

Моделирование процесса сцепления колеса локомотива с рельсом

Н. Н. ЛЯПУШКИН, канд. физ.-мат. наук, доцент, А. Н. САВОСЬКИН, докт. техн. наук, профессор, А. А. ЧУЧИН, канд. техн. наук, доцент (МИИТ)

Результаты эксплуатационных испытаний, приведенные в [1], свидетельствуют о том, что при шунтировании обмотки якоря тягового электродвигателя (ТЭД) возможно восстановление сцепления после буксования, если скорость скольжения колеса локомотива при буксовании находится в пределах 7–30 км/ч, а выдержка по времени после сброса позиций контроллера машинистом локомотива составляет 1–3 с.

На рис. 1 приведена схема шунтирования обмоток якоря ТЭД. При включенных контактах КМ1 и КМ4 и выключенных контактах КМ2 и КМ3 она представляет собой мостовую схему активных сопротивлений последовательно включенных с обмотками возбуждения ТЭД. В одну диагональ этой схемы включен источник питания, а в другую сопротивление r_3 . В отсутствие буксования сопротивления плеч схемы равны и токи первого и второго якоря ТЭД одинаковы: $I_{я1} = I_{я2} = I_я$, так же как и токи шунтов: $I_{ш1} = I_{ш2} = I_{ш}$. Величина тока якоря равна разности тока возбуждения и тока шунта:

$$I_я = I_в - I_{ш}$$

При буксовании колес одной или обеих осей равновесие мостовой схемы нарушается вследствие действия э. д. с. буксующих двигателей.

На рис. 2 приведена осциллограмма процесса буксования [1], сопровождающегося уменьшением тока возбуждения (тока якоря) ТЭД. Как видно из этого рисунка, буксование начинается при $t=3$ с и заканчивается при $t=8$ с, $I_в$ и $I_я$ резко уменьшаются в результате сброса позиций контроллера машинистом локомотива. Следующее за этим незначительное возрастание $I_в$ при $t=8-9$ с означает прекращение буксования и восстановление сцепления колес локомотива с рельсом без изменения положения контроллера. Затем машинист сбросил еще три позиции и начал набор позиций, не приводящих к буксованию колес

Рассмотренную осциллограмму, можно получить аналитически, с помощью модели сцепления, основанной на трансляционном пластическом течении поверхностей колеса и рельса.

Основные принципы построения модели следующие [2]:

- сцепление колеса с рельсом определяет микропроцесс на контактной площадке, представляющий собой взаимодействие группы атомов колеса и рельса (захват), которое осуществляется в результате образования активных центров на поверхностях колеса и рельса вследствие выхода дислокаций при пластической деформации под действием нормального и тангенциального давления;
- окисная пленка, имеющаяся на поверхности рельса с нанесенными на ней загрязнениями, в процессе скольжения колеса по рельсу разрушается в силу разности величин коэффициентов теплового и объемного расширения рельса и окисла;

• величина силы сцепления определяется силой разрушения захватов, имеющихся в данный момент на контактной площадке.

Отметим, что согласно этим принципам разрушение окисной пленки с загрязнениями на поверхности рельса в пятне контакта, влияющее на величину сцепления, происходит вследствие скольжения колеса по рельсу. Модель сцепления, рассмотренная в [2], была уточнена. В результате рассмотрения динамики движения дислокаций была получена зависимость концентрации дислокаций на поверхности рельса в пятне контакта (N_d) от тяговой характеристики ТЭД: $F_k = f(v)$, исходной концентрации дислокаций на поверхности рельса и коэффициента участия μ_v , являющегося функцией скорости движения локомотива. Эта зависимость включена в систему уравнений (1), с помощью которой вычисляется величина коэффициента сцепления, лежащая в основе построения аналитической модели экспериментальной осциллограммы:

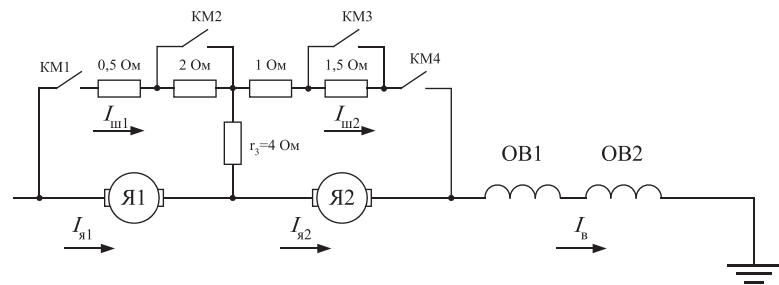


Рис. 1. Схема шунтирования обмоток якоря тягового электродвигателя

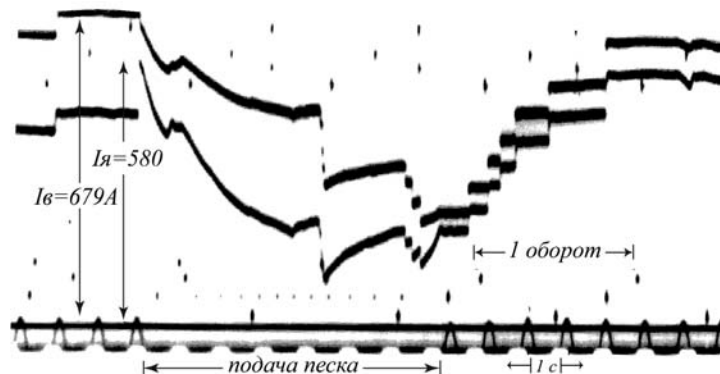


Рис. 2. Осциллограмма допустимого процесса буксования [1]: скорость движения локомотива 3,9 км/ч, скорость скольжения 23 км/ч

$$\begin{cases} N_d = \mu_y \left(\frac{F_K(v)}{S_0 \sigma_{BH}} \right)^{0,25} N_d^* \\ \Lambda = n \varepsilon^{0,3} \exp \left[\frac{n \cdot 10^3}{2,2 \cdot 10^4 \varepsilon + 300} - 10 \varepsilon \right] \\ \psi_{сц} = \frac{U_0}{r_a N_a \Pi} \cdot \frac{S_{иск}}{S_i} \cdot N_d \cdot S_0 \cdot \Lambda_p(\varepsilon) \end{cases} \quad (1)$$

где Λ — отношения величины поверхности разрушения пленки к рассматриваемой поверхности;
 ε — относительная скорость скольжения колеса;
 U_0 — энергия связи одного моля в металле ($U_0 = 2,5 \cdot 10^4$ Дж/моль);
 N_a — число Авагадро ($N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹);
 r_a — расстояние между взаимодействующими атомами, которое примем равным диаметру первой боровской орбиты ($r_a \approx 2,3 \cdot 10^{-10}$ м);
 $\psi_{сц}$ — коэффициент сцепления;
 S_i — площадь взаимодействия i -го атома в j -м захвате;
 $S_{иск}$ — площадь искажения решетки на поверхности рельса в результате выхода одной дислокации.

Структурная схема, описывающая электромагнитные и электромеханические процессы при реализации сил сцепления колес локомотива с рельсами, приведена на рис. 3. Входными данными для блока системы уравнений вертикальных и крутильных колебаний являются электромагнитные моменты первого и второго тягового двигателей, моменты сцепления под левым и правым колесом для первой и второй колесной пары, а выходными величинами — скорости скольжения левого и правого колеса.

Далее вычисляются значения относительной скорости скольжения колес по рельсам, которые вместе с силой тяги выступают задающими сигналами для блока, в котором происходит вычисление коэффициента сцепления. Входными сигналами для блока решения уравнения движения поезда служат значения силы сцепления колес с рельсами первой и второй колесной пары, полученные в результате умножения коэффициента сцепления на вертикальную статическую и динамическую нагрузку от колеса на рельсы. Решением уравнения движения поезда является линейная скорость движения локомотива.

Моделирование процессов сцепления колес осуществлялось в пакете MatLab [3, 4].

При анализе процесса кратковременного буксования были получены зависимости (рис. 4–8) величины силы сцепления колес локомотива с рельсом $F_{сц}$, относительной скорости скольжения колеса по рельсу ε , тока якоря I_a , тока возбуждения I_B и тока шунта $I_{ш}$ от времени для всех четырех осей.

Сопоставление осциллограммы буксования (рис. 2) и расчетной зависимости токов возбуждения, якоря и шунта при кратковременном буксовании (рис. 4) свидетельствует об их адекватности.

Из полученных зависимостей видно, что с десятой секунды начинается буксование колеса локомотива, которое прерывается в конце тринадцатой секунды вследствие сброса позиций, резкого уменьшения тока возбуждения (I_B) и якоря (I_a) ТЭД локомотива (рис. 5, 7). С этого момента происходит уменьшение скольжения и начало восстановления сцепления колеса с рельсом. Начиная с семнадцатой секунды происходит полное восстановление сцепления, последовательно у колес первой, второй, третьей и четвертой осей локомотива (рис. 5).

