НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ИЗВЕСТИЯ ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ, выпуск 4 (45), 2015

ISSN (Print) 1815-588X

Учредитель и издатель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Адрес учредителя и издателя
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32

Адрес редакции
190031, СПб., Московский пр., 9,
тел. (812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС2-7499 от 06.04.2005 г., выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, Управление по Северо-Западному федеральному округу

Журнал зарегистрирован
в Российском индексе научного цитирования РИНЦ

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19.02.2010 г., № 6/6)

Журнал имеет институт рецензирования

Журнал распространяется
по адресно-целевой подписке через редакцию и каталог ОАО «Роспечать» (индекс 18509)

Подписано в печать с оригинал-макета 05.02.2016.
Формат 60×90 1/8. Бумага офсетная. Печать МФУ.
Усл. печ. л. 18,75. Уч.-изд. л. 13,5. Установочный тираж 300 экз.
Заказ 112. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ПГУПС
190031, СПб., Московский пр., 9.

SCIENTIFIC PUBLICATION

PROCEEDINGS OF PETERSBURG TRANSPORT UNIVERSITY Issue 4 (45) – 2015

ISSN (Print) 1815-588X

Founder and publisher
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Petersburg State Transport University»

Founder and publisher address
190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32

Editorial address
190031, St. Petersburg, Moskovskiy pr., 9,
(812) 314-92-32
e-mail: izvestia@izvestiapgups.org

Mass media registration certificate number
ПИ N ФС2-7499 dd. 06.04.2005 issued by the Federal service for the monitoring of legislation compliance in the sphere of mass communications and the preservation of cultural heritage, North West Federal district division

The journal is registered in the Russian Science Citation Index (RSCI)

The Journal is included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and publications

The Journal has the Peer-review division

The Journal is destributed by direct subscription via Editorial office and Rospechat catalogue (item 18509)

Published by Petersburg State Transport University
190031, St. Petersburg., Moskovskiy pr., 9
Open price

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМАТИКА ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

УДК 629.423.1+06

А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчьян

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССАЖИРСКИХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Дата поступления: 09.10.2015
Решение о публикации: 10.11.2015

Цель: Сформулировать предложения для улучшения показателей энергоэффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при работе с неполной нагрузкой. **Методы:** Сделан критический анализ публикаций в технической литературе, позволивший выбрать направление исследований. Применен метод статистической обработки массивов записей данных бортового регистратора параметров движения. **Результаты:** Получена аналитическая зависимость КПД электровоза от реализуемой мощности. Сформулирован алгоритм регулирования числа тяговых двигателей, обеспечивающий стабилизацию КПД электровоза во всем диапазоне нагрузок. Построена компьютерная модель поезда, состоящего из электровоза и вагонов, причем электровоз представляет собой управляемую электромеханическую систему, в которой реализована возможность поосного (индивидуального) регулирования силы тяги. Результаты компьютерного моделирования показали высокую эффективность предлагаемой адаптивной автоматической системы управления многодвигательным тяговым приводом электровоза с использованием типовых профилей пути, утвержденных ОАО «РЖД». Снижено энергопотребление на тягу поезда за счет регулирования числа двигателей электровоза, находящихся в режиме тяги. **Практическая значимость:** Получен экономический эффект от снижения расхода электрической энергии на тягу.

Энергетическая эффективность, локомотивная тяга, неполная нагрузка, пассажирский электровоз, асинхронный тяговый привод, алгоритм, адаптивное автоматическое управление, многодвигательный тяговый привод.

Andrey A. Andryushchenko, Cand. Sci. (Eng.), department head (TRTrans LLC); ***Aleksandr A. Zarifyan**, postgraduate student, zar.plgrph@gmail.com; **Pavel G. Kolpakhchyan**, D. Eng., associate professor, department chairman, kolpahchyan@mail.ru (Rostov State Transport University) INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC PASSENGER LOCOMOTIVES WITH ASYNCHRONOUS LOCOMOTIVE DRIVING UNIT

Objective: To formulate proposals for improving energy efficiency indices of electric passenger locomotives with asynchronous towline driving unit when operating with partial load. **Methods:** Critical analysis of technical publications was conducted to determine the direction of studies. Method of statistical processing of data massives of movement parameters on-board recorder was used. **Results:**

Analytical dependency of electric locomotive's efficiency coefficient on actual power capacity was obtained. An algorithm for regulating the number of traction engines which ensures stabilisation of the electric locomotive's efficiency coefficient across the range of loads was formulated. A computer model of a train consisting of an electrical locomotive and several carriages was built, with the locomotive presented as a controllable electromechanical system in which possibility of axial (individual) regulation of locomotive power is realised. Computer simulation results indicated high efficiency of the proposed adaptive automated system for managing multi-engine locomotive driving units with the use of standard track profiles approved by the Russian Railways JSC. Power consumption for train traction was reduced through regulating the number of electric locomotive engines in traction regime. **Practical importance:** Reduction of electrical power consumption for traction produced economic effect.

Energy efficiency, locomotive traction, partial load, electric passenger locomotive, asynchronous towline driving unit, algorithm, adaptive automated management system, multi-engine locomotive driving unit.

К настоящему времени на путях ОАО «Российские железные дороги» работает около 50 пассажирских электровозов двойного питания серии ЭП20 «Олимп», оснащенных асинхронным тяговым приводом. Особенности конструкции этого электровоза обеспечивают экономический и технологический эффект за счёт увеличения полигонов обращения и снижения потребного парка электровозов на маршрутах. Например, участок Москва – Адлер (две пары поездов) сегодня обслуживается восемью электровозами ЭП20. При ранее существовавшей схеме тягового обслуживания на два указанных поезда требовалось 18 локомотивов ЧС2К/ЧС7, ЭП1М и 2ЭС4К [2].

Вместе с тем, в процессе эксплуатации выявлен ряд проблем. Например, на равнинном участке Москва – Рязань, где средняя скорость движения составляет менее 70 км/ч, наблюдается повышенный расход электроэнергии (отметим, что здесь применяются электровозы ЭП20 с конструкционной скоростью 160 км/ч). Анализ показателей энергетической эффективности приведен в [1].

В данной статье сформулированы предложения по повышению энергетической эффективности современных скоростных пассажирских электровозов, основанные главным образом на изменении алгоритмов управления тяговым приводом.

Состояние вопроса

Проблема недостаточного использования доступной мощности локомотива при легком профиле пути и небольшой скорости движения для неполновесных и порожних составов неоднократно поднималась в связи с грузовыми перевозками [3, 5, 7, 8 и др.]. Многие участки железных дорог характеризуются неравномерностью грузопотоков в четном и нечетном направлениях, особенно в местах зарождения грузов с энергетическим, рудным и т. п. сырьем.

Лишь 4–5 % продолжительности тягового режима реализуется с мощностью, близкой к номинальной, 70–75 % – с нагрузками 0,5–0,8 номинальной, остальное время использование силы тяги и мощности локомотивов не превышает 0,5 номинальных значений. Таким образом, все возрастающая мощность многосекционных локомотивов усиливает проблему ее полной реализации в эксплуатации, а следовательно, и проблему повышения эксплуатационного КПД электрической тяги.

Диапазон изменения КПД в режиме тяги охватывает значения от 0,3 до 0,875. Численные значения КПД функционально зависят от значений касательной силы тяги $F_к$, скорости движения V и мощности P, реализуемой на ободах движущих колес, которая равна произведению силы тяги на скорость. С увеличением силы тяги, скорости и мощности повышается эффективность преобразования энергии. Оптимальным по КПД является использование мощности в диапазоне от 0,6 *P* до *P* длительного режима работы локомотива.

Было установлено, что одним из способов повышения энергетической эффективности является частичное отключение тяговых тележек (или секций) электровоза в периоды работы с явным недоиспользованием его силы тяги и мощности.

Идея отключать часть тяговых двигателей воплотилась в системе оптимального регулирования мощности локомотива [6]. Посекционное регулирование применялось на электровозах ВЛ80С, работающих по системе многих единиц, и других. Мощность регулировалась за счет оперативного отключения/включения тяговых электродвигателей (ТЭД) по группам. Машинисту во время движения приходилось вручную отключать или подключать группы тяговых двигателей, подбирая мощность локомотива под вес поезда, профиль пути и заданный режим движения, т. е. регулирование числа тяговых двигателей было полностью возложено на машиниста. Экономия электрической энергии при этом составляла 15–20 %.

Основные требования к процессу отключения/включения тяговых двигателей таковы: 1) должно обеспечиваться выравнивание ресурса всех ТЭД локомотива; 2) не допускается перегрев ТЭД, температура двигателей должна оставаться в определенном диапазоне; 3) не допускается срыв КП в боксование при возрастании нагрузки на работающие ТЭД; 4) не допускается возникновение дополнительных продольно-динамических нагрузок (плавное изменение мощности работающих ТЭД при переключении).

Зависимость КПД электровоза от его мгновенной мощности

Применительно к пассажирским перевозкам, для которых – в отличие от грузовых – масса состава изменяется незначительно, проблема энергетической эффективности обострилась лишь при вводе в эксплуатацию электровоза ЭП20, часовая мощность которого составляет 7200 кВт и позволяет вести поезд из 24 вагонов со скоростью 160 км/ч или поезд из 17 вагонов со скоростью 200 км/ч на прямых участках пути.

КПД электровоза может быть представлен как

$$\eta_{э} = \frac{P_{пол}}{P_{затр}} = \frac{P_{т}}{P_{т} + P_{п} + P_{сн}},$$

где $P_{пол}$ – полезная мощность; $P_{затр}$ – затраченная мощность; $P_{т}$ – мощность на тягу поезда; $P_{п}$ – мощность потерь; $P_{сн}$ – мощность, затрачиваемая на собственные нужды.

Мощность на тягу поезда $P_{т}$, кВт, равна

$$P_{т} = F_{к} V,$$

где $F_{к}$ – касательная сила тяги электровоза, кН; V – скорость движения, м/с.

Энергетическая диаграмма электровоза ЭП20 в номинальном режиме при питании от сети постоянного тока показана на рис. 1.

Видно, что расходы на собственные нужды $P_{сн}$ составляют 184 кВт (2,29 %). Мощность, затрачиваемая электровозом ЭП20 на собственные нужды, оптимизирована за счет применения регулируемого вспомогательного привода (имеются четыре скорости вращения мотор-вентиляторов охлаждения силового электрооборудования).

Мощность потерь $P_{п}$ складывается из потерь в электрической (электрический монтаж и силовая аппаратура, сетевой дроссель, тяговый преобразователь, тяговые двигатели и пр.) и в механической частях. Эти потери оценены с использованием технической документации. Потери в силовой электрической цепи составляют 860 кВт (10,67 %); потери мощности после ТЭД – 144 кВт (1,79 %) за счет сопротивления в зубчатой тяговой передаче и подшипниках.

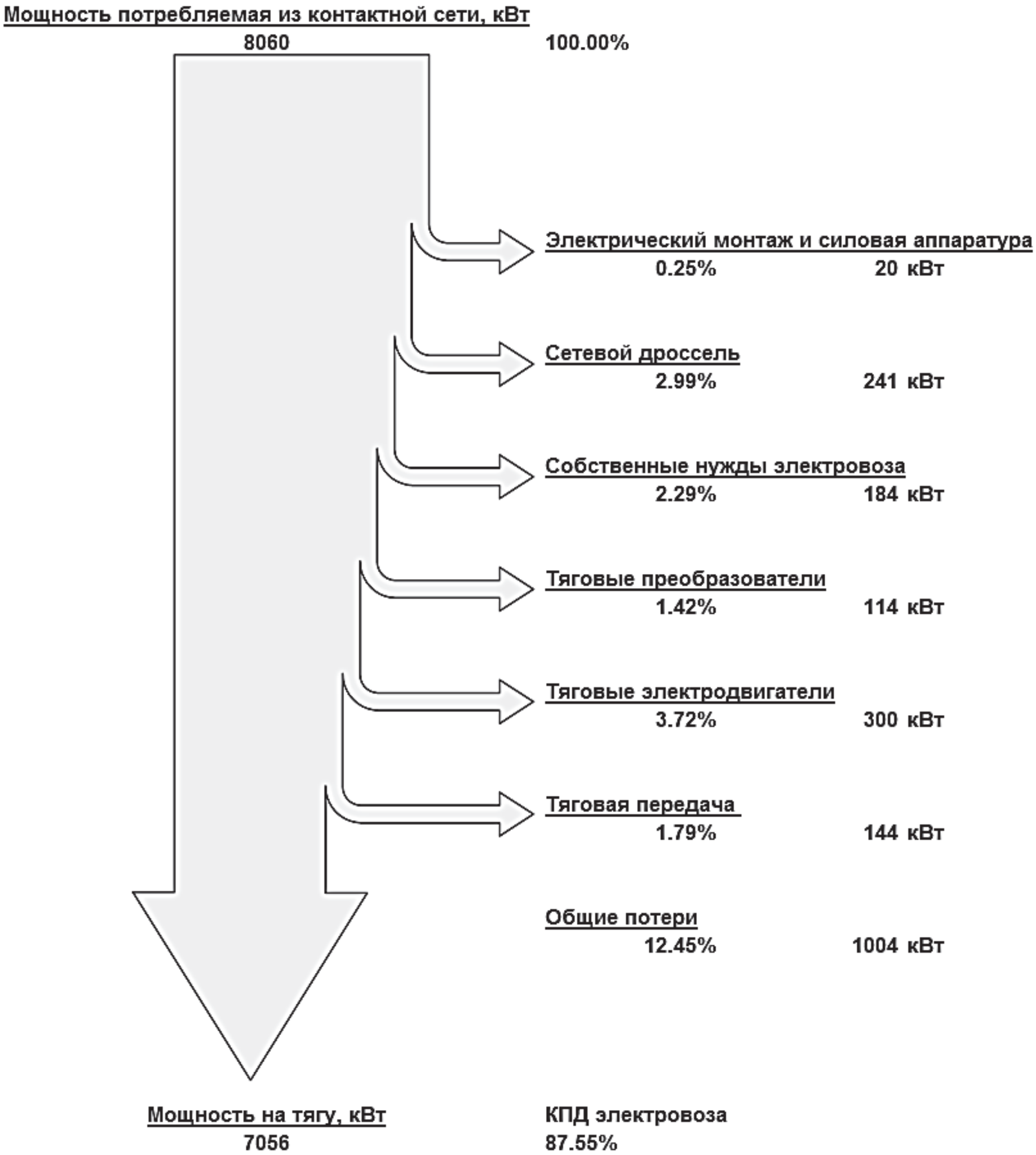


Рис. 1. Энергетическая диаграмма электровоза ЭП20 в номинальном режиме при питании от сети постоянного тока

В итоге КПД электровоза в номинальном режиме при питании от сети постоянного тока составляет 87,55 %.

В [1] путем обработки записей бортового регистратора параметров движения получена зависимость КПД электровоза от мгновенной реализуемой мощности. На рис. 2 показана зависимость КПД электровоза от коэффициента использования мощности (КИМ), равного отношению мгновенной мощности локомотива к его номинальной мощности. Здесь отражена работа всей системы преобразования электроэнергии, механические и электромагнитные потери, а также затраты на собственные нужды. Можно сказать, что это результат многократно повторенного натурного эксперимента, условия которого определены режимами эксплуатации.

