	0.851	0.798
n	0.175	0.254
l	0.026	0.051
w	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$7.6 \cdot 10^{-6}$
u	6.723	4.94

Рассчитаем по формуле 9 предельное количество ТС, передающих пакеты данных, которое обслужит одна БС в будний день и выходной/праздничный день

$$L_{mc} = \frac{\rho_{GPRS}}{\rho_{GPRS1}} \cdot 24, \quad (9)$$

где ρ_{GPRS1} - интенсивность нагрузки от одного ТС.

Тогда при $\rho_{GPRS} = 0.149$ $L_{mc} = 118992$ ТС, а при $\rho_{GPRS} = 0.202$ $L_{mc} = 161952$ ТС.

Заключение

Благодаря контролю за транспортными средствами с помощью систем мониторинга и «ЭРА-ГЛОНАСС», которые принимают кодовые сигналы от глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS для определения местоположения, на платных дорогах можно отказаться от шлагбаумов на въезде и выезде. Решение приведет не только к уменьшению расходов на обслуживание системы оплаты проезда, уменьшению заторов на въезде и выезде при переходе с минимальными затратами на электронную систему оплаты. Предложенная

модернизация также позволяет улучшить существующие в России системы «свободный поток» с целью уменьшения вероятности безнаказанного бесплатного проезда, что открывает дополнительную возможность привлечения инвестиций на строительство и содержание платных дорог.

С помощью теории массового обслуживания рассчитана интенсивность нагрузки поступления пакетов, определено количество ТС, передающих пакеты данных, построены графики функции распределения времени ожидания для одной БС, сота которой обслуживает участок платной дороги. По результатам расчетов время ожидания для обслуживания ТС на платной дороге одной БС составит не более 400 мс с вероятностью порядка 0.99 в будний и праздничный день. Максимальное предельное количество ТС, обслуживаемых одной БС за один день, составит 161952.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект КОМФИ № 18-00-01103).

Библиографический список

1. Кулыгин С.В. Модернизация системы «ЭРА -ГЛОНАСС» для получения дополнительных данных о водителе и более экстренного реагирования на ДТП // XII Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос»: сборник трудов (Санкт-Петербург, 23-25 апреля 2020). - СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2020. Т. 3. С. 219 – 225.

2. Кочкаров А.А. Моделирование структурно-динамических процессов в сетевых системах мониторинга // Антенны. 2013. № 1 (188). С. 164 – 168.
3. Ревнивых С.Г., Сердюков А.И., Болкунов А.И. Некоторые аспекты проектирования перспективных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8225>
4. Щитов С.В., Евдокимов В.Г., Кривуца З.Ф. Использование навигационной системы ГЛОНАСС и GPS для мониторинга автомобильного транспорта // Двойные технологии. 2012. № 3. С. 26 - 29.
5. Кулыгин С.В. Использование «ЭРА-ГЛОНАСС» и системы мониторинга в качестве контроля за транспортными средствами на платной дороге // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), (Алушта, 6 - 13 сентября 2020). - М.: Изд-во МАИ, 2020. С. 698 - 700.
6. Плюсы и минусы платной дороги, 2019. URL: <https://zen.yandex.ru/media/carradar/pliusy-i-minusy-platnoi-dorogi-5d121e123d1d8800b9bc39cc>
7. Павленко Н., Зимин В. Особенности финансирования дорожного строительства в России // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2012. № 3. С. 317 - 323.
8. Карманов Д.С., Марилов В.С. Современное состояние и перспективы развития платных дорог в России // Развитие теории и практики автомобильных перевозок,

транспортной логистики: сборник научных трудов. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2017. С. 136 - 140.

9. Нечаева Е.М. Взаимосвязь конфигурации платной дороги, типа и технологии системы сбора платы за проезд // Материалы I Международной научной конференции «Актуальные вопросы экономики и управления» (Москва, апрель 2011). – М.: Издательский центр РИОР, 2011. Т. 2. С. 231 - 237.