Как видно из рисунка, величины силы сцепления у колесных осей локомотива не совпадают. Это связано с различием величин токов шунта разных ТЭД, что объясняется различием э. д. с. бук-

сующих двигателей. На рис. 8 приведены токи шунта для разных якорей. Изменения величины тока шунта у третьего и четвертого якоря меньше, чем у других якорей, и практически равны. Различия токов шунта якорей приводит к неравному изменению токов I_B и I_a при буксовании. Большее изменение тока шунта приводит к большему изменению токов I_a и I_B . В результате на всех приведенных рисунках наблюдается отличие, связанное с номером оси.

Набор позиций машинистом (увеличение I_B и I_a ТЭД; рис. 4, 5, 7) не вызывает скольжения. Это означает, что произошло восстановление сцепления колес локомотива с рельсом.

Восстановление сцепления после кратковременного буксования и сброса позиций можно объяснить следующим. При срыве сцепления поверхность рельса в пятне контакта имеет температуру, близкую к 1000 К, при которой поверхностные слои рельса не обладают сопротивлением сдвигу. Это и служит

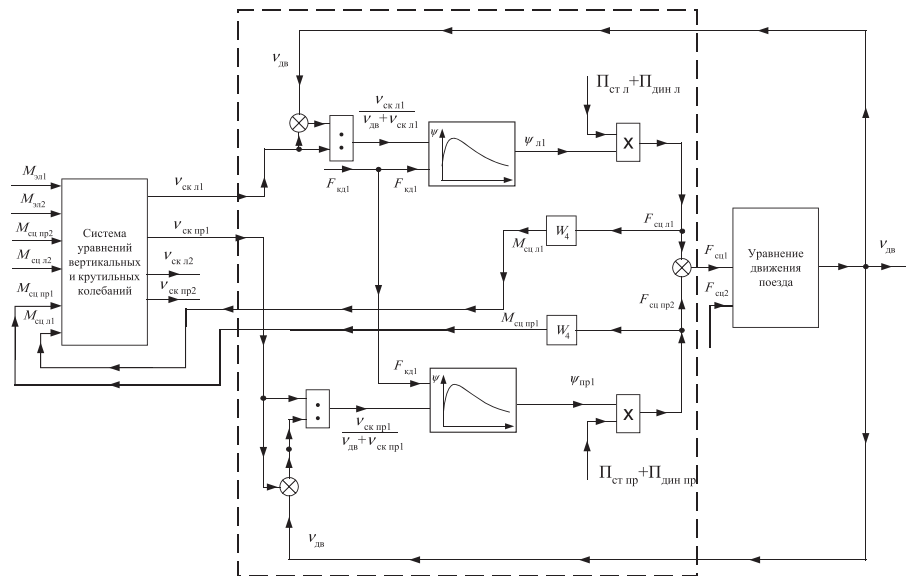


Рис. 3. Структурная схема реализации сил сцепления колеса локомотива с рельсом

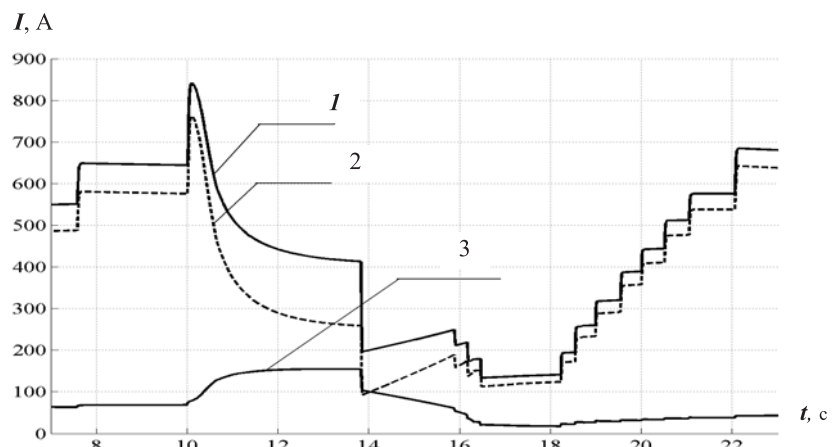


Рис. 4. Зависимости величин тока возбуждения, токов якоря и шунта (кривые 1, 2 и 3 соответственно) от времени для второй оси