Построена аппроксимация полученной опытным путем зависимости КПД локомотива η от коэффициента использования мощности γ в виде

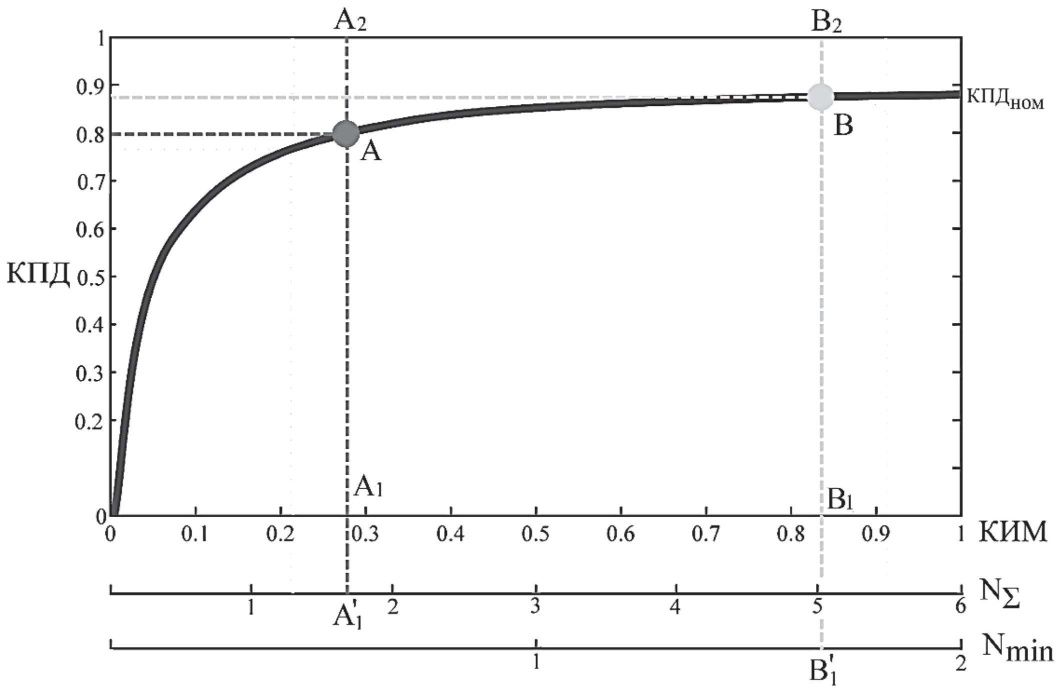


Рис. 2. КПД электровоза ЭП20 в зависимости от КИМ в режиме тяги

$$\eta = \frac{\gamma}{1,098311\gamma + 0,044546}. \qquad (1)$$

Поскольку на электровозе ЭП20 имеется возможность поосного регулирования силы тяги, вопрос оперативного отключения/подключения одного или нескольких тяговых двигателей в автоматическом режиме может быть решен на верхнем уровне системы управления.

Ось с отключенным двигателем (которая будет представлять собой бегунковую ось) можно использовать для нахождения линейной скорости электровоза, что увеличит эффективность работы противобоксовочной системы и позволит максимально реализовать его тяговые свойства.

Алгоритм регулирования числа тяговых двигателей для повышения энергетической эффективности

Предлагается следующий алгоритм выбора числа тяговых двигателей в зависимости от мгновенного значения мощности.

Число тяговых двигателей локомотива в общем случае обозначим как N_Σ (рис. 2), в данном случае $N_\Sigma = 6$. Номинальную мощность одного тягового двигателя обозначим как $P_{ТЭД}$, примем $P_{ТЭД} = 1200$ кВт. Тогда полная номинальная мощность локомотива составит $P_\Sigma = N_\Sigma \cdot P_{ТЭД} = 6 \cdot 1200 = 7200$ кВт.

Предположим, что в некоторый момент времени мощность, фактически затрачиваемая локомотивом на тягу при работе всех двигателей, составляет $P_Ф$, например, $P_Ф = 2000$ кВт. В этом случае КИМ локомотивом составит

$$\gamma_\Sigma = OA_1 = \frac{P_Ф}{P_\Sigma} = \frac{2000}{7200} = 0,278,$$

этому режиму соответствует эксплуатационный КПД локомотива (рис. 2) $\eta_\Sigma = A_1A = 0,795$.

При использовании предлагаемого способа управления энергетической эффективностью локомотива при работе с неполной нагрузкой программа бортового компьютера по фактической мощности $P_Ф$ определяет необходимое для работы локомотива минимальное число тяговых двигателей N_{min}, в данном случае это число равно двум, $N_{min} = 2$, и отключает остальные тяговые двигатели. В этом случае мощность локомотива составит $P_{min} = N_{min} \cdot P_{ТЭД} = 2 \cdot 1200 = 2400$ кВт.

Значение КИМ в данном режиме – при работе двух тяговых двигателей – составит

$$\gamma_{min} = OB_1 = \frac{P_{Ф}}{P_{min}} = \frac{2000}{2400} = 0,833,$$

а эксплуатационный КПД локомотива будет равен, согласно (1), $\eta = B_1B = 0,868$.

Таким образом, увеличение эксплуатационного КПД локомотива составит (см. рис. 2) $\Delta_{\eta} = \eta - \eta_{\Sigma} = B_1B - A_1A = 0,868 - 0,795 = 0,074$, т. е. 7,4 %.

Компьютерное моделирование движения поезда

В программном комплексе «Универсальный механизм» [11] создана компьютерная модель, предназначенная для исследования процессов, протекающих при движении поезда.

Электровоз ЭП20 рассмотрен как управляемая электромеханическая система [9, 10], причем реализована схема индивидуального (поосного) регулирования тяговых двигателей.

На первом этапе расчетов в тяге находились все шесть ТЭД, было воспроизведено движение по участкам, рассмотренным в [1]. В программу были введены спрямленные профили этих участков и соблюден скоростной режим. Число вагонов выбиралось в соответствии с конкретной ситуацией, силы сопротивления движению взяты согласно ПТР. Полученные результаты показали, что отклонение расчетных значений энергетических показателей от записей регистратора находится в пределах нескольких процентов.

Отсюда сделан вывод об адекватности модели и выполнен переход ко второму этапу расчетов. Компьютерная модель электровоза была дополнена блоком, позволяющим регулировать число тяговых двигателей в зависимости от мгновенной реализуемой мощности согласно изложенному выше алгоритму.

Согласно [4], были взяты условные профили следующих типов: I–II тип, равнинный, с уклонами не более 6 ‰; III тип, холмистый, с уклонами до 9 ‰; IV тип, горный, с уклонами до 11 ‰.

Было смоделировано движение поезда по этим участкам как при всех шести включенных ТЭД, так и при переменном числе работающих ТЭД. Число вагонов было принято равным 11 (согласно зимнему расписанию) и 17 (по летнему расписанию). Скорость последовательно задавали равной 72, 126 и 180 м/ч. Выяснили, что при тяге с помощью всех шести ТЭД эксплуатационный КПД электровоза варьируется от 55,5 до 86,2 % в зависимости от скорости движения и типа продольного профиля пути. При регулировании числа ТЭД эксплуатационный КПД составляет от 81,2 до 87,2, что близко к КПД электровоза в номинальном режиме.

Экономия энергии за поездку составляет до 32 %.

Также необходимо обратить внимание на экономию электроэнергии в стоимостных величинах. При стоимости 1 кВт·ч постоянного тока около 4 руб. экономия средств на пассажирские перевозки составит значительную сумму благодаря применению системы регулирования числа ТЭД.

Для оценки энергоэффективности в [4] рекомендуется участок с условным профилем, в котором доля профилей I–II типа составляет 49,3 %, III типа – 37,6 %, IV типа – 13,1 %. Для такого участка длиной около 150 км были выполнены расчеты (см таблицу).

Результаты вычислений из таблицы представлены в виде графиков на рис. 3–5. На рис. 3 показан расход электроэнергии при движении по участку с условным профилем для составов из 11 и 17 вагонов. Видно, что расход электроэнергии во всем диапазоне скоростей при регулировании числа ТЭД существенно меньше, чем при тяге всеми шестью ТЭД.

Энергетические показатели электровоза ЭП20 при регулировании числа ТЭД
на участке с условным профилем

Скорость, км/ч	Энергия на тягу, кВт·ч	Шесть тяговых двигателей		Регулируемое число ТЭД		Повышение КПД, %	Снижение энергопотребления	
		Потребленная энергия, кВт·ч	КПД, %	Потребленная энергия, кВт·ч	КПД, %		кВт·ч	%
11 вагонов – зимнее расписание								
72	1449	2242	64,6	1675	86,5	21,9	567	25,3
126	2057	2632	78,2	2391	86,0	7,8	241	9,2
180	3038	3598	84,4	3491	87,0	2,6	107	3,0
17 вагонов – летнее расписание								
72	2094	2951	71	2461	85	14	490	16,6
126	2934	3595	81,6	3390	86,5	4,9	205	5,7
180	4128	4804	85,9	4738	87,1	1,2	66	1,4

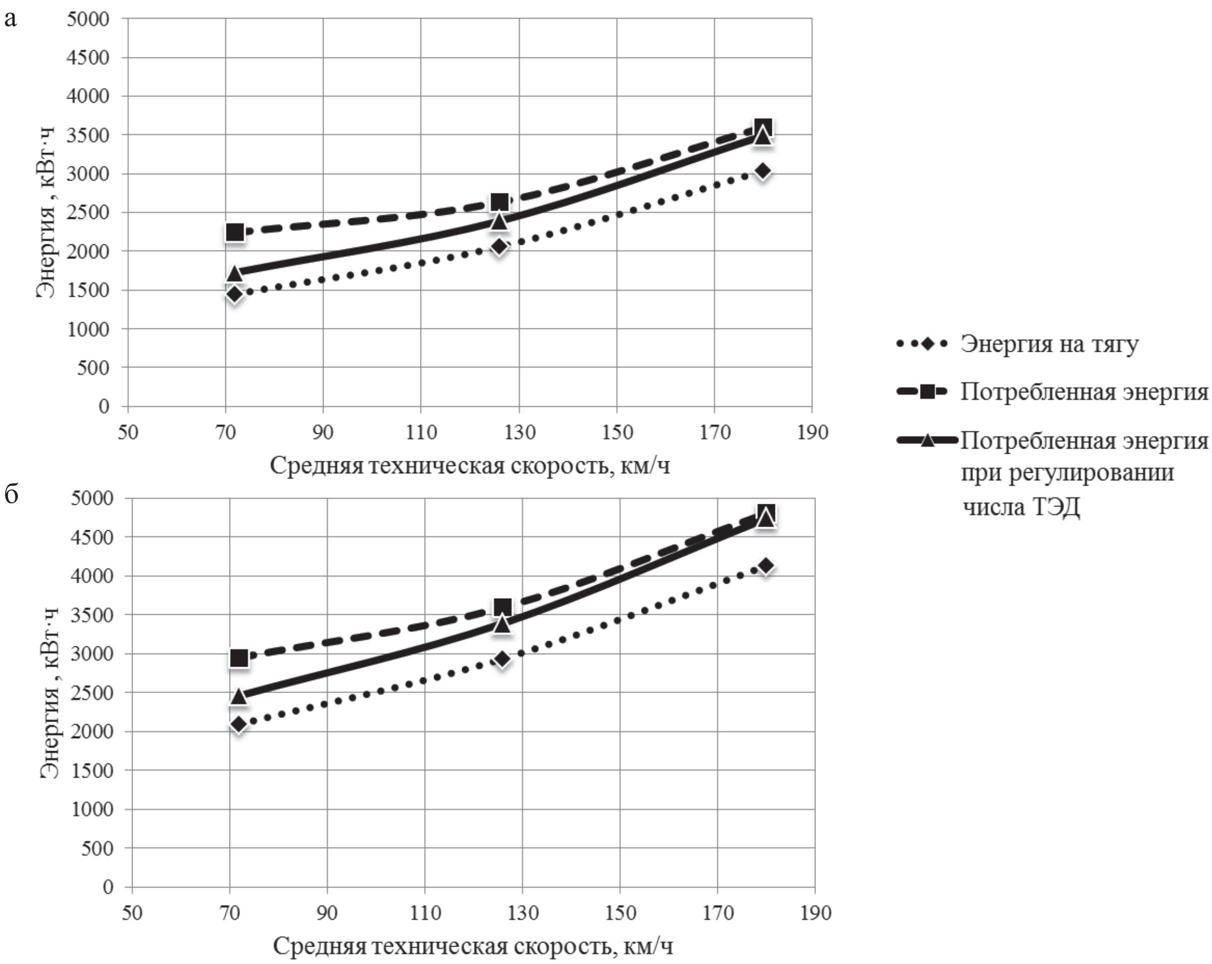


Рис. 3. Расход электроэнергии при движении по участку с условным профилем:
а) 11 вагонов, б) 17 вагонов

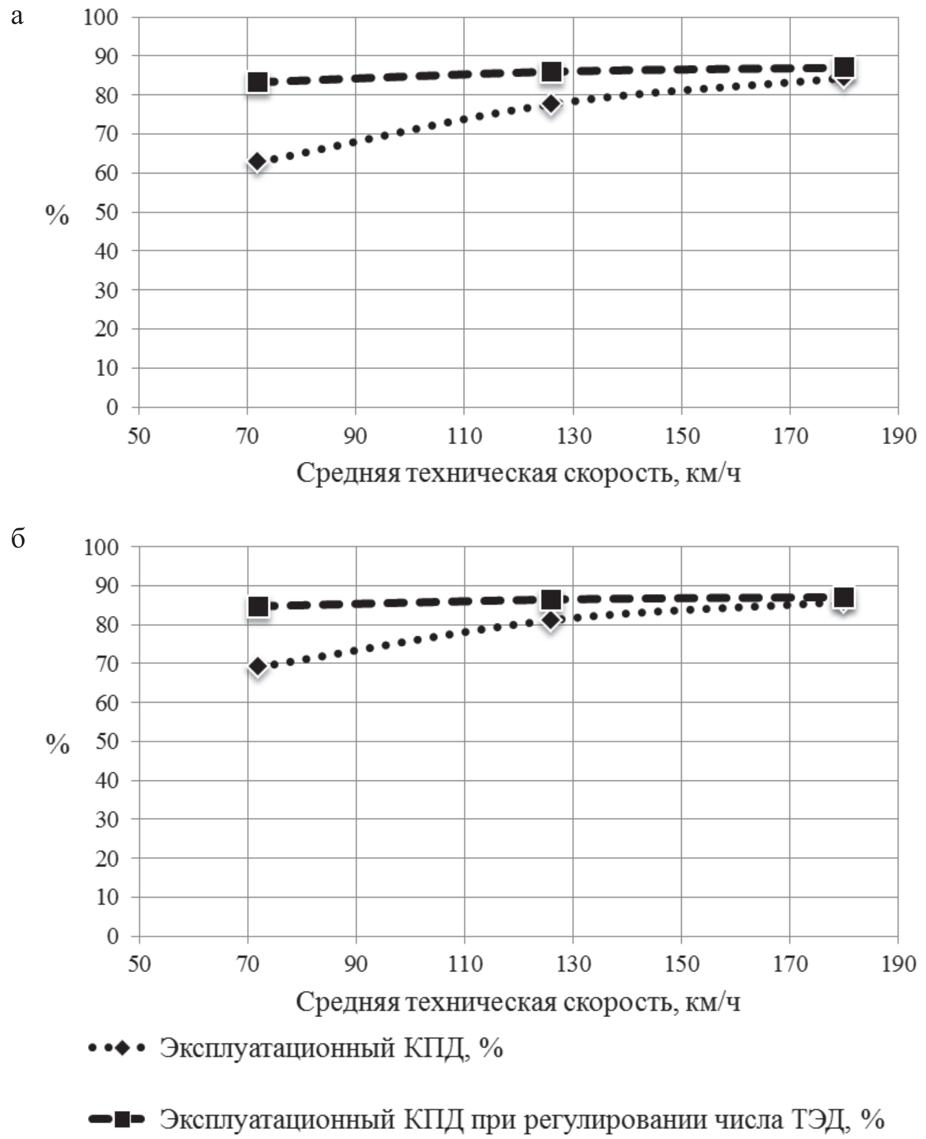


Рис. 4. Эксплуатационный КПД при движении по участку с условным профилем: а) 11 вагонов, б) 17 вагонов

На рис. 4 показан эксплуатационный КПД при движении по участку с условным профилем для составов из 11 и 17 вагонов. Видно, что регулирование числа ТЭД обеспечивает стабилизацию эксплуатационного КПД на уровне, близком номинальному, во всем диапазоне скоростей.