10. Ceseri P. From payment to telepayment. Dal pedaggio al telepedaggio // Autostrade, 1992, vol. 34, no. 4, pp. 4 - 11. URL: <https://trid.trb.org/view/529352>

11. Kasprzyk Z., Siemiejczyk M. Some Problems of Functional Analysis of Electronic Toll Collection System (ViaToll) // International Conference on Transport Systems Telematics, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, pp. 426 - 432. DOI: [10.1007/978-3-642-41647-7_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_52)

12. Ефимов А.И., Ильин В.Н. Методология определения формы объектов по данным видеоряда камеры // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84590>

13. Извекова К. Свободный поток: в России появилась первая платная дорога без шлагбаумов. URL: <https://www.avtovzglyad.ru/promo/ckad-vokrug-moskvy-s-veterkom/2020-11-12-svobodnyj-potok-v-rossii-pojavilas-pervaja-platnaja-doroga-bez-shlagbaumov>

14. Петрусевич А.А., Шарапин А.А. Перспективы использования систем free flow при взимании оплаты за дороги // 75 научная конференция студентов и аспирантов

Белорусского государственного университета: сборник трудов (Минск, 23-24 мая 2018). - Минск: Белорусский государственный университет, 2018. С. 284 - 288.

15. Lu S., He T., Gao Z. Electronic toll collection system based on global positioning system technology // 2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, IEEE, 2010, vol. 2, pp. 11 - 14. DOI: [10.1109/CESCE.2010.147](https://doi.org/10.1109/CESCE.2010.147)

16. Jain P., Dhillon P., Singh A.V., Vats K., Tripathi S. A Unique Identity based Automated Toll Collection System using RFID and Image Processing // 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, Uttar Pradesh, India, 2018, pp. 988 - 991. DOI: [10.1109/GUCON.2018.8675073](https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675073)

17. Chattopadhyay D., Rasheed S., Yan L., Lopez A.A., Farmer J., Brown D.E. Machine Learning for Real-Time Vehicle Detection in All-Electronic Tolling System // 2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville, VA, USA, 2020, pp. 1 - 6.

18. Власов В.М. Телематика - ключ к созданию эффективных систем сбора платы за проезд по платным дорогам в России // Автотранспортное предприятие. 2014. № 12. С. 5 - 8.

19. ГОСТ Р 54620-2011. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Автомобильная система/устройство вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2013. – 107 с.

20. Кочкаров А.А., Сомов Д.С., Крапчатов А.И. Повышение эффективности систем мониторинга сложных технических и информационно-управляющих систем. Метод структурно-интегрированных индикаторов // Вестник РГГУ. Серия: Экономика. Управление. Право. 2011. № 4 (66). С. 202 - 216.

21. Валайтите А.А. Никитин Д.П. Садовская Е.В. Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС при помощи имитатора навигационного поля // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53172>

22. Сидоров О.В. Использование интеллектуальных систем информирования и реагирования в работе МЧС России на инфраструктуре платных дорог Государственной компании «Автодор» // Международная конференция «Роль и место ИТС в сети платных автомобильных дорог Российской Федерации. Практический опыт и перспективы развития» (Москва, 29-30 октября 2014). URL: <https://docplayer.ru/28587572-Konferencii-rol-i-mesto-its-v-seti-platnyh-avtomobilnyh-dorog-rossiyskoy-federacii-prakticheskiy-opyt-i-perspektivy-razvitiya.html>

23. Роскомнадзор подготовил карту покрытия мобильной связью магистральных автодорог на территории России, 2011. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/29038>

24. Богданов А.С., Шевцов В.А. Передача обслуживания по сигналам локальной радионавигационной сети // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26041>

25. Анализ трафика, Cisco, 2008. URL: https://www.cisco.com/c/ru_ru/td/docs/ios/solutions_docs/voip_solutions/TA_ISD.html.

26. Соколов А.Н., Соколов Н.А. Однолинейные системы массового обслуживания. - СПб.: Изд-во «Теледом», 2010. – 112 с.

Vehicular flows monitoring on toll road sections based on the GNSS employing

Kulygin S.V.^{1*}, Kazachkov V.O.^{1}, Kochkarov A.A.^{2,3***}**

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4, Volokolamskoe
shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

²*JSC “RTI”, 10/1, 8 March str., 127083, Moscow, Russia*

³*Financial University under the Government of the Russian Federation,
49, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125993, Russia*

**e-mail: Serega97-never@mail.ru*

***e-mail: kazachkovvo@mai.ru*

****e-mail: akochkar@gmail.com*

Abstract

Currently, the toll roads construction or organization of the toll roads on the already existing road network is a promising trend in the development of a high-quality road system. In the context of insufficiency of the budget funds being laid out in Russia for the toll road infrastructure development, the issue of attracting private investment for road construction has become acute. For investments attraction, the toll road system should be organized so that it would guarantee refunding of the committed facilities and sufficient profit margin to the investor for account of toll operation of the object, as well as economic concernment of the society, which would employ this system.