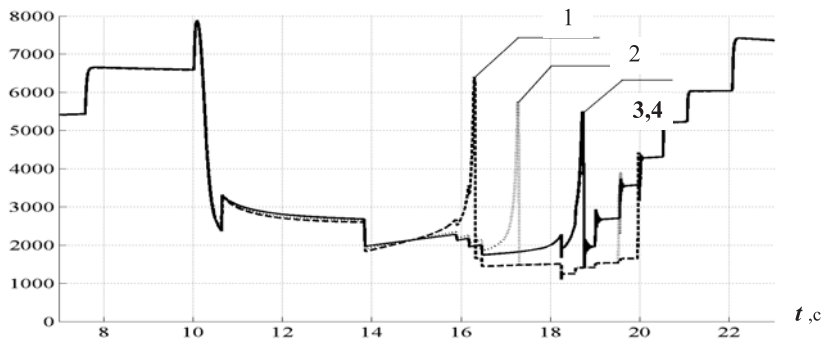


Рис. 5. Зависимость величины силы сцепления колес первой, второй и третьей осей локомотива (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) от времени

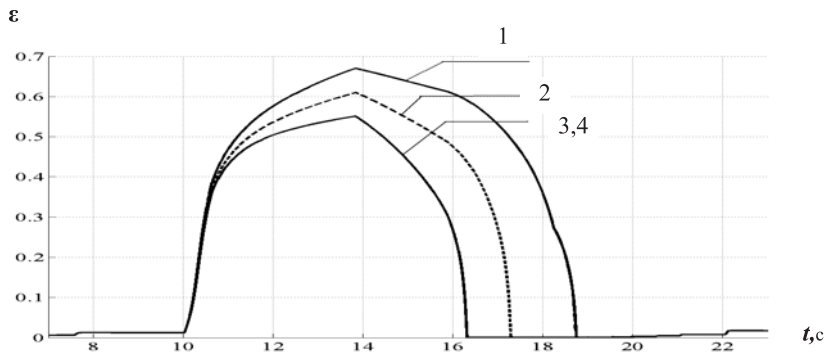


Рис. 6. Зависимость величины относительной скорости скольжения колес первой, второй и третьей осей локомотива (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) от времени

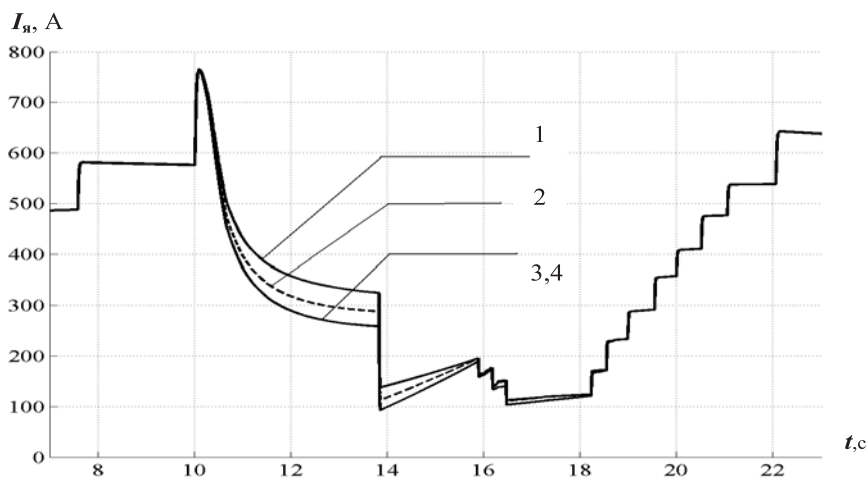


Рис. 7 Зависимость величины тока якоря первого, второго, третьего и четвертого ТЭД (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) от времени

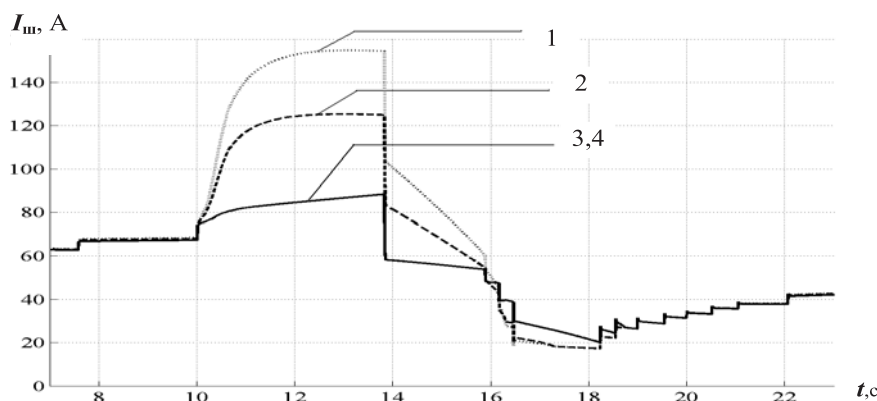


Рис. 8. Зависимость силы тока шунта (1, 2, 3 и 4 соответственно) якоря от времени