Относительное снижение энергопотребления (%) на условном профиле при регулировании числа ТЭД по сравнению со штатным вариантом (все шесть осей в тяге) показано на рис. 5. Видно, что при движении с невысокой скоростью (72 км/ч) экономия составляет от 16 до 25 %, при скорости 126 км/ч – от 6 до 9 %, на высокой скорости (180 км/ч) – в пределах 3 %.

Заключение

Применение автоматической системы управления мощностью путем регулирова-

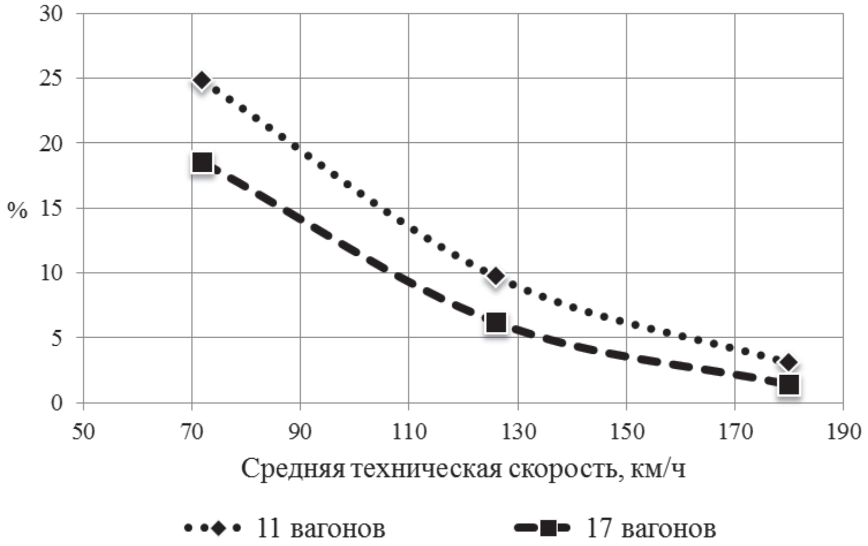


Рис. 5. Относительная экономия электроэнергии при регулировании числа ТЭД

ния числа работающих тяговых двигателей позволяет значительно сократить потребление энергии.

Экономия электроэнергии за поездку зависит от скорости движения, профиля пути и составности поезда. При тяге с помощью всех ТЭД эксплуатационный КПД электровоза варьируется от 55,5 до 86,2 % в зависимости от скорости и типа продольного профиля пути, а при использовании предлагаемого алгоритма регулирования числа ТЭД он стабилизируется и составляет 81,2–87,2 %, что близко к КПД электровоза в номинальном режиме.

Предлагаемая система регулирования числа тяговых двигателей может применяться и на грузовых электровозах. Поскольку при грузовых перевозках нагрузка крайне неравномерна, ожидается значительный экономический эффект.

Библиографический список

1. Андрющенко А. А. Показатели энергетической эффективности пассажирских электровозов с асинхронным тяговым приводом при питании от сети постоянного тока / А. А. Андрющенко, А. А. Зарифьян, П. Г. Колпахчьян // Изв. ПГУПС. – 2015. – № 2. – С. 21–29.

2. Газизов Ю. В. Выпустить новый локомотив – это только начало / Ю. В. Газизов // Гудок. – 2015. – № 74 (25743). – 30 апр.

3. Крыгин А. Н. Способы повышения эксплуатационной энергетической эффективности магистральных электровозов переменного тока : автореф. дисс. … канд. техн. наук / А. Н. Крыгин. – Омск : ОмГУПС, 1998. – 22 с.

4. Методика расчета индикатора энергоэффективности электровоза (утв. ОАО «РЖД» 26.12.2014, № 519).

5. Мурзин Д. В. Пути и средства расширения функциональных возможностей и повышения эффективности эксплуатируемых магистральных электровозов : автореф. дисс. … канд. техн. наук / Д. В. Мурзин. – Омск : ОмГУПС, 2000. – 21 с.

6. Пыров А. Е. Современные системы управления электровозами / А. Е. Пыров // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 2. – С. 64–66.

7. Сорокин С. В. Повышение экономичности многосекционных электровозов переменного тока при вождении грузовых поездов : автореф. дисс. … канд. техн. наук / С. В. Сорокин. – М. : МИИТ, 1991. – 24 с.

8. Фадеев С. В. Повышение экономичности электровозов переменного тока за счет примене-

ния новых электронных систем управления : автореф. дисс. … канд. техн. наук / С. В. Фадеев. – М. : МИИТ, 2003. – 24 с.

9. Kolpahchyan P. G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. P. 1 : Problem formulation and computer model / P. G. Kolpahchyan, A. A. Zarifyan (Jr) // Transp. Prob. Int. Sci. J. – 2015. – Vol. 10, Is. 2. – P. 125–136.

10. Kolpahchyan P. G. Study of the asynchronous traction drive's operating modes by computer simulation. P. 2: Simulation results and analysis / P. G. Kolpahchyan, A. A. Zarifyan (Jr) // Transp. Prob. Int. Sci. J. – 2015. – Vol. 10, Is. 3. – P. 5–15.

11. Universal Mechanism. – URL : www.umlab.ru.

References

1. Andryushchenko A. A., Zarifyan A. A. & Kolpakhchyan P. G. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 2, pp. 21-29.

2. Gazizov Yu. V. *Gudok – Siren*, Apr. 30, 2015, no. 74 (25743).

3. Krygin A. N. Sposoby povysheniya ekspluatatsionnoy energeticheskoy effektivnosti magistralnykh elektrovozov peremennogo toka [Methods for Increasing Operational Energy Efficiency of Long-Distance Alternating-Current Electrical Locomotives]. Omsk, OmGUPS, 1998. 22 p.

4. Metodika rascheta indikatora energoeffektivnosti elektrovoza [Method for Calculation of Electrical Locomotive's Energy Efficiency Indicator]. Approved by Russian Railways JSC on Dec. 26, 2014, no. 519.

5. Murzin D. V. Puti i sredstva rasshireniya funktsionalnykh vozmozhnostey i povysheniya effektivnosti ekspluatiruyemykh magistralnykh elektrovozov [Ways and Means for Expanding Functional Possibilities and Increasing Efficiency of Long-Distance Electrical Locomotives in Operation]. Omsk, OmGUPS, 2000. 21 p.

6. Pyrov A. Ye. *Zheleznodorozhny transport – Railway Transport*, 2005, no. 2, pp. 64-66.

7. Sorokin S. V. Povysheniye ekonomichnosti mnogosektsionalnykh elektrovozov peremennogo toka pri vozhdenii gruzovykh poyezdov [Increasing Economic Efficiency of Multi-Sectional Alternating-Current Electrical Locomotives when Driving Freight Trains]. Moscow, MIIT, 1991. 24 p.

8. Fadeyev S. V. Povysheniye ekonomichnosti elektrovozov peremennogo toka za schet primeneniya novykh elektronnykh sistem upravleniya [Increasing Economic Efficiency of Alternating-Current Electrical Locomotives through Application of New Electronic Control Systems]. Moscow, MIIT, 2003. 24 p.

9. Kolpahchyan P. G. & Zarifyan (Jr) A. A. *Transp. Prob. Int. Sci. J.*, 2015, Vol. 10, Is. 2, pp. 125-136.

10. Kolpahchyan P. G. & Zarifyan (Jr) A. A. *Transp. Prob. Int. Sci. J.*, 2015, Vol. 10, Is. 3, pp. 5-15.

11. Universal Mechanism, available at: www.umlab.ru.

АНДРЮЩЕНКО Андрей Александрович – канд. техн. наук, начальник отдела, andrewa62@mail.ru (ООО «ТРТранс»); *ЗАРИФЬЯН Александр Александрович – аспирант, zar.plgrph@gmail.com; КОЛПАХЧЬЯН Павел Григорьевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, kolpahchyan@mail.ru (Ростовский государственный университет путей сообщения).

УДК 624.021

А.В. Бенин, Л.К. Дьяченко, В.Н. Смирнов

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА МОСТОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ «МОСКВА – КАЗАНЬ»

Дата поступления: 22.09.2015
Решение о публикации: 22.09.2015

Цель: Разработать специальные технические условия (СТУ) на проектирование и строительство инфраструктуры высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань для создания актуального нормативного документа по проектированию мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях. **Методы:** Применялся всесторонний анализ отечественных разработок, а также зарубежный опыт проектирования, строительства и эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей (ВСМ), в основном европейские и китайские нормативные документы. **Результаты:** Сформулированы требования к искусственным сооружениям на ВСМ, которые обусловливают возникновение научно-исследовательских задач, связанных с динамическим характером работы пролётных строений мостов, с аэродинамическим взаимодействием подвижного состава и конструкций мостов, а также с совместной работой пролётных строений и бесстыкового пути. Определена расчётная нагрузка от подвижного состава высокоскоростных поездов, контейнерных поездов и «тяжёлых» поездов обслуживания. **Практическая значимость:** Разработанные СТУ жёстко нормируют параметры, которые обеспечивают безопасность движения высокоскоростных поездов и надёжность мостов на протяжении всего срока эксплуатации. Это позволит обеспечить комфорт пассажиров при движении поездов по мостам. Следует отметить, что при разработке СТУ были использованы последние достижения в области отечественного и зарубежного проектирования и строительства мостов, а многие требования и параметры впервые использованы в отечественной практике проектирования.

Высокоскоростная железнодорожная магистраль, искусственные сооружения, параметры мостов

Andrey V. Benin, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, laboratory head, kpmk@pgups.edu; ***Leonid K. Dyachenko**, teaching assistant, leonid_dyachenko@mail.ru; **Vladimir N. Smirnov**, D. Eng., professor, department chairman (Petersburg State Transport University) SPECIFIC FEATURES IN DESIGNING AND BUILDING THE BRIDGES OF THE MOSCOW TO KAZAN HIGH-SPEED LONG-DISTANCE RAILWAY LINE

Objective: To develop project-specific design codes (PSDC) for designing and building the infrastructure of the Moscow to Kazan high-speed long-distance railway line in order to create an up-to-date regulatory document for designing bridges on high-speed long-distance railway lines. **Methods:** Comprehensive analysis of domestic designs was conducted, as well as that of international experience in designing, building and operating high-speed long-distance railways, primarily reflected in European and Chinese regulatory documents. **Results:** The paper formulates requirements for engineering structures on high-speed long-distance railway lines which cause the appearance of scientific-research tasks related to dynamic character of operation of bridge superstructure, to aerodynamic interaction between rolling stock and bridge structures, and to combined action of bridge superstructure and continuous welded rail track. Design limit loads for rolling stock of high-speed trains, container trains and “heavy” maintenance trains were calculated. **Practical importance:** The PSDC developed rigidly standardize the parameters which ensure safety of high-speed trains’ movement and bridges’ robustness throughout the service life. This may ensure passengers’ comfort whilst travelling over bridges. It has to be noted that in development of the PSDC, the latest achievements in dometic and international bridge design and construction were used, and many requirements and parameters were used in domestic designing practice for the first time.

High-speed long-distance railway line, engineering structures, bridge parameters.

Необходимость разработки специальных технических условий (СТУ) «Сооружения искусственные участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали (ВСМ) Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству» вызвана отсутствием российских нормативных документов, регламентирующих требования к проектированию и строительству искусственных сооружений (мостов, виадуков, путепроводов, эстакад, водопропускных труб) для движения высокоскоростных пассажирских экспрессов со скоростью до 400 км/ч. При разработке СТУ использовались как действующие нормативные и директивные документы в области высокоскоростного железнодорожного транспорта, так и европейские нормативные документы.

Особенности проектирования мостов на ВСМ

По данным ОАО «Ленгипротранс», на ВСМ Москва – Казань требуется построить 1180 искусственных сооружений, в том числе 5 внеклассных, 48 больших и 80 средних мостов [1].

В качестве вре́менной подвижно́й нагрузки при рельсовой колее 1520 мм предполагаются следующие типы подвижного состава:

- высокоскоростные поезда со скоростями ≤ 350 км/ч;
- пассажирские поезда со скоростями ≤ 200 км/ч;
- контейнерные поезда со скоростями ≤ 160 км/ч;
- поезда обслуживания на скоростях движения ≤ 90 км/ч.

Важнейшим указанием СТУ является положение о приоритетности высокоскоростного движения, основной целевой задачей реализации проекта – пропуск высокоскоростных поездов. Пропуск всех других поездов (пассажирских, контейнерных и хозяйственных поездов для обслуживания инфраструктуры) возможен только в том случае, если это не снижает безопасности движения высокоскоростных поездов, не изменяет скоростной режим и не вызывает значимого удорожания строительства и (или) содержания. Стоит отметить, что пропуск пассажирских или контейнерных поездов одновременно с высокоскоростным поездом (по встречному направлению) возможен только в том случае, если уровни напряжений и деформаций в элементах сооружения и элементах пути при прохождении этих поездов не превышают соответствующих значений для прохода двух высокоскоростных поездов. Появление тяжелых поездов обслуживания на участке магистрали возможно только если на том же участке отсутствует высокоскоростной поезд.

За расчетную вре́менную высокоскоростную нагрузку приняты 22 поезда (22 схемы нагрузок), представляющие собой реальные высокоскоростные поезда:

- 10 универсальных поездов (аналог HSLM A1-A10 Eurocodes [4]);
- 7 реальных европейских поездов (аналог RT Eurocodes [4]);

• 5 российских поездов (Эр-200 и варианты «Сапсан»).

Для пропуска по сооружению поездов со скоростью до 200 км/ч (пассажирского, контейнерного или поезда обслуживания) вре́менную нагрузку следует принять по СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы» как нагрузку СК при классе нагрузки К = 11. Класс нагрузки обоснован из условия, что усилия и напряжения в элементах конструкций от загружения одного пути нагрузкой СК не превышает соответствующих значений при загрузке двух путей на мосту вре́менной высокоскоростной нагрузкой (с учетом динамического воздействия). При этом конструкции всех мостовых сооружений необходимо проверить расчётом на возможный пропуск по ним монтажных агрегатов.

Особое внимание в СТУ уделяется обеспечению высокой жесткости пролетных строений – как вертикальной, так и горизонтальной и крутильной. Нормируются величины допустимых прогибов, углов перелома профиля и смещения верха опор на мостах ВСМ при скорости до 350 км/ч (см. таблицу).

При проектировании мостов необходимо уделять особое внимание динамическим расчётам мостовых конструкций, в том числе контролю резонансных явлений, а также влиянию дефектов колёс и рельсов. Особенность силового воздействия подвижного состава на мостовые конструкции связана с так называемым эффектом скорости, или кинематическим возбуждением. Суть указанного режима взаимодействия моста и поезда состоит в передаче на пролетные строения экипажами поездов через колесные пары переменного силового воздействия вследствие перемещения вре́менной нагрузки по мосту. Опасные резонансные колебания мостовых конструкций возникают тогда, когда период силового воздействия поезда совпадает с периодом собственных колебаний загруженного поездом пролетного строения, при этом значение динамического коэффициента к вре́менной нагрузке от подвижно́го состава значительно возрастает.

Предельные значения упругих прогибов, смещений и углов поворота

Нормативные требования	Предельные значения высокоскоростных поездов
Максимальные прогибы[1)]	При скорости 350 км/ч $\delta \le 1/1500\ L$ при $L \le 27$ м $\delta \le 1/2600\ L$ при $L = 65$ м $\delta \le 1/2000\ L$ при $L \ge 100$ м при скорости 200 км/ч $\delta \le 1/1000\ L$ при $L \le 15$ м $\delta \le 1/1500\ L$ при $L = 38$ м $\delta \le 1/600\ L$ при $L \ge 90$ м[2)]
Углы перелома профиля[1)]	$\Theta \le 1{,}5\,\%$
Переломы оси пути в плане[3)]	$\Theta \le 1{,}0\,\%$
Смещения верха опор[3)]	δx, $\delta y \le 1/800\ L$
Горизонтальный прогиб пролетных строений[4)]	$\delta y \le 1/5000\ L$
Скручивание пути на пролетном строении (изменение перепада отметок рельсов)[1)]	$\Theta \le 1$ мм на 3 м пути

Примечания. [1]) От вертикальной подвижной нагрузки. [2]) Промежуточные значения – по интерполяции. [3]) От центробежной силы (горизонтальных ударов), ветра, льда и температуры. [4]) На уровне ездового полотна; от ветровой нагрузки и поперечных ударов с одного пути и от неравномерного нагрева поясов ферм ($dT = 15$ °C).