The obvious disadvantage of toll drive way systems with toll gathering points is the costly maintenance of the systems, both in terms of the entry and/or exit checkpoints equipment, and the involvement of full-time operators. The main disadvantage for the drivers is traffic jams creation at the entrance and exit of the toll road section.

To solve these problems, an electronic system of fees was implemented. With this technology implementation, the driver passes the toll plazas without stopping at a given speed. Payment is being made with special electronic systems. Today, the existing Russian systems have their drawbacks, such as inability to read heavily polluted or deliberately hidden license plates without transponders, as well as the lack of on-time payment guarantee of the drive way at the post-payment.

The purpose of the work consists in studying automated information systems that determine location of a vehicle by the Global navigation satellite systems GLONASS and GPS, to eliminate the above said problems peculiar to the electronic tolling systems.

Implementation of the ERA-GLONASS automated information data systems and vehicle monitoring systems opens up an opportunity to the electronic tolling system improvement. For vehicles with the above-mentioned systems, the approach does not require installation of additional equipment, and if the individual vehicle identifier is linked to the vehicle identification number (VIN) and its registration plate, it allows solving the problem of unreadable numbers. The absence of changes to the hardware on the car side allows also performing further modification of the system with device updates by simple flashing.

For this solution implementation, the machine (computer) code and previously released devices updating is necessary. The access point for vehicles registration at the entrance and exit of the toll road section are necessary to be installed herewith. Information transfer to the data processing center for the vehicles monitoring will be realized through the mobile GSM system. After data processing, a driver would receive a receipt for payment for the toll road section passage.

For the proposed solution verification, computation of the traffic being transferred from the vehicles to the GSM standard base station on weekdays and weekends/holidays based on the M/M/1 queuing system.

The article presents the obtained graphs of the distribution function of waiting time for a vehicle serving by a single station covering the toll road section. Inferences were drawn that the servicing waiting time would be less than 400 ms with probability of about 0.99 on both weekday and holiday.

The maximum number of vehicles served by one base station was computed as well. Thus, on a weekday, this number will be 118992, and on a weekend/holiday 161952 vehicles.

Thus, due to vehicles monitoring by the “ERA-GLONASS” and monitoring systems, which receive code signals from the Global navigation satellite systems GLONASS and GPS to determine the location, the barriers at the toll roads entrance and exit can be discarded. The solution will lead not only to the electronic passage fare system maintenance cost reduction, traffic jams reduction at the entrance and exit when transition to the electronic paying system with minimum costs.

The proposed modernization can also act as an independent system, and allows also improving the existing electronic fare payment systems in Russia to reduce the likelihood of unpunished free drive way, which opens up an additional opportunity to attract investment for construction and maintenance of the toll roads.

Keywords: “ERA-GLONASS”, vehicle monitoring system, toll road, queuing systems.

References

1. Kulygin S.V. *XII Obshcherossiiskaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Molodezh'. Tekhnika. Kosmos*, Saint Petersburg, BGTU «VOENMEKh», 2020, vol. 3, pp. 219 – 225.
2. Kochkarov A.A. *Antenny*, 2013, no. 1 (188), pp. 164 – 168.
3. Revniviykh S.G., Serdyukov A.I., Bolkunov A.I. *Trudy MAI*, 2009, no. 34. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=8225>
4. Shchitov S.V., Evdokimov V.G., Krivutsa Z.F. *Dvoinye tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 26 - 29.
5. Kulygin S.V. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii po prikladnoi matematike i mekhanike v aerokosmicheskoi otrasli (AMMAI'2020)*, Moscow, Izd-vo MAI, 2020, pp. 698 - 700.
6. *Plyusy i minusy platnoi dorogi*, 2019. URL: <https://zen.yandex.ru/media/carradar/pliusy-i-minusy-platnoi-dorogi-5d121e123d1d8800b9bc39cc>
7. Pavlenko N., Zimin V. *RISK: Resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsia*, 2012, no. 3, pp. 317 - 323.
8. Karmanov D.S., Marilov V.S. *Razvitie teorii i praktiki avtomobil'nykh perevozok, transportnoi logistiki* (Theory and practice development of automobile transportation, transportation logistics), Omsk, Sibirskii gosudarstvennyi avtomobil'no-dorozhnyi universitet, 2017, pp. 136 - 140.
9. Nechaeva E.M. *Materialy I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii “Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya”*, Moscow, Izdatel'skii tsentr RIOR, 2011, vol. 2, pp. 231 - 237.