причиной срыва сцепления [2]. При этом окисная пленка на поверхности рельса с нанесенными на нее загрязнениями разрушается и при скольжении колеса по рельсу выносятся на периферию пятна контакта. Резкое уменьшение токов $I_я$ и $I_в$ в конце тринадцатой секунды приводит к уменьшению силы тяги, уменьшению скольжения колеса по рельсу, поверхность которого свободна от окисной пленки. В силу этого на всей поверхности пятна контакта происходит взаимодействие атомов рельса и колеса (захват). В дальнейшем увеличение токов $I_я$ и $I_в$ приводит к увеличению силы тяги (F_k), в результате увеличиваются концентрации дислокаций в пятне контакта и число захватов, что служит причиной увеличения силы сцепления колеса с рельсом без проскальзывания.

Как отмечалось в [1], важным фактором в восстановлении сцепления является скорость скольжения колеса по рельсу и поступательная скорость движения локомотива. На рис. 6 представлена зависимость относительной скорости скольжения от времени. С момента срыва сцепления на десятой секунде относительная скорость скольжения колеса по рельсу ϵ к моменту сброса позиций машинистом достигает 0,6–0,7 в зависимости от номера оси локомотива. Такое значение ϵ означает глубокое буксование локомотива.

Большая скорость скольжения приведет к тому, что глубина прогрева рельса будет значительной, как и время для возвращения поверхностных слоев рельса в равновесное состояние. Малая скорость скольжения не даст возможности создать условия для реализации сцепления.

Малая скорость поступательного движения колеса дает возможность рассматривать процессы взаимодействия в пятне контакта как квазистационарные, что благоприятно для осуществления захватов на всем пятне контакта колеса с рельсом.

Таким образом, при шунтировании обмоток якоря с последовательным возбуждением ТЭД его тяговая характеристика становится более жесткой (рис. 4). В результате при буксовании колесной пары изменение тока возбуждения значительно меньше, чем ток якоря.

На рис. 9 представлены зависимости величины силы сцепления от относительной скорости скольжения, в виде фазовой траектории, в пределах а) $0 \div 0,7$, б) $0 \div 0,02$.

Как видно из этого рисунка, при $\epsilon = 0-0,02$ наблюдаются крутильные автоколебания колеса локомотива вслед-

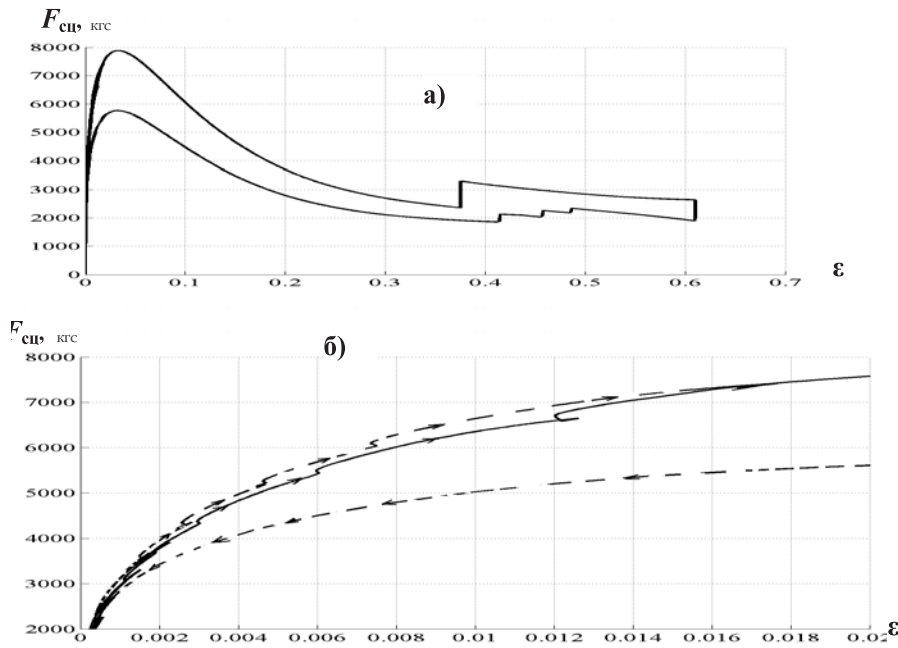


Рис. 9. Зависимость величины силы сцепления колес второй оси локомотива от относительной скорости скольжения: а) $0 < \epsilon < 0,7$; б) $0 < \epsilon < 0,02$