Следует отметить, что именно динамические расчеты являются ключевыми при проектировании мостов на ВСМ. По результатам динамических расчётов назначаются основные размеры, параметры и динамические характеристики пролетных строений. Рациональное проектирование позволяет избежать чрезмерных неблагоприятных динамических реакций конструкции в период эксплуатации, а также обеспечить безопасность движения высокоскоростных поездов и надежность работы сооружения.

Для расчетов плитных, коробчатых и ребристых разрезных балок пролетом до 60 м динамическое воздействие может быть представлено в виде набора сосредоточенных сил, перемещающихся по мосту с заданной скоростью. Для решетчатых, арочных и рамных конструкций динамический расчет производится с учетом взаимодействия поезда и мостового сооружения.

В целях обеспечения стабильности мостового полотна, гарантирующей устойчивость рельсового пути как требование безопасности железнодорожного движения, на мостах ВСМ ограничиваются максимальные вертикальные пиковые ускорения пролетного строения на уровне верхнего строения пути [4]:

• при устройстве пути на балласте – 0,35 g м/с^2;

• при жестком основании (безбалластном пути) – 0,50 g м/с^2.

При динамическом расчете системы «мост – поезд» ускорения на уровне расположения пассажиров в вагоне для обеспечения комфортабельности проезда не должны превышать:

• вертикальные – 0,15 g м/с^2;

• горизонтальные – 0,1 g м/с^2.

При проектировании большепролётных сооружений учитывают вопросы аэродинамического взаимодействия высокоскоростного поезда и элементов конструкций, а также ветровое воздействие.

Для малых и средних мостов следует применять унифицированные конструктивные и технологические решения, специально разработанные на начальной стадии проектирования. Оптимальные конструктивные решения унифицированной серии пролетных строений должны разрабатываться с учетом результатов динамических расчетов на нагрузку от высокоскоростных поездов в зависимости от типа верхнего строения пути на проектируемом участке магистрали и основываться на технико-экономическом сравнении вариантов. Индивидуальное проектирование допустимо при разработке проектов больших и внеклассных мостов, мостов больших пролетов, при расположении мостов на участках со сложным продольным профилем, а также в иных обоснованных случаях.

Анализ зарубежного опыта проектирования мостов на ВСМ и наработок отечественных проектировщиков показывает целесообразность следующих конструктивно-технологических решений:

• для малых мостов, путепроводов и эстакад с пролетами до 15 м – сборные плитные и ребристые разрезные балочные пролетные строения;

• для многопролётных балочных мостовых сооружений эстакадного типа с пролётами 15–33 м – плитно-ребристые пролётные строения из монолитного преднапряжённого железобетона;

• для мостов с пролётами 33–55 м – коробчатые пролетные строения из монолитного преднапряженного железобетона. При этом для неразрезных систем целесообразно использовать метод цикличной продольной надвижки;

• в мостах с пролетами более 55 м – металлические двухпутные пролётные строения со сквозными главными фермами или арочные системы при массивных бетонных и железобетонных опорах.

В соответствии с требованиями СТУ на мостах используется только бесстыковой путь, чем достигается снижение динамического воздействия подвижного состава на мост, уменьшение шума и вибрации элементов. Однако работа бесстыкового пути на мосту существенно отличается от работы на земляном полотне в вязи с деформативностью моста при изменениях температуры воздуха и при поездных вертикальных и горизонтальных воздействиях. В связи с этим в рельсах, являющихся элементами единой системы «мост – бесстыковой путь», возникают дополнительные усилия. Их величина зависит, в частности, от типа мостового полотна. Поскольку в зарубежной практике используется как балластное, так и безбалластное мостовое полотно, в СТУ допускается применение обоих решений (при обязательном расчёте усилий в элементах системы «мост – бесстыковой путь» под действием температурных и поездных воздействий). Положение и тип уравнительных приборов следует определять в соответствии с результатами исследования взаимодействия системы «мост – бесстыковой путь» индивидуально для каждого проекта моста [2, 3].

При высокоскоростном движении поездов важно обеспечить плавность проезда в зоне перехода от насыпи подхода к мосту. Для этого рекомендуется постепенно увеличивать жесткость земляного полотна с помощью переходных участков (участков переменной жесткости) с применением, например, фракционированного щебня с проливкой его цементным раствором, армирования грунта или других решений.

Параметры мостов на ВСМ:

1) двухпутные пролётные строения. Расстояние между осями путей 5000 мм;

2) участки переменной жёсткости на подходах к мосту – не менее 50 м с каждой стороны;

3) минимальные радиусы вертикальных кривых 42 000 м. При безбалластном мостовом полотне и пролете более 33 м размещение сооружения на вертикальной кривой не допускается;

4) минимальные радиусы кривых в плане 10 000 м;

5) максимальный уклон на мосту 24‰;

6) мостовое полотно безбалластное на железобетонных плитах и на балласте при его толщине под шпалой 40 см;

7) на железобетонных мостах с ездой на балласте с пролетными строениями длиной до 33 м бесстыковой путь укладывается без ограничения суммарной длины пролетных строений. При безбалластном мостовом полотне бесстыковой путь укладывается по индивидуальному проекту;

8) на металлических многопролётных мостах с ортотропной плитой и с ездой на балласте с пролётами до 55 м суммарная длина непрерывного бесстыкового пути допускается не более 220 м. На однопролётном металлическом мосту непрерывный путь допускается при длине пролёта до 55 м.

Заключение

Возведение мостов, эстакад, путепроводов и других искусственных сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях ставит перед учёными, проектировщиками, строителями и эксплуатирующими организациями сложные задачи, решение которых определяется участием широкого круга специалистов с использованием мирового опыта и результатов экспериментальной проверки в условиях, максимально приближенных к реальным.

Библиографический список

1. Петров А. П. Особенности проектирования мостов на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. П. Петров // Новые технологии в мостостроении : мосты на высокоскоростных железнодорожных магистралях : сб. трудов / под ред. В. Н. Смирнова. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 8–12.

2. Смирнов В. Н. Динамическая работа мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей при продольных воздействиях поездной нагрузки : моногр. / В. Н. Смирнов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 65 с.

3. Смирнов В. Н. Расчёт мостов высокоскоростных железнодорожных магистралей на продольные

силы : моногр. / В. Н. Смирнов. – СПб. : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – 65 с.

4. EN 1991-2 (2003) : Eurocode 1 : Actions on structures. P. 2 : Traffic loads on bridges.

References

1. Petrov A. P. Osobennosti proyektirovaniya mostov na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh [Specific Features of Designing Bridges on High-Speed Long-Distance Railway Lines]. *Novyye tekhnologii v mostostroyenii: mosty na vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistralyakh: sbornik trudov* (*New Technologies in Bridge Engineering: Bridges on High-Speed Long-Distance Railways: Collection of Papers*), ed. by V. N. Smirnov. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2013. Pp. 8-12.

2. Smirnov V. N. Dinamicheskaya rabota mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistraley pri prodolnykh vozdeystviyakh poyezdnoy nagruzki: monographiya [Dynamic Operation of High-Speed Long-Distance Railway Lines' Bridges for Linear Impact of Train Stress Load: Monograph]. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2013. 65 p.

3. Smirnov V. N. Raschet mostov vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh magistraley na prodolnyye sily: monografiya [Axial Force Calculations for High-Speed Long-Distance Railway Lines' Bridges: Monograph]. St. Petersburg, Petersburg State Transp. Univ., 2013. 65 p.

4. EN 1991-2 (2003): Eurocode 1: Actions on structures. P. 2: Traffic loads on bridges.

БЕНИН Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, kpmk@pgups.edu; *ДЬЯЧЕНКО Леонид Константинович – ассистент, leonid_dyachenko@mail.ru; СМИРНОВ Владимир Николаевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ – ТРАНСПОРТУ

УДК 614.8:629.47

О. Т. Алиев

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВРЕДНЫХ И ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ УСЛОВИЙ ТРУДА НА МАШИНИСТОВ ЛОКОМОТИВОВ

Дата поступления: 14.05.2015
Решение о публикации: 10.11.2015

Цель: Выявить вредные и опасные факторы, которые могут воздействовать на машинистов локомотивов Республики Узбекистан. **Методы:** Применен комплекс гигиенических методов исследования с использованием математических методов анализа результатов с помощью пакета программ Microsoft Office Excel, Mathcad 2001 Professional и IBM SPSS Statistics 19. **Результаты:** Для железнодорожного депо ТЧ-1 Республики Узбекистан установлены оптимальные и допустимые микроклиматические параметры в кабинах машиниста локомотива. Проанализированы факторы условий труда, воздействующих на работников локомотивных бригад. Приведены результаты исследования вредных и опасных производственных факторов. **Практическая значимость:** Даны рекомендации по ограничению и исключению действия вредных опасных факторов на работников локомотивных бригад, основанные на требованиях системы стандартов безопасности труда, норм и правил охраны труда.

Железнодорожный транспорт, вредный фактор, опасный фактор, перегрузка, стресс, машинист, локомотив, риск, охрана труда, надежность, инструкция, заболевание, утомление.

Obidjon T. Aliev, postgraduate student, spb2012aspirant@yandex.ru (Petersburg State Transport University) IMPACT OF HARMFUL AND DANGEROUS FACTORS OF WORKING CONDITIONS ON LOCOMOTIVE DRIVERS

Objective: To determine harmful and dangerous factors that can affect locomotive drivers in the Republic of Uzbekistan. **Methods:** A set of health-related research methods was used, with results analysed by mathematical methods using Microsoft Office Excel, Mathcad 2001 Professional and IBM SPSS Statistics 19 software packages. **Results:** Optimal and permissible microclimatic parameters in locomotive driver's cabin were established for Uzbekistan's locomotive depot No 4. Factors of working conditions that influence locomotive crew members were analysed. Results of a study into harmful and dangerous workplace factors were provided. **Practical importance:** The paper provides recommendations for limiting and excluding harmful and dangerous factors affecting locomotive crew members, based on requirements of labour safety standards system, norms and regulations for workplace safety.

Railway transport, harmful factor, dangerous factor, overwork, stress, engine driver, locomotive, risk, workplace safety, reliability, instruction, illness, fatigue.

Динамизм транспортных ситуаций, повышенные требования к оперативному мышлению, постоянная готовность к экстренным действиям в условиях монотонии, высокая профессиональная ответственность определяют специфические особенности трудовой деятельности машинистов локомотивов – одной из наиболее ответственных профессиональных групп.

Машинист управляет энергетической и механической системами локомотива и должен выдерживать психо-эмоциональное напряжение, вызываемое ответственностью за жизнь пассажиров, сохранение материальных ценностей, соблюдение графика движения [3–6].

Все это источник риска утраты здоровья или преждевременной смерти в результате несчастного случая на производстве, а также развития производственно обусловленного или профессионального заболевания.

Предпосылкой к данному исследованию послужил анализ транспортных происшествий в 2007–2013 гг., где было выявлено, что при интенсивном движении поездов снижается надежность управляющей деятельности работников локомотивных бригад. Тому есть несколько причин:

• ухудшение общего состояния здоровья;

• утомление;

• работа в условиях дефицита времени;

• повышенное эмоциональное возбуждение;

• недостаток технических знаний;

• низкий уровень практических навыков вождения;

• сниженный уровень возможности принятия решения в нестандартных ситуациях;

• нарушение стереотипа действий в условиях стресса;

• пониженная зрительная способность.

Исследования проводились в 2013–2014 гг. на базе депо «Узбекистан» Ташкентского Регионального железнодорожного узла «РЖУ-Ташкент» (Республика Узбекистан), Государственного акционерного железнодорожной компаний (ГАЖК) «Узбекские железные дороги» (O’zbekiston temir yo’llari). Исследование проведено с участием специалистов депо. В структуру ГАЖК входят 9 тепловозных и 1 электровозное депо (подразделение локомотивного хозяйства). Компания давно эксплуатирует тепловозы серии 2ТЭ10М, Л, В, 3ТЭ10М, ЧМЭ-3, ТЭМ2 и электровозы серии ВЛ60К, 2ВЛ60К, 2ВЛ80С, 3ВЛ80С, электропоезда ЭР9Е.

Объектом исследования являлись машинисты и помощники машинистов, а также учащийся центра подготовки машинистов, помощников машинистов локомотивов и машинистов самоходных машин. Всего обследовано 150 человек мужского пола в возрасте от 19 до 57 лет. Исследуемая группа была распределена по стажу: до 5 лет – 38 чел.; 6–10 лет – 20 чел.; 11–15 лет – 28 чел.; 16–20–34 чел.; более 20 лет – 30 чел. По возрастному показателю группы распределились следующим образом: 19–30 лет – 49 чел.; 31–40 лет – 40 чел.; 41–50 лет – 30 чел.; 51–60 лет – 31 чел.

Результаты комплекса гигиенических исследований обработали математическими методами анализа с помощью пакета программ Microsoft Office Excel, Mathcad 2001 Professional и IBM SPSS Statistics 19.

Характеристика деятельности работников локомотивных бригад

Анализ литературы показал, что ведущими вредными профессионально-значимыми факторами у работников локомотивных бригад являются неблагоприятные виброакустические условия, нестабильный интермитирующий (нагревающий, охлаждающий) микроклимат, повышенное психоэмоциональное напряжение, высокая загрузка внимания, неритмичный график работы, бессистемные внутрисменные перерывы, напряжения анализаторных функций [2, 7–10].

Профессиографическая характеристика ключевых специальностей позволяет выявить время воздействия неблагоприятных производственных факторов в конкретных условиях и определить категории тяжести и напряженности труда работников.

Общее время деятельности машиниста локомотива включает время, затраченное на прием и сдачу локомотива, на предрейсовый медицинский осмотр, нахождение в пути, проведение маневров на станционных путях, на оформление необходимых документов до и после поездки.

Продолжительность рабочей смены машиниста и помощника машиниста составляет 12 ч (табл. 1).

Прием и сдача локомотива, предрейсовый медицинский осмотр, оформление документов занимают независимо от длительности рейса 2–2,5 ч.

В прием и сдачу локомотива входит его осмотр, мелкий ремонт при возникновении технических неисправностей, приведение в порядок рабочего места, очистка локомотива от пыли и грязи. При выполнении этих видов работ частота пульса в некоторые моменты достигает 120 ударов в минуту, тогда как средняя частота сердечных сокращений – 100 ударов в минуту, что позволяет отнести эту работу к категории средней тяжести.

Основное время работы (т. е. время, затраченное машинистом на работу в пути) зависит от длины плеча и скорости движения поезда. Основное время в среднем равняется 6 ч 55 мин, колеблясь от 3 ч 30 мин до 9 ч 15 мин. При небольшой длительности рейса (3–4 ч) оно составляет 42–60 % всего времени работы, а при 7–9 ч – 70–80 %. Во время движения локомотива физический компонент в процессе управления практически отсутствует, средняя частота пульса при ведении локомотива по перегону составляет 62–74 удара в минуту.

Таким образом, от 70 до 80 % рабочего времени машинист проводит в кабине тепловоза в неблагоприятных с гигиенической точки зрения условиях, от 15 до 30 % – на открытой площадке, в административных помещениях.

Технологические паузы вне рабочей зоны составляют 9,2 % сменного фонда времени. К ним относятся ведение контрольных записей в журналах, уточнение производственных заданий и т. д. Непроизводственные отвлечения занимают в бюджете рабочей смены около 14 % времени и включают в себя нерегламентированный обеденный перерыв и время отдыха.

Основные показатели нагрузки, влияющей на работников локомотивных бригад

Неблагоприятными факторами поездной работы являются шум и вибрация. Основной источник шума при движении локомотива – качение колеса по рельсу. Этот шум делится на ударный стыковой шум, слышимый при переезде через рельсовый стык, и собственный шум движения, возбуждаемый колесом при его качении по рельсу. Кроме того, шум в кабине обусловлен работой двигателя, рации, тормозов, а также звуковыми сигналами свистка, гудка, часов, скоростемера.

Шум в кабине машиниста – широкополосный, прерывистый, механического происхождения. Согласно санитарным нормам СН 2.2.4/2.1.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки», уровень

Таблица 1. Хронометраж рабочей смены машиниста (помощника машиниста) локомотива

Операции	Время, ч	% от рабочего времени
Прием и сдача локомотива, оформление документов	2,3	18,8
Основное время работы (в пути)	6,9	57,5
Технологические паузы	1,1	9,2
Непроизводственные отвлечения	1,7	14,5

шума на рабочем месте машиниста подвижного состава железнодорожного транспорта превышает предельно допустимый уровень и составляет 83 дБа (ПДУ – 80 дБа), преимущественно в октавных полосах со среднегеометрическими частотами от 8 до 250 Гц (рис. 1).

Таким образом, при изучении производственного шума на рабочем месте машиниста, помощника машиниста локомотива констатировано повышение уровня шума, которое согласно документу Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда» классифицируется как 3 класс 1 степени (3.1).

Трудовая деятельность в таких условиях может существенно изменить показатели функциональных систем и анализатора, чувствительного к шуму, снизить работоспособность и не гарантирует сохранения здоровья работников и период трудовой деятельности и по ее окончании.

Движение локомотивов и вагонов является причиной вибрации, интенсивность которой зависит от конструкции подвижных единиц в целом, от узлов, рессорного подвешивания, состояния пути, скорости движения, стрелочных переводов, типа рельсов.

Общая вибрация в кабине машиниста по источнику возникновения классифицируется как транспортная, по характеру спектра – широкополосная, по временным характеристикам – прерывистая (рис. 2).

Сложный характер колебаний обусловлен наличием различных источников. Основная часть колебаний определяется ударами колесной пары о стыки рельсов, из-за чего возникают интенсивные случайные широкополосные низкочастотные колебания. Под влиянием этих толчков могут появиться вибрации отдельных конструктивных элементов, имеющих более высокие гармонии. Наряду с этими на рабочее место машиниста локомотива передаются вибрации от дизелей, мотор-генераторов, воздуходувок, тяговых двигателей. Эти источники обусловливают высшие гармоники в спектре механических колебаний подвижного состава. Еще одним фактором, определяющим характер вибрации, является состояние пути.

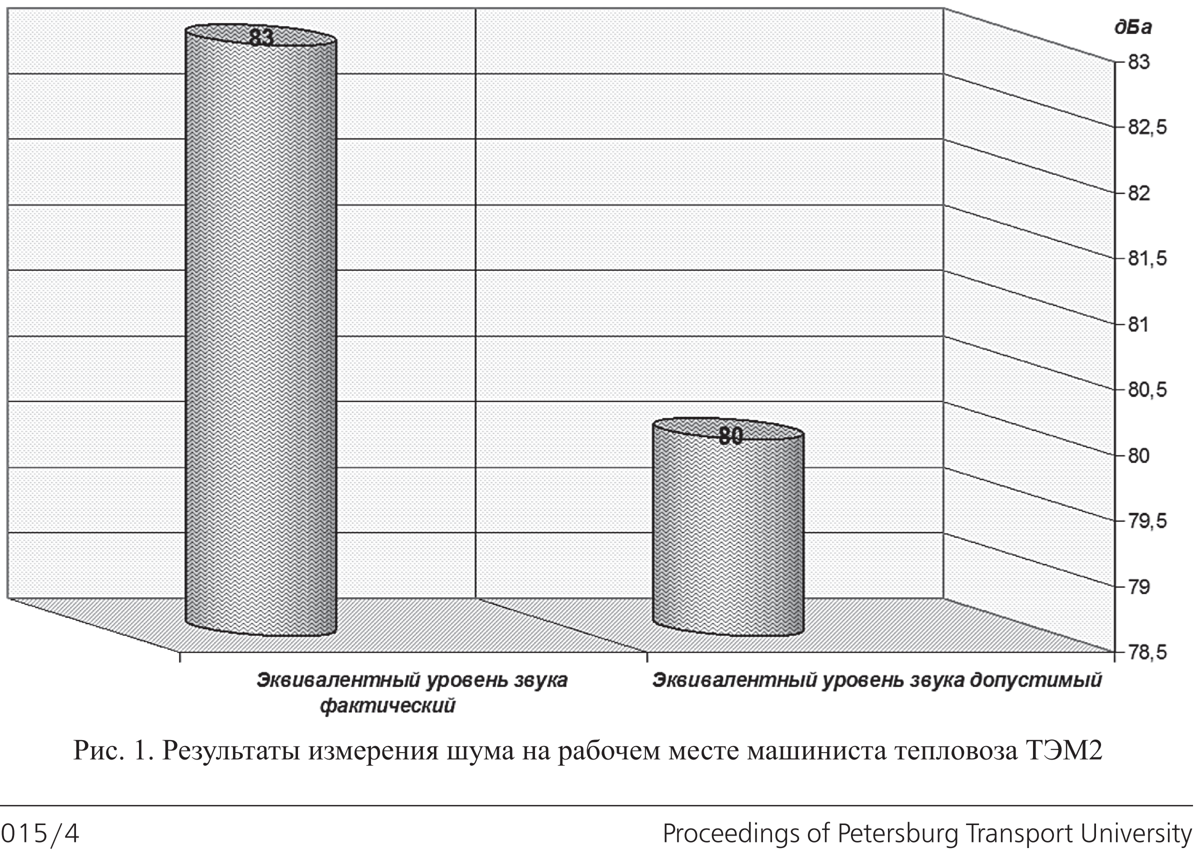


Рис. 1. Результаты измерения шума на рабочем месте машиниста тепловоза ТЭМ2

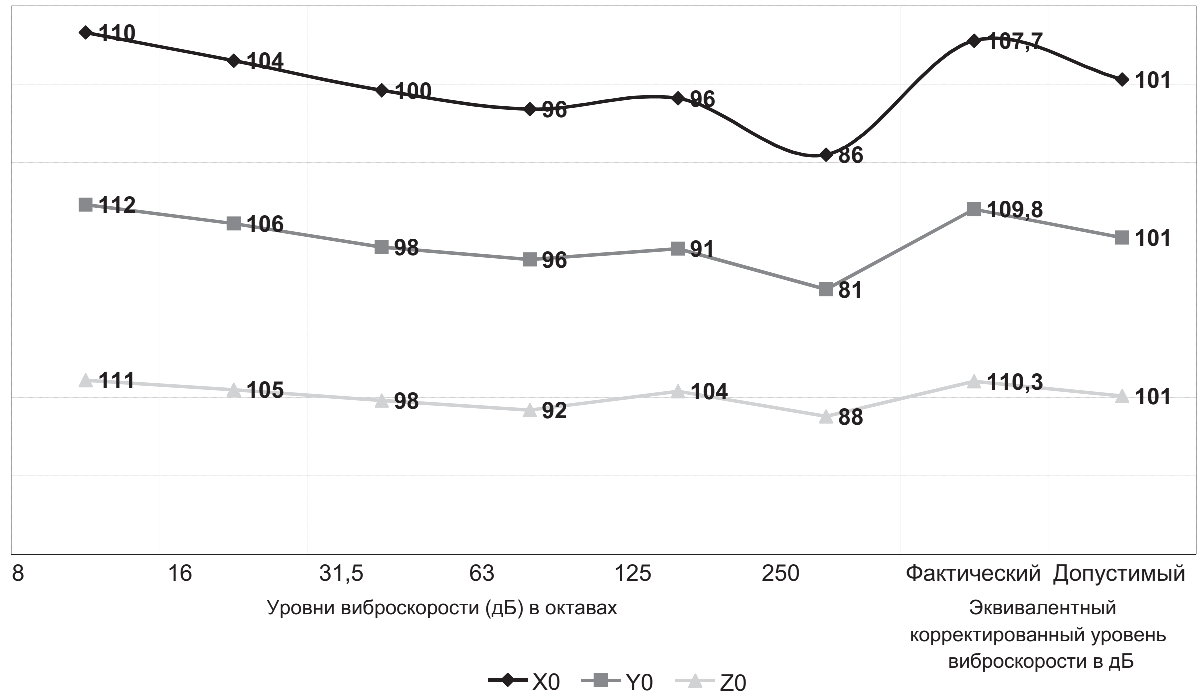


Рис. 2. Результаты измерения общей вибрации по уровню виброскорости на рабочем месте машиниста тепловоза ТЭМ2

Таким образом, изучение общей вибрации по уровню виброскорости на рабочем месте машиниста на тепловозе ТЭМ2 позволило установить повышение уровня общей вибрации и классифицировать ее в соответствии с руководством Р 2.2.2006-05 «Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда» как 3 класс 2 степени (3.2).

Трудовая деятельность в таких условиях может вызвать стойкие функциональные изменения, приводящие в большинстве случаев к увеличению производственно обусловленной заболеваемости, появлению начальных признаков или легких форм профессиональных заболеваний, возникающих после продолжительной экспозиции (15 и более лет).

На основании изложенного в соответствии с руководством Р 2.2.2006-05 труд локомотивных бригад классифицируется как 3 класс 3 степени (табл. 2). Труд класса 3.3 по вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса приводит к развитию профессиональных болезней легкой и средней степеней тяжести, росту хронической (производственно обусловленной) патологии, включая повышенные уровни заболеваемости с временной утратой трудоспособности.

Контрольная группа состояла из 62 работников инженерно-технической службы РЖУ-Ташкент мужского пола в возрасте от 21 до 57 лет. По возрастному показателю группа была распределена следующим образом: 21–30 лет – 12 чел.; 31–40 лет – 15 чел.; 41–50 лет – 18 чел.; 51–60 лет – 17 чел.

Комплексная оценка условий и организации труда у лиц контрольной группы согласно руководству Р 2.2.2006-05 позволила классифицировать труд работников административно-технического персонала как класс 2 (допустимый) (табл. 3).

Заключение

Воздействие выявленных производственных факторов приводит в конечном счете

ТАБЛИЦА 2. Итоговая таблица по оценке условий труда работников локомотивных бригад по степени вредности и опасности, тяжести и напряженности

Фактор	Класс условий труда						
	Оптимальный	Допустимый	Вредный				Опасный (экстрим)
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
Шум			+				
Вибрация общая				+			
Микроклимат				+			
Освещение		+					
Тяжесть труда			+				
Напряженность труда					+		
Общая оценка условия труда					+		

ТАБЛИЦА 3. Итоговая таблица по оценке условий труда у лиц контрольной группы по степени вредности и опасности, тяжести и напряженности

Фактор	Класс условий труда						
	Оптимальный	Допустимый	Вредный				Опасный (экстрим)
	1	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
Шум	+						
Вибрация общая	+						
Микроклимат		+					
Освещение		+					
Тяжесть труда		+					
Напряженность труда		+					
Общая оценка условия труда		+					

к ухудшению здоровья и потере работоспособности машинистов локомотива.

Между вредными и опасными производственными факторами наблюдается связь. Во многих случаях наличие вредных факторов способствует появлению травмоопасных факторов.

В связи с этим предлагаем:

• автоматизировать системы выявления опасных ситуаций на отдельных технологических операциях и оповещать о возникновении вредных и опасных производственных факторов с помощью предупреждающей сигнализации;

• обеспечить соответствие уровней вредных и опасных производственных факторов на рабочих местах требованиям стандартов безопасности;

• разработать дополняющие и развивающие стандарты на все вредные и опасные производственные факторы, установленные в [1]. Они необходимы для того, чтобы установить требования или нормы параметров для конкретных производственных факторов и дать их правильную оценку в соответствии с ФЗ № 426 от 28 декабря 2013 г.

Библиографический список

1. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 4 с.

2. Капцов В. А. Оценка риска развития профессиональных заболеваний железнодорожников / В. А. Капцов, В. Б. Панкова, С. А. Степанов, Н. А. Белякова // Гигиена и санитария. – 1998. – № 2. – С. 13–16.

3. Копытенкова О. И. Современные методы контроля психофизиологическим состоянием машиниста высокоскоростного движения / О. И. Копытенкова, Д. Е. Курепин, О. Т. Алиев // Сб. науч. тр. SWorld. Материалы междунар. науч.-практич. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2013». – Вып. 1. Т. 3 «Технические науки». – Одесса : Куприенко, 2013. – С. 80–84.

4. Кудрин В. А. Охрана здоровья работников локомотивных бригад и обеспечение безопасности движения поездов на железных дорогах : руководство / В. А. Кудрин, А. А. Прохоров. – М., 2000. – 107 с.

5. Курепин Д. Е. Перспективное направление исследования психофизиологического состояния машинистов транспортных средств / Д. Е. Курепин, О. Т. Алиев // Материалы VI междунар. науч.-практич. интернет-конф. «Проблемы и перспективы развития науки в начале третьего тысячелетия в странах СНГ», 22–24 дек. 2012, Переяслав-Хмельницкий. – Переяслав-Хмельницкий, 2012. – С. 15–18.

6. Левицкий А. Л. Техника безопасности при эксплуатации локомотивов и моторного подвижного состава / А. Л. Левицкий. – М. : Транспорт, 1982. – 96 с.

7. Прохоров А. А. Актуальные медико-социальные проблемы охраны здоровья работающих на железнодорожном транспорте / А. А. Прохоров // Актовая речь 8 окт. 1996 г. – М., 1996. – 14 с.

8. Прохоров А. А. Сравнительная характеристика заболеваемости рабочих шумоопасных профессий железнодорожного транспорта / А. А. Прохоров, Т. А. Королькова, С. А. Зиника // Актуальные вопросы профилактики воздействия шума, вибрации, ультразвука в условиях современного производства. Т. 1. – М., 1988. – С. 160–161.

9. Рыжова Е. Л. Предупреждение производственного травматизма при выполнении работ с повышенными требованиями безопасности на основе автоматизированного компьютерного тренажера-имитатора : дисс. … канд. техн. наук : 05.26.01 / Е. Л. Рыжова. – СПб. : РГБ, 2006. – 199 с.

10. Стандартные нормы вибрации в кабине машиниста тягового подвижного состава железнодорожного транспорта. № 4249-87.

References

1. GOST 12.0.003-74. SSBT. Opasnnyye i vrednyye proizvodstvennyye factory [Dangerous and Harmful Workplace Factors]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1974. 4 p.

2. Kaptsov V. A., Pankova V. B., Stepanov S. A. & Belyakova N. A. *Gigiyena i sanitariya – Hygine and Sanitation*, 1998, no. 2, pp. 13-16.

3. Kopytenkova O. I., Kurepin D. Ye. & Aliev O. T. Sovremennyye metody kontrolya za psikhofiziologicheskim sostoyaniyem mashinista vysokoskorostnogo dvizheniya [Modern Methods for Controlling High-Speed Engine Driver’s Psychophysiological Condition]. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Sovremennyye napravleniya teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniy 2013* (*SWorld Collected Papers. Proc. of int. res. and practice conf. “Modern Directions of Theoretical and Applies Studies 2013*). Is. 1. Vol. 3 – Technical Sciences. Odesa, Kupriyenko, 2013. Pp. 80-84.

4. Kudrov V. A. & Prokhorov A. A. Okhrana zdorovya rabotnikov lokomotivnykh brigad i obespecheniye bezopasnosti dvizheniya poyezdov na zheleznykh dorogakh [Protection of Locomotive Crew Members’ Health and Ensuring Safety of Train Movement on Railways]. Moscow, 2000. 107 p.

5. Kurepin D. Ye. & Aliev O. T. Perspektivnoye napravleniye issledovaniya psikhofiziologichesko-

go sostoyaniya mashinistov transportnykh sredstv [Promising Direction of Study of Psychophysiological Condition of Vehicle Engine Drivers]. *Materialy VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii "Problemy i perspektivy razvitiya nauki v nachale tretyego tysyacheletiya v stranakh SNG* (*Proc. of 6th intl. sci. and practice online-conf. "Problems and Perspectives of Development of Sci. in Early 3rd Millennium in CIS Countries*), Dec. 22–24, 2012, Pereiaslav-Khmelnytskyi. Pereiaslav-Khmelnytskyi, 2012. Pp. 15-18.

6. Levitskiy A.L. Tekhnika bezopasnosti pri ekspluatatsii lokomotivov i motornogo podvizhnogo sostava [Accident Prevention in Operating Locomotives and Motorised Rolling Stock]. Moscow, Transport, 1982. 96 p.

7. Prokhorov A.A. Aktualnyye mediko-sotsialnyye problemy okhrany zdorovya rabotayushchikh na zheleznodorozhnom transporte [Current Medical and Social Problems in Health Protection for Railway Workers]. Moscow, 1996. 14 p.

8. Prokhorov A.A., Korolkova T.A. & Zinika S.A. Sravnitelnaya kharakteristika zabolevayemosti rabochikh shumoopasnykh professiy zheleznodorozhnogo transporta [Comparative Characterisation of Disease Incidence in Workers of Noise-Affected Railway Professions]. *Aktualnyye voprosy profilaktiki vozdeystviya shuma, vibratsii, ultrazvuka v usloviyakh sovremennogo proizvodstva* (*Current Issues in Prevention of Influence of Noise, Vibration, Ultra-Sound in the Conditions of Modern Industry*). Vol. 1. Moscow, 1988. Pp. 160-161.

9. Ryzhova Ye.L. Preduprezhdeniye proizvodstvennogo travmatizma pri vypolnenii rabot s povyshennymi trebovaniyami bezopasnosti na osnove avtomatizirovannogo trenazhera-imitatora [Prevention of Industrial Accidents in Conducting Works with Increased Safety Requirements on the Basis of Automated Computer Trainer-Simulator]. St. Petersburg, RGB, 2006. 199 p.

10. Standartnyye normy vibratsii v kabine mashinista tyagovogo podvizhnogo sostava zheleznodorozhnogo transporta [Standard Vibration Norms in Railway Transport Traction Rolling Stock Engine Driver's Cabin]. no. 4249-87.

АЛИЕВ Обиджон Туйчиевич – аспирант, tashkent-aot@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.4.028.29

С. В. Беспалько, В. М. Меланин, М. А. Гордеев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВАРИЙНОГО СТОЛКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА, ОБОРУДОВАННОГО ЖЕРТВЕННЫМИ БУФЕРАМИ

Дата поступления: 29.09.2015
Решение о публикации: 04.02.2015

Цель: Определить и оценить динамическую нагруженность вагонов (продольных усилий) при различных условиях столкновения, разработать математическую модель работы жертвенного элемента кузова в системе устройств поглощения энергии головного вагона пассажирского поезда. **Методы:** Разработанная математическая модель столкновения реализована в виде программы, написанной на языке программирования C++. С помощью этой программы исследовано влияние толщины жертвенных буферов на нагруженность вагонов электропоезда. **Результаты:** Выяснено, что полученные зависимости для сценариев № 1, 2 имеют нелинейный и немонотонный характер, поскольку изменение толщины буферов вызывает перераспределение максимальных усилий в различных межвагонных связях. **Практическая значимость:** Применение жертвенных буферов позволит понизить уровень максимальных усилий на 38–68 %. Предложенные средства расчетного моделирования можно использовать при проектировании электропоездов, для оценки динамической нагруженности в части разработки средств пассивной защиты от аварийных столкновений.

Аварийное соударение, нормативный документ, математическая модель, устройство поглощения энергии, жертвенный элемент, напряженно-деформированное состояние, буфер, головной вагон, силовая характеристика, режим, деформация, пассивная защита.

Sergey V. Bespalko, D. Eng., professor, bespalco@hotbox.ru; **Viktor M. Melanin**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor; ***Mikhail A. Gordeyev**, postgraduate student, Mixail_gordeev@bk.ru (Moscow State University of Railway Engineering – MIIT) SIMULATION OF EMERGENCY COLLISION PROCESS INVOLVING AN ELECTRICAL TRAIN EQUIPPED WITH SACRIFICIAL BUFFERS

Objective: To determine and to evaluate dynamic load of carriages (axial forces) under different types of collision, to develop a mathematical model of operation of carriage body's sacrificial element in the energy absorption system of a passenger train's head car. **Methods:** The mathematical model of collision was realised as a program written in C++ programming language. The program allowed to study the influence of width of sacrificial buffers on electric train's load. **Results:** It was established that dependencies produced for scenarios No. 1 and No. 2 have non-linear and non-monotone character because altering the buffers' width causes redistribution of maximum forces in various carriage-to-carriage links. **Practical importance:** Application of sacrificial buffers will allow to reduce the level of maximum forces by between 38 and 68 per cent. Methods of calculation simulation could be used in designing electrical trains, in evaluation of dynamic load in development of tools for passive protection from emergency collisions.

Emergency clash, normative document, mathematical model, energy absorption unit, sacrificial element, stress-strain state, buffers, head car, power characteristics, modes, deformation, passive protection.

В статье рассматривается аварийное соударение пассажирского поезда. В соответствии со сценариями, принятыми в отечественных и международных нормативных документах [1–3], наиболее опасным является лобовое столкновение поезда. Для защиты машинистов и пассажиров применяют устройства пассивной безопасности, способные амортизировать кинетическую энергию соударения за счет деформации устройств поглощения энергии (УПЭ).

Один из важнейших принципов работы УПЭ состоит в последовательном срабатывании устройств, среди которых есть элементы, работающие в штатных режимах (такие как автосцепное, буферные устройства), и элементы, включающиеся в работу только при аварийных столкновениях (пластинчатые или трубчатые блоки, жертвенные части кузова). Вторая группа элементов при аварии претерпевает необратимые изменения в виде значительных остаточных деформаций и требует последующей замены.

Принятые допущения

Математические модели столкновения электропоезда разрабатывали с использованием следующих допущений.

1. Рассматривались допущения перемещения вагонов вдоль оси пути. Прочие степени свободы исключались из рассмотрения. Это связано с тем, что они вносят существенно меньший вклад в нагруженность элементов вагонов электропоезда. Кроме того, отказ от учета отклонений вагонов от продольной оси в большинстве случаев столкновений ведёт к завышению усилий, т. е. идет в запас прочности.

2. Участок столкновения прямой.

3. Центры масс всех вагонов расположены по высоте на уровне середины поверхностей взаимодействия автосцепок.

4. Кузов вагона – упругий элемент с распределёнными инерционными свойствами (т. е. упругий стержень).

5. В расчетной схеме сценария № 1 лобовое столкновение с идентичным составом заменялось соударением исследуемого электропоезда с неподвижным упором.

6. В расчетной схеме сценария № 2 стоящий автомобиль – абсолютно твердое тело.

7. Движение автомобиля в сценарии № 2 – прямолинейное вдоль оси движения поезда. Отказ от учета прочих степеней свободы автомобиля идет в запас прочности, так как при продольном перемещении автомобиль создает больше сопротивления движущемуся поезду.

8. В расчетной схеме сценария № 3 стоящий вагон – материальная точка с упругими связями, аппроксимирующими продольную жесткость кузова.

9. При столкновении электропоезда с вагоном автосцепки сцепляются.

10. Стоящий вагон в сценарии № 3 заторможен, что идет в запас прочности.

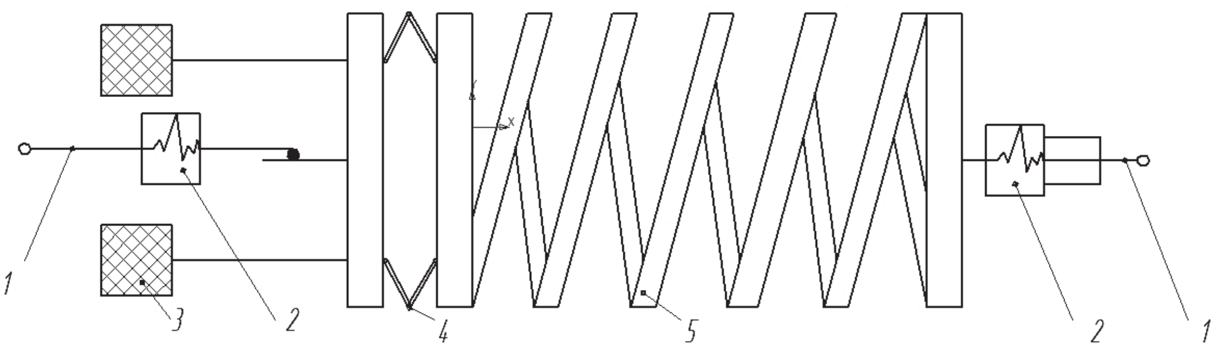


Рис. 1. Расчетная схема вагона электропоезда при аппроксимации кузова как упругого стержня: 1 – автосцепка; 2 – поглощающие аппараты; 3 – деформируемые блоки; 4 – жертвенная часть тамбура; 5 – кузов

11. Реакция жертвенных деформируемых буферов постоянная.

13. Сопротивление воздуха не учитывалось.

14. Деформации элементов кузова вагона, кроме жертвенных частей,– только упругие.

15. Силами трения в элементах кузова пренебрегали.

Расчетная схема и математическая модель

Расчетная схема каждого вагона включает в себя кузов в виде упругого элемента, последовательно соединенного с поглощающими аппаратами (рис. 1).

При достижении определенного значения сжимающего усилия болты крепления задних упорных угольников к раме срезаются и блок автосцепки проваливается внутрь хребтовой балки. В результате в работу на сжатие включаются жертвенные буферы, работающие также последовательно с кузовом.

По достижении полного сжатия буферов на сжатие начинает работать только кузов вагона.

В данной схеме учитывается общий принцип работы устройства поглощения энергии (УПЭ) – последовательность срабатывания устройств при аварийном столкновении. Сжатие при ударе включает следующие ступени:

1) работа автосцепного устройства 1. При этом сжимается поглощающий аппарат 2 автосцепки, причём податливый кузов 5 деформируется последовательно с автосцепным устройством;

2) работа деформируемых буферов 3 параллельно с автосцепным устройством. Этот этап начинается, когда после закрытия поглощающего аппарата усилие в автосцепке достигнет такого уровня, при котором срезаются крепления задних упорных угольников;

3) работа кузова вагона на сжатие после окончания деформации жертвенной части.

Параметры жертвенных буферов принимаются на основании исследований [3].

Математическая модель электропоезда составлена на основе уравнения Лагранжа второго рода, записанного относительно степеней свободы каждого вагона. В общем виде система уравнений, описывающая движение электропоезда, такова:

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{U}_{\text{л}i}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial U_{\text{л}i}} + \dfrac{\partial \Phi}{\partial U_{\text{л}i}} + \\ + \dfrac{\partial \Pi}{\partial U_{\text{л}i}} + \dfrac{\partial \text{А}}{\partial U_{\text{л}i}} = 0; \\ \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{\partial T}{\partial \dot{U}_{\text{п}i}}\right) - \dfrac{\partial T}{\partial U_{\text{п}i}} + \dfrac{\partial \Phi}{\partial U_{\text{п}i}} + \\ + \dfrac{\partial \Pi}{\partial U_{\text{п}i}} + \dfrac{\partial \text{А}}{\partial U_{\text{п}i}} = 0, \end{cases} \qquad (1)$$

где t – время; T – кинетическая энергия электропоезда; Ф – функция рассеяния; П – потенциальная энергия деформации элементов кузова вагонов электропоезда; А – работа внешних сил; $U_{\text{л}i}$, $U_{\text{п}i}$ – перемещения i-го вагона электропоезда на левом и правом конце кузова, соответственно; $\dot{U}_{\text{п}i}$; $\dot{U}_{\text{л}i}$ – скорости, соответственно, левого и правого конца кузова i-го вагона; $i = 1\ldots N$ – номер вагона.

Рассмотрим подробнее величины, входящие в уравнение (1).

Кинетическая энергия

$$T = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \int_{0}^{2e_i} \rho F \dot{u}^2 dx + \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{2} m_j \dot{u}_j^2, \qquad (2)$$

где ρF – погонная масса кузова вагона; x – продольная координата поперечного сечения i-го вагона; $2e_i$ – длина кузова i-го вагона; $\dot{u}$ – скорость поперечного сечения кузова; m_j – сосредоточенная масса; j – номер сосредоточенной массы; M – количество сосредоточенных масс; $\dot{u}_j$ – скорость j-й сосредоточенной массы.

Функция рассеяния

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \int_{0}^{2e_i} \beta \dot{U}^2 dx, \qquad (3)$$

где β – коэффициент вязкого трения в кузове.

Отметим, что в принятой расчетной схеме не учитываются силы трения в кузове, а силы трения, возникающие в системе УПЭ, входят в выражение для работы внешних сил, поэтому в математической модели функция рассеяния полагается равной нулю.

Потенциальная энергия деформации

$$\Pi = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \int_{0}^{2e_i} EF\varepsilon^2 dx, \qquad (4)$$

где EF – продольная жесткость кузова; $\varepsilon = \frac{du}{dx}$ – деформация растяжения-сжатия кузова; U – перемещение центра тяжести поперечного сечения вдоль оси поезда.

Работа внешних сил

$$A = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{2e_i} nudx + \sum_{K=1}^{q} \frac{1}{2} R_K \cdot u_k, \qquad (5)$$

где n – распределенная по длине внешняя продольная нагрузка; R_K – проекция k-й внешней сосредоточенной силы на ось x; u_k – продольное перемещение точки приложения k-й силы; q – количество сосредоточенных сил; коэффициент $\frac{1}{2}$ во втором слагаемом обусловлен тем, что силы R_K как реакции связей сами зависят от перемещений u_k.

Следует отметить, что входящие в формулы (2)–(5) инерционные (ρF), диссипативные (ρF) и жесткостные (EF) характеристики кузова, а также распределенная внешняя нагрузка в общем случае переменны по длине, поэтому при интегрировании в этих выражениях должен учитываться закон изменения названых величин. При этом в общем случае необходимо численное интегрирование. В частном случае, когда названные характеристики постоянны в пределах каждого вагона, удается получить выражение в явном виде.

Примем аппроксимацию перемещений в пределах каждого вагона

$$U = \left(1 - \frac{x}{2e_i}\right) u_{\text{л}i} + \frac{x}{2e_i} \cdot u_{\text{п}i}.$$

И подставим $\dot{u}$ в формулы (2)–(5):

$$\begin{cases} T = \sum_{i=1}^{T} \frac{1}{2} \int_{0}^{2l_i} \rho F \times \\ \times \left[\left(1 - \frac{x}{2l_i}\right)^2 \dot{u}_{\text{л}i}^2 + 2\frac{x}{2l_i}\left(1 - \frac{x}{2l_i}\right) \dot{u}_{\text{л}i}\dot{u}_{\text{п}i} + \right. \\ \left. + \frac{x^2}{(2l_i)^2} \dot{u}_{\text{п}i}^2 \right] dx + \\ + \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{2} m_j \dot{u}_j^2; \\ \Phi = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \int_{0}^{2l_i} \beta \times \\ \times \left[\left(1 - \frac{x}{2l_i}\right)^2 \dot{u}_{\text{л}i}^2 + 2\frac{x}{2l_i}\left(1 - \frac{x}{2l_i}\right) \dot{u}_{\text{л}i}\dot{u}_{\text{п}i} + \right. \\ \left. + \frac{x^2}{(2l_i)^2} \dot{u}_{\text{п}i}^2 \right] dx; \\ \Pi = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \int_{0}^{2l_i} \frac{EF}{(2l_i)^2} (\dot{u}_{\text{л}i}^2 - 2u_{\text{л}i}u_{\text{п}i} + u_{\text{п}i}^2) dx; \\ \text{A} = \sum_{i=1}^{N} \int_{0}^{2l_i} n \left[\left(1 - \frac{x}{2l_i}\right) u_{\text{л}i} + \frac{x}{2l_i} u_{\text{п}i} \right] dx + \\ + \sum_{K=1}^{q} \frac{1}{2} R_K u_K. \end{cases} \qquad (6)$$

В частном случае при постоянных параметрах в пределах кузова каждого вагона интегралы (6) можно взять в явном виде:

$$\begin{cases} T = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{6} \rho F_i 2l_i (\dot{u}_{\text{л}i}^2 + \dot{u}_{\text{л}i}\dot{u}_{\text{п}i} + \dot{u}_{\text{п}i}^2) + \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{2} m_j \dot{u}_j^2; \\ \Phi = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{6} \beta_i 2l_i (\dot{u}_{\text{л}i}^2 + \dot{u}_{\text{л}i}\dot{u}_{\text{п}i} + \dot{u}_{\text{п}i}^2); \\ \Pi = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \frac{EF_i}{2l_i} (\dot{u}_{\text{л}i}^2 - \dot{u}_{\text{л}i}\dot{u}_{\text{п}i} + \dot{u}_{\text{п}i}^2); \\ \text{A} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} n_i 2l_i (u_{\text{л}i} + u_{\text{п}i}) + \sum_{K=1}^{q} \frac{1}{2} R_K u_K, \end{cases}$$

где ρF_i – погонная масса i-го вагона; β_i – погонный коэффициент вязкого трения в кузове i-го вагона; EF_i – жесткость кузова i-го вагона; n_i – распределенная продольная нагрузка на кузов i-го вагона.

Подставив выражения (6) в уравнения Лагранжа второго рода (1), получим следующую систему уравнений, соответствующую общему случаю соударения:

$$\begin{cases} m_0 \ddot{u}_0 = R_1 - F_{\text{тр}0}; \\ m_{11i} \ddot{u}_{\text{л}i} + m_{12i} \ddot{u}_{\text{п}i} + \beta_{11i}\dot{u}_{\text{л}i} + \beta_{12i}\dot{u}_{\text{п}i} + \\ + c_{11i}u_{\text{л}i} + c_{12i}u_{\text{п}i} = P_{1i}; \\ m_{21i} \ddot{u}_{\text{л}i} + m_{22i} \ddot{u}_{\text{п}i} + \beta_{21i}\dot{u}_{\text{л}i} + \beta_{22i}\dot{u}_{\text{п}i} + \\ + c_{21i}u_{\text{л}i} + c_{22i}u_{\text{п}i} = P_{2i}, \end{cases} \quad (7)$$

где

$$F_{\text{тр}0} = \begin{cases} R_1 \text{ при сценарии № 1;} \\ m_0 g f_{\text{тр}0} \text{ при сценариях № 2, 3;} \end{cases} -$$

сила трения, действующая на препятствие в сценариях № 2, 3; $f_{\text{тр}0}$ – коэффициент трения скольжения между препятствием и поверхностью;

$$m_{11i} = \int_0^{2l_i} \rho F \left(1 - \frac{x}{2l_i}\right)^2 dx + \sum_{j=1}^{M_i} m_j \left(1 - \frac{x_j}{2l_i}\right)^2;$$

$$m_{12i} = m_{21i} = \int_0^{2l_i} \rho F \frac{x}{2l_i}\left(1 - \frac{x}{2l_i}\right) dx + \sum_{j=1}^{M_i} m_j \frac{x_j}{2l_i}\left(1 - \frac{x_j}{2l_i}\right);$$

$$m_{22i} = \int_0^{2l_i} \rho F \frac{x^2}{(2l_i)^2} dx + \sum_{j=1}^{M_i} m_j \frac{x_j^2}{(2l_i)^2};$$

M_i – количество сосредоточенных масс в i-м вагоне;

$$\beta_{11i} = \int_0^{2e_i} \beta \left(1 - \frac{x}{2e_i}\right)^2 dx;$$

$$\beta_{12i} = \beta_{21i} = \int_0^{2e_i} \beta \frac{x}{2e_i}\left(1 - \frac{x}{2e_i}\right) \cdot dx;$$

$$\beta_{22i} = \int_0^{2e_i} \beta \frac{x^2}{(2e_i)^2} dx;$$

$$C_{11i} = C_{22i} = \int_0^{2e_i} \frac{EF}{(2e_i)^2} dx;$$

$$C_{12i} = C_{21i} = -\int_0^{2e_i} \frac{EF}{(2e_i)^2} dx;$$

$$P_{1i} = \int_0^{2e_i} n \left(1 - \frac{x}{2e_i}\right) dx + \frac{1}{2}\sum_{K=1}^{q_i} R_k \left(1 - \frac{x_k}{2e_i}\right);$$

$$P_{2i} = \int_0^{2e_i} n \frac{x}{2e_i} dx + \frac{1}{2}\sum_{K=1}^{q_i} R_k \frac{x_k}{2e_i};$$

q_i – количество сосредоточенных сил, действующих на i-й вагон.

В частном случае при постоянных параметрах $\partial F, \beta, EF$ и n в пределах каждого вагона коэффициенты дифференциальных уравнений (7) принимают следующие значения:

$$m_{11i} = \frac{1}{3}\rho F_i \cdot 2e_i + \sum_{j=1}^{M_i} m_j \left(1 - \frac{x_j}{2e_i}\right)^2;$$

$$m_{12i} = m_{21i} = \frac{1}{6}\rho F_i \cdot 2e_i + \sum_{j=1}^{M_i} m_j \frac{x_j}{2e_i}\left(1 - \frac{x_j}{2e_i}\right);$$

$$m_{22i} = \frac{1}{3}\rho F_i \cdot 2e_i + \sum_{j=1}^{M_i} m_j \frac{x^2{}_j}{(2e_i)^2};$$

$$\beta_{11i} = \beta_{22i} = \frac{1}{3}\beta_i \cdot 2e_i;$$

$$\beta_{12i} = \beta_{21i} = \frac{1}{6}\beta_i \cdot 2e_i;$$

$$C_{11i} = C_{22i} = \frac{EF_i}{2e_i};$$

$$C_{12i} = C_{21i} = -\frac{EF_i}{2e_i};$$

$$P_{1i} = \frac{1}{2} n_i \cdot 2e_i + \frac{1}{2} R_i;$$

$$P_{2i} = \frac{1}{2} n_i \cdot 2e_i + \frac{1}{2} R_i + 1,$$

где R_i, R_{i+1} – реакции в автосцепках, соответственно, в левом и правом концах i-го вагона; для последнего вагона ($i = N$) $R_{i+1} = 0$.

Реакции межвагонных связей зависят от деформации и скорости деформации каждой связи. Вид зависимости определяется составом и схемой взаимодействия устройств поглощения энергии.

Силовая характеристика межвагонной связи

В качестве поглощающего аппарата на современных вагонах электропоездов предлагается применять аппарат модели Р-5 П, силовая характеристика которого аппроксимирована аналитически при помощи выражения

$$R(\Delta U, \Delta\dot{U}) = \\ = R_{\text{н.з}} + C\Delta U + F_{\text{тр}} sign\Delta\dot{U}, \qquad (8)$$

где $\Delta\dot{U}$ – скорость деформации; ΔU – деформация аппарата; $R_{\text{н.з}}$ – усилие начальной затяжки; C – жесткость, которая сама является функцией деформации; $F_{\text{тр}}$ – сила трения, зависящая от деформации;

$$sign\Delta\dot{U} = \begin{cases} 1 \text{ при } \geq \dot{0}; \\ -1 \text{ при } < \dot{0} \end{cases} \text{ – функция знака.}$$

Зависимости параметров, входящих в выражение (8), были подобраны исходя из известной силовой характеристики поглощающего аппарата Р-5 П, полученной экспериментально.

При определении реакции в межвагонной связи необходимо учитывать, что каждый поглощающий аппарат включен в силовую схему последовательно с упругим элементом, выражающим продольную жесткость кузова. При этом каждому уровню усилия соответствует суммарная деформация аппарата и кузова. Кроме того, будем полагать для межвагонной связи наличие одинаковых поглощающих аппаратов соседних вагонов и равную жесткость их кузовов. Тогда в силовую характеристику в качестве деформации $\Delta\dot{U}$ следует подставлять их половинные значения.

На рис. 2 приведен качественный вид наиболее сложного варианта силовой характеристики межвагонной связи. Характеристика состоит из линий сжатия (сплошная линия) и линий растяжения, или разгрузки (штриховая линия), когда скорость меняет знак.

При работе жертвенных буферов усилие не может превышать некоторого уровня $R_{\text{б}}$, который принят постоянным. Это приводит к появлению разных режимов, определяемых

Рис. 2. Полная силовая характеристика УПЭ с жертвенными буферами

сочетанием деформации и скорости деформации связи.

Режим 1 (OABCDEFGHIJO) имеет место в начале работы УПЭ, когда силовая характеристика определяется последовательно работающими поглощающими аппаратами и упругими элементами кузова. Кривые AB, DE, FG и IJ соответствуют работе поглощающих аппаратов в пределах их полного хода. Вне этих участков на сжатие или растяжение работает кузов вагона (прямые наклонные линии).

Режим 1 продолжается до тех пор, пока усилие сжатия не достигнет уровня деформирования блоков ($R < R_б$).

Режим 2 представляет собой работу блоков (буферов) в условиях их пластического деформирования. Переход в данный режим из режима 1 или режима 3 (см. ниже) происходит по условию $R \geq R_б$. Режим 2 продолжается до тех пор, пока блоки сжимаются в пределах их возможной толщины деформирования $l_б$.

Если сжатие прекратится, то происходит переход в режим 3. Если же деформация достигнет предельного значения, то происходит переход в режим 4.

Режим 3 (C'D'E'O'F'G'H'I'J'O'A'B'C') наступает тогда, когда после неполного деформирования буферов вновь работают только поглощающий аппарат и кузов вагона. Полная реализация этого режима происходит по линиям:

- C'D'E'O' – разгрузка;
- O'F'G'H' – растяжение;
- H'I'J'O' – ослабление («отпуск») из растянутого состояния;
- O'A'B'C' – сжатие.

Колебания могут завершиться в режиме 3, а может произойти переход на режим 2, если деформация сжатия превысит предельное значение для этого режима. В этом случае упругая реакция кузова превысила бы уровень срабатывания блоков $R > R_б$. В результате начинается дальнейшее сжатие буферов (режим 2) и принимается $R = R_б$.

Режим 4 возникает тогда, когда деформация буферов (в режиме 2) достигает предельного значения $l_б$ и в системе работают только кузов и поглощающие аппараты.

При этом значение всех участков ниже уровня $R_б$ совпадает с описанным выше для режима 3 (но точки помечены двумя апострофами). Выше же данного уровня появляются два дополнительных подрежима:

- C"Z – сжатие кузова после полного сжатия буферов;
- ZC" – разгрузка сжатого кузова.

Результаты расчетов

Разработанная математическая модель столкновения была реализована в виде программы, написанной на языке программирования C++.

На рис. 3 приведен вид окна программы с результатами расчетов одного из вариантов лобового столкновения электропоезда (сценарий № 1) с начальной скоростью движения 8 м/с, толщиной жертвенных буферов 20 см.

С помощью программы исследовано влияние толщины жертвенных буферов на нагруженность вагонов электропоезда. Результаты сведены в диаграмму (рис. 4).

Полученные зависимости для сценариев № 1, 2 имеют нелинейный и немонотонный характер. Причина этого заключается в том, что изменение толщины буферов вызывает перераспределение максимальных усилий в различных межвагонных связях. Кроме того, на графике показаны максимальные по модулю значения, в действительности же среди них имеют место как сжимающие («+»), так и растягивающие («–») усилия, как это видно из списков в окне программы (см. рис. 3).

Зависимость для сценария № 3 близка к линейной, при этом максимальное усилие возникает только в голове первого вагона. А при толщине блоков от 14 см максимальные усилия устанавливаются на уровне, при котором деформируются буфера (2,69 МН) и полного смятия ни одной группы буферов не происходит.

Результаты расчетов по сценарию № 1 позволяют также выделить диапазон толщин

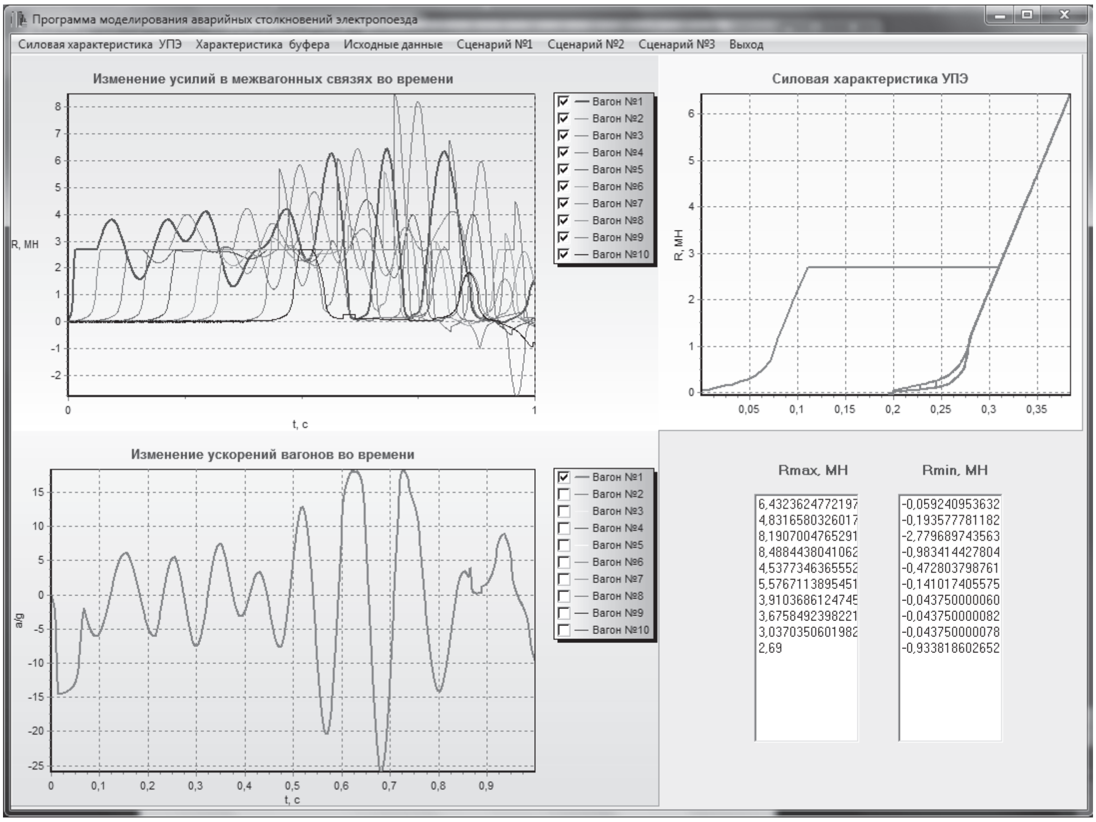


Рис. 3. Вариант расчета лобового столкновения электропоезда

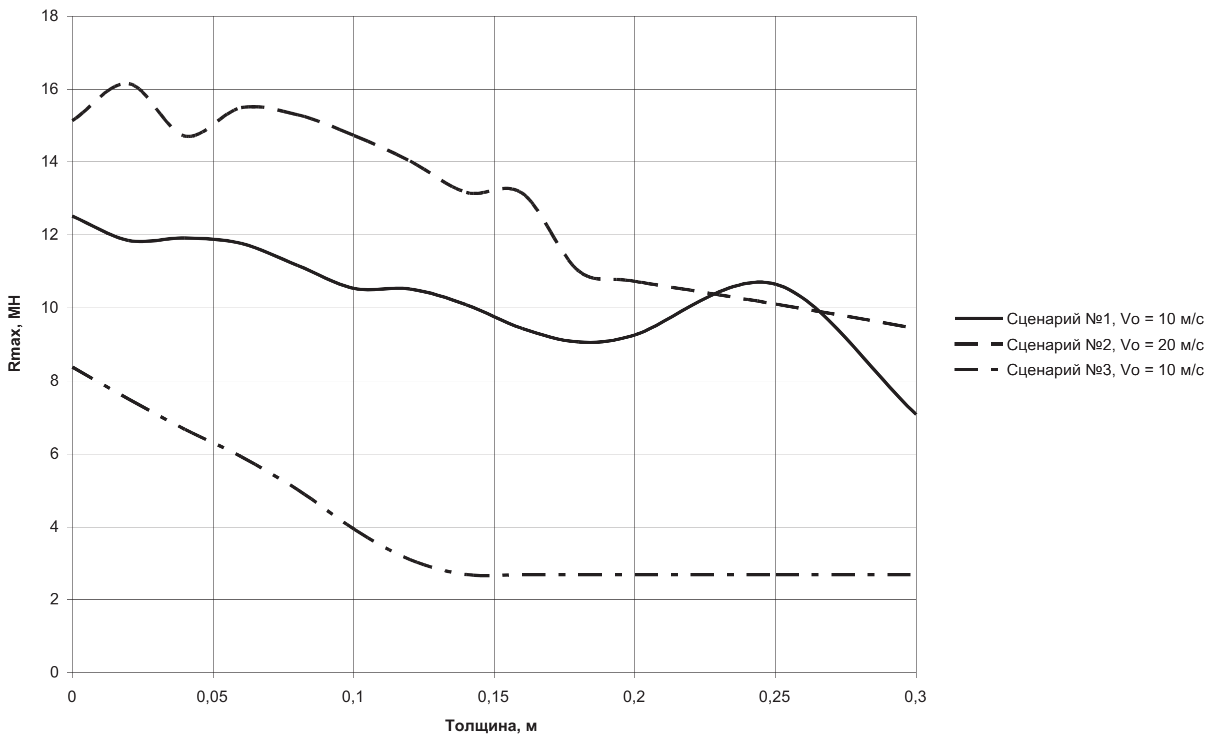


Рис. 4. Зависимость максимальных значений усилий от толщины деформируемых блоков при различных сценариях столкновения

(примерно от 10 до 22 см), в пределах которого уровень максимальных усилий снижается.

Заключение

Оценивая в целом эффективность жертвенных буферов в качестве средств пассивной защиты при аварийных столкновениях, можно сделать следующие выводы.

Применение жертвенных буферов существенно влияет на нагруженность вагонов электропоезда и позволяет понизить уровень максимальных усилий на 38–68 %.

Вместе с тем жертвенные буферы не в состоянии полностью обеспечить защиту вагонов электропоезда при всех установленных сценариях аварийных столкновений без применения других средств защиты.

Предложенные средства расчетного моделирования могут использоваться при проектировании электропоездов для оценки динамической нагруженности в части разработки средств пассивной защиты от аварийных столкновений.

Библиографический список

1. ГОСТ 32410-2013. Аварийные крэш-системы железнодорожного подвижного состава для пассажирских перевозок. – М. : Стандартинформ, 2014. – 12 с.

2. Распоряжение № 820р «Об утверждении технических требований к системе пассивной безопасности подвижного состава для пассажирских перевозок железных дорог колеи 1520 мм» от 14.04.2010 г. – М., 2010. – 37 с.

3. Шорохов С. Г. Обоснование технических решений обеспечения механической безопасности пассажирских вагонов при аварийных соударениях : автореф. дисс. … канд. техн. наук: 05.22.07 / С. Г. Шорохов. – М. : МИИТ, 2015. – 16 с.

References

1. GOST 32410-2013. Avariynyye kresh-sistemy zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava dlya passazhirskikh perevozok [Emergency Crash Systems of Railway Rolling Stock for Passenger Transportation]. Moscow, Standartinform, 2014. 12 p.

2. Order no. 820r Ob utverzhdenii tekhnicheskikh trebovaniy k sisteme passivnoy bezopasnosti podvizhnogo sostava dlya passazhirskikh perevozok zheelznykh dorog kolei 1520 mm [On Approving Technical Requirements for Passive Security System of Rolling Stock for Passenger Transportation on 1,520-mm Gauge Railways], Apr. 14, 2010. Moscow, 2010. 37 p.

3. Shorokhov S. G. Obosnovaniye tekhnicheskikh resheniy obespecheniya mekhanicheskoy bezopasnosti passazhirskikh vagonov pri avariynykh soudareniyakh [Justififcation for Technical Solutions in Ensuring Mechanical Security of Passenger Carriages in Energency Clashes]. Moscow, MIIT, 2015. 16 p.

БЕСПАЛЬКО Сергей Валерьевич – докт. техн. наук, профессор, bespalco@hotbox.ru; МЕЛАНИН Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент; *ГОРДЕЕВ Михаил Алексеевич – аспирант, Mixail_gordeev@bk.ru (Московский государственный университет путей сообщения – МИИТ).

УДК 629.014.6

С. Д. Коршунов, А. Н. Скачков, С. Л. Самошкин, Д. И. Гончаров, А. С. Жуков

МЕТОДИКА РАСЧЕТНО–ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КУЗОВОВ СОВРЕМЕННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дата поступления: 28.09.2015
Решение о публикации: 02.11.2015

Цель: Разработать методику расчетно-экспериментальных исследований кузовов современных вагонов из новых коррозионно-стойких сталей. **Методы:** Для расчетной оценки прочности кузова использовался метод конечных элементов, на основе которого с использованием интегрированной системы анализа конструкций SCAD разработана параметрическая конечно-элементная модель. Для экспериментального определения напряженно-деформированного состояния металлоконструкции кузова использовалась тензометрия. Оценка прочности кузова вагона проведена для всех видов нагрузок, имитирующих эксплуатационные режимы «Норм для расчета и проектирования…». **Результаты:** По разработанной методике были исследованы кузова двухэтажных пассажирских вагонов моделей 61-4465, 61-4472, 61-4473 и 61-4492. Анализ результатов расчетов и испытаний выявил наиболее нагруженные зоны металлоконструкции кузова. Это позволило разработать и реализовать эффективные меры, направленные на совершенствование конструкции кузовов с точки зрения прочности для всей серии двухэтажных пассажирских вагонов. **Практическая значимость:** Предложенная методика расчетно-экспериментальной оценки прочности кузовов вагонов при воздействии нормативных нагрузок позволяет объективно оценивать прочность кузовов современного подвижного состава по требованиям технического регламента Таможенного союза.

Методика, двухэтажный вагон, расчетная схема МКЭ, оценка прочности, статические и динамические испытания.

***Sergey D. Korshunov**, Cand. Sci. (Eng.), laboratory head, TIV-5@yandex.ru; **Aleksandr N. Skachkov**, Cand. Sci. (Eng.), director; **Sergey L. Samoshkin**, D. Eng., head of research and development support directorate; **Dmitriy I. Goncharov**, Cand. Sci. (Eng.), laboratory head, **Aleksandr S. Zhukov**, engineer, post-graduate student (Tver Carriage-Building Institute JSC) METHOD FOR CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MODERN ROLLING STOCK BODIES

Objective: To develop a method for calculation and experimental studies of bodies of modern carriages manufactured from new corrosion-resistant steels. **Methods:** Finite elements method was used for calculational evaluation of carriage body strength, from which a parameter-orientated finite-element model using SCAD integrated construction analysis system was developed. Strain-gauge measurement was used for experimental evaluation of stress-train state of carriage body’s metal structure. Evaluation of carriage body strength was conducted for all types of loads imitating operational regimes listed in “Norms for Calculation and Design…”. **Results:** Bodies of double-deck passenger carriages, models 61-4465, 61-4472, 61-4473 and 61-4492 were studied in accordance with the method developed. Analysis of calculations’ and tests’ results allowed to determine the most loaded zones of carriage body metal structures from the strength point of view. This allowed to develop and realise efficient measures aimed at perfecting carriage body designs from the point of view of strength for the entire range of double-deck passenger carriages. **Practical importance:** The proposed method for calculation and experimental evaluation of carriage body strength under the influence of standard load allows to objectively evaluate the strength of modern rolling stock carriage bodies in accordance with requirements of Customs Union technical guidelines.

Method, double-deck carriage, finite elements method calculation scheme, strength evaluation, static and dynamic tests.

Применение новых коррозионно-стойких материалов, снижение металлоемкости и оптимизация конструкции пассажирских вагонов требуют совершенствования методов оценки несущей способности кузовов вагонов. Тверской институт вагоностроения (ЗАО НО «ТИВ») создал методику расчетно-экспериментальных исследований кузовов вагонов пассажирского парка. Применение методики рассмотрено на примере кузова двухэтажного пассажирского вагона, прошедшего полный комплекс динамико-прочностных испытаний и теоретических исследований прочности в ЗАО НО «ТИВ» [1, 2]. Базовую модель купейного двухэтажного вагона модели 61-4465 построило ОАО «Тверской вагоностроительный завод», на ее основании созданы штабной вагон модели 61-4472, вагон-ресторан модели 61-4473 и вагон с местами для сидения модели 61-4492. Все перечисленные модели вагонов имеют однотипную несущую конструкцию кузова, что позволило применить к ним общую расчетно-экспериментальную методику и комплекс расчетных моделей. Основные несущие элементы металлоконструкции современных кузовов подвижного состава, выпускаемого ОАО «ТВЗ», выполнены из коррозионно-инертной стали и имеют назначенный срок службы не менее 40 лет.

Методика расчетно-экспериментальных исследований

Схема методики расчетно-экспериментальных исследований и оценки прочности кузовов ЗАО НО «ТИВ» приведена на рис. 1. На первом этапе выполняют расчетную оценку прочности кузова и определяют наиболее нагруженные узлы и элементы кузова. На втором проводят экспериментальную оценку прочности кузова с учетом результатов расчетов первого этапа. На заключительном (третьем) этапе анализируют результаты и оценивают сходимость результатов расчетных и экспериментальных исследований.

Методика впервые опробована при создании автомотрис, ряда моделей кузовов одно- и двухэтажных пассажирских вагонов [3, 4], а также при испытании кузовов пассажирских вагонов, прошедших капитальный ремонт. Одним из наиболее сложных вопросов при создании серии двухэтажных вагонов является разработка кузова с понижением уровня пола в средней части и доведение его прочностных характеристик до требований нормативных документов [2]. Кузов вагона представляет собой несущую цельнометаллическую сварную оболочку с вырезами для окон, дверей и люков, подкрепленную продольными и поперечными элементами жесткости (стрингерами, шпангоутами). Несущие элементы рамы изготовлены из низколегированной стали 09Г2С по ГОСТ 19281 (модуль упругости $E = 210\,000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$), наружная обшивка и каркас кузова – из нержавеющей стали EN10088-2-X6CrNiTi18-10+2B (модуль упругости $E = 200\,000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$) (табл. 1).

Конечноэлементная модель кузова

Для оценки напряженно-деформируемого состояния несущих элементов кузова вагона разработана параметрическая конечноэлементная модель и проведены прочностные расчеты для вариантов металлоконструкции. Для расчетной оценки несущей способности

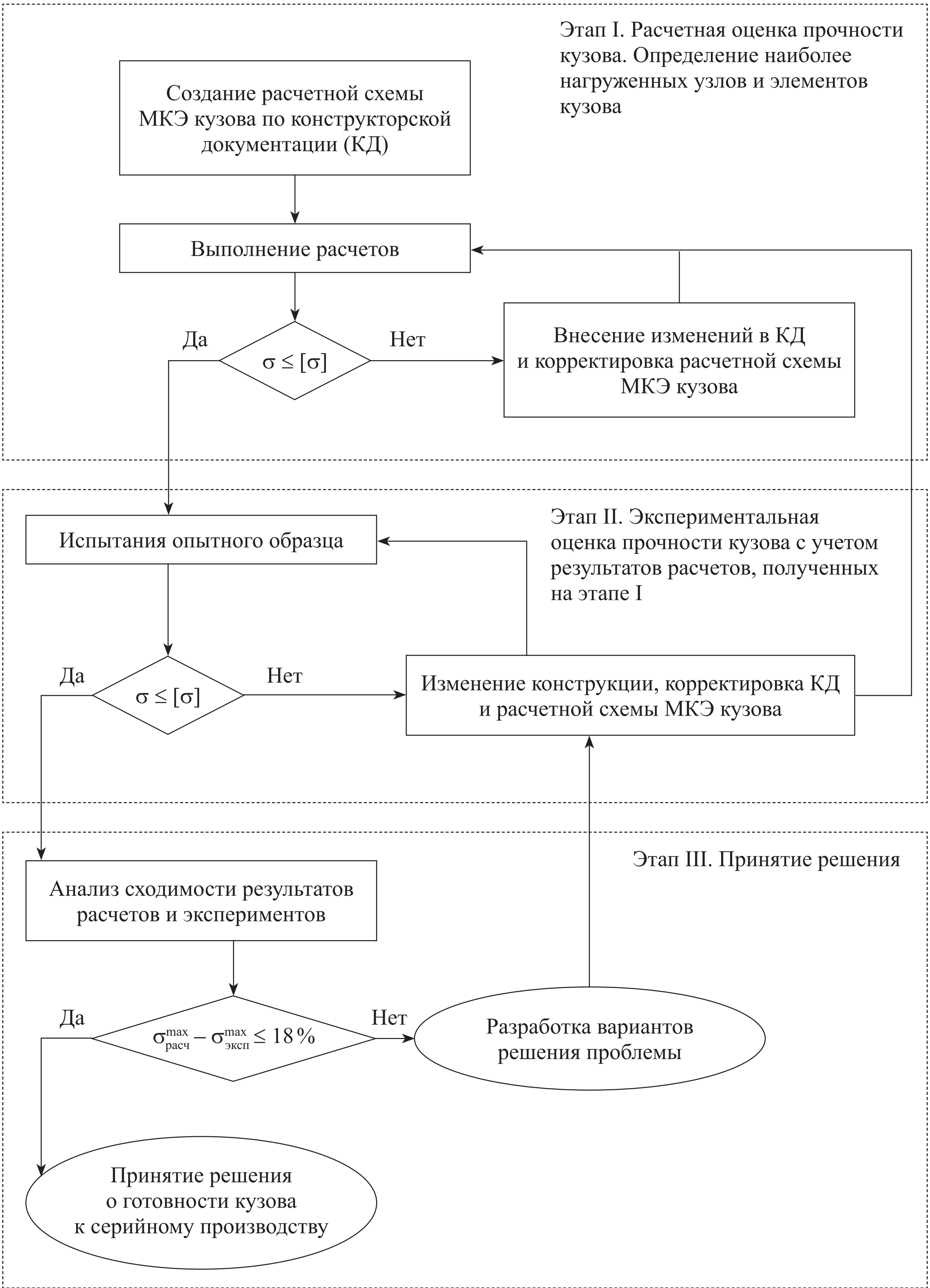


Рис. 1. Схема методики расчетно-экспериментальных исследований

ТАБЛИЦА 1. Прочностные характеристики и допустимые напряжения стали, МПа

Элемент конструкции	Материал	Класс прочности	Допустимые напряжения для I режима	Допустимые напряжения для III режима
Хребтовая балка в консольных частях рамы, шкворневые балки	Прокат из стали 345Д09Г2С по ГОСТ 19281	345	345	190
Остальные балки рамы и главные стойки торцевой стены	Прокат из стали 345Д09Г2С по ГОСТ 19281	345	345	200
Наружная обшивка и каркас кузова	Сталь нержавеющая 1,4541 EN10088-2-X6CrNiTi18-10+2B	260	260	172

кузовов вагонов моделей 61-4465, 61-4472, 61-4473 и 61-4492 в данной работе использовалась интегрированная система анализа конструкций SCAD [7]. Эта система представляет собой набор программ для прочностных расчетов и проектирования строительных и машиностроительных конструкций достаточно сложной структуры. Расчетная схема МКЭ представлена на рис. 2.

Элементы каркаса моделировали стержневыми элементами в виде стержней Тимошенко со степенью аппроксимации, равной четырем. При создании расчетных схем было учтено эксцентричное соединение элементов