10. Ceseri P. From payment to telepayment. Dal pedaggio al telepedaggio, *Autostrade*, 1992, vol. 34, no. 4, pp. 4 - 11. URL: <https://trid.trb.org/view/529352>
11. Kasprzyk Z., Siergiejczyk M. Some Problems of Functional Analysis of Electronic Toll Collection System (ViaToll), *International Conference on Transport Systems Telematics*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, pp. 426 - 432. DOI: [10.1007/978-3-642-41647-7_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_52)
12. Efimov A.I., Il'in V.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84590>
13. Izvekova K. *Svobodnyi potok: v Rossii poyavilas' pervaya platnaya doroga bez shlagbaumov*. URL: <https://www.avtovzglyad.ru/promo/ckad-vokrug-moskvy-s-veterkom/2020-11-12-svobodnyj-potok-v-rossii-pojavilas-pervaja-platnaja-doroga-bez-shlagbaumov>
14. Petrusevich A.A., Sharapin A.A. *75 nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi universitet, 2018, pp. 284 - 288.
15. Lu S., He T., Gao Z. Electronic toll collection system based on global positioning system technology, *2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering*, IEEE, 2010, vol. 2, pp. 11 - 14. DOI: [10.1109/CESCE.2010.147](https://doi.org/10.1109/CESCE.2010.147)
16. Jain P., Dhillon P., Singh A.V., Vats K., Tripathi S. A Unique Identity based Automated Toll Collection System using RFID and Image Processing, *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Greater Noida, Uttar Pradesh, India, 2018, pp. 988 - 991. DOI: [10.1109/GUCON.2018.8675073](https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675073)

17. Chattopadhyay D., Rasheed S., Yan L., Lopez A.A., Farmer J., Brown D.E. Machine Learning for Real-Time Vehicle Detection in All-Electronic Tolling System, *2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, Charlottesville, VA, USA, 2020, pp. 1 - 6.
18. Vlasov V.M. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2014, no. 12, pp. 5 - 8.
19. *GOST R 54620-2011. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Sistema ekstremnogo reagirovaniya pri avariyaakh. Avtomobil'naya sistema/ustroistvo vyzova ekstremnykh operativnykh sluzhb. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* (State Standard R 54620-2011. Global navigation satellite system. Emergency response system in case of accidents. Vehicle system. In-Vehicle Emergency Call System. Device. General technical requirements), Moscow, Standarty, 2013, 107 p.
20. Kochkarov A.A., Somov D.S., Krapchatov A.I. *Vestnik RGGU. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo*. 2011, no. 4 (66), pp. 202 - 216.
21. Valaitite A.A. Nikitin D.P. Sadovskaya E.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53172>
22. Sidorov O.V. *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Rol' i mesto ITS v seti platnykh avtomobil'nykh dorog Rossiiskoi Federatsii. Prakticheskii opyt i perspektivy razvitiya"*, Moscow, 2014. URL: <https://docplayer.ru/28587572-Konferencii-rol-i-mesto-its-v-seti-platnyh-avtomobilnyh-dorog-rossiyskoy-federacii-prakticheskii-opyt-i-perspektivy-razvitiya.html>
23. *Roskomnadzor podgotovil kartu pokrytiya mobil'noi svyaz'yu magistral'nykh avtodorog na territorii Rossii*, 2011. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/29038>

24. Bogdanov A.S., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL:
<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26041>
25. *Analiz trafika*, Cisco, 2008. URL:
https://www.cisco.com/c/ru_ru/td/docs/ios/solutions_docs/voip_solutions/TA_ISD.html.
26. Sokolov A.N., Sokolov N.A. *Odnolineinye sistemy massovogo obsluzhivaniya* (Single-line queuing systems: a tutorial), Saint Petersburg, Izd-vo "Teledom", 2010, 112 p.