ствии неравновесного состояния поверхности рельса, что связано с температурой поверхности, вызывающей частичную потерю сопротивления сдвигу. Превышение этой температуры увеличивает глубину прогрева, состоя-

ние поверхности становится равновесным, поверхность рельса утрачивает сопротивление деформации сдвига.

Удовлетворительная сходимость расчетных кривых и экспериментальной осциллограммы и объяснение наблюда-

емого процесса восстановления сцепления после кратковременного буксования колес локомотива свидетельствуют о перспективности уточненной модели сцепления колеса с рельсом, рассматривающей трансляционное пластическое течение поверхностей колеса и рельса в пятне контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самме Г. В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами: Монография. — М.: Маршрут, 2005.
2. Ляпушкин Н. Н., Савоськин А. Н. Модель физических процессов в пятне контакта при движении колеса по рельсу со скольжением // Наука и техника транспорта. — 2008. — № 1. — С. 33–43.
3. Савоськин А. Н., Чучин А. А., Васильев А. П. Исследование процессов срыва сцепления и буксования в тяговом приводе I класса // Наука и техника транспорта. — 2009. — № 2.
4. Савоськин А. Н., Чучин А. А., Васильев А. П. Процессы автоколебаний, возникающие при срыве и восстановлении сцепления колеса электровагона с рельсом // Вестн. Ин-та тяги и подвижного состава «Подвижной состав XXI века». Вып. 5: матер. межд. науч.-практ. конф. / Под ред. Ю. А. Давыдова и А. Е. Стецюка. — Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008.

The screenshot shows the homepage of the website www.rostransport.com. The header includes the title "TRANSPORT РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ" and "ПОРТАЛ ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ". Navigation tabs include "О нас", "Партнеры", "Карта сайта", and "Координаты". A search bar is located on the right.

The main content area is divided into several sections:

- Новости отрасли (Industry News):**
 - 2011-01-12 Пробки с умом:** Через два года их ликвидации в Москве займется интеллектуальная транспортная система. Интеллектуальная транспортная система должна быть создана в столице к 2013 году. Об этом заявил вчера на заседании правительства Москвы мэр города Сергей Собянин. Концепцию ее он потребовал утвердить в текущем году и в течение него же заняться первоочередными мероприятиями по ее...
 - 2011-01-11 Обогнали Европу:** Продажи автобусов в России растут быстрее, чем в ЕС. Продажи коммерческих автомобилей в Европе стабильно растут. В сегменте легких коммерческих автомобилей за 11 месяцев 2010 г. рост составил 8,7%. Спад показали только новые автобусы, продажи которых за 11 месяцев упали на 11,2%. И этот спад, по прогнозам экспертов, продолжится. В...
 - 2011-01-11 Государство продает крупнейший аэропорт Сибири:** Роснатурооборот объявило о продаже контрольного пакета новосибирского международного аэропорта "Толчаево". На торги будет выставлен 51 процент уставного капитала, что составляет 68 процентов обыкновенных акций - это весь пакет ценных бумаг, находящийся в собственности Российской Федерации в лице Федерального агентства по управлению...
- Уважаемые господа! (Dear Sirs!):** Редакция журнала "Транспорт Российской Федерации" совместно с издательством "Транспорт" выпускает "Морской и речной транспорт". Основная цель...
- Журнал "Транспорт РФ":** Журнал о науке, экономике, практике.
- Перевозки:** Портал, посвященный перевозкам и перевозчикам. Более 20000 компаний.
- О. А. Никонова, Президент Ассоциации юношеских автомобильных школ России:** На злобу дня. Когда бездействие равносильно убийству... Уровень безопасности дорожного движения в России один из самых низких в Европе. Риск гибели жителя на дорогах России в 2,5 раза выше, чем его средняя величина в Европе, и в 3,5 раза выше, чем в...

At the bottom of the page, there is a large banner with the website address www.rostransport.com and the text "Портал для специалистов". There are also images of the journal covers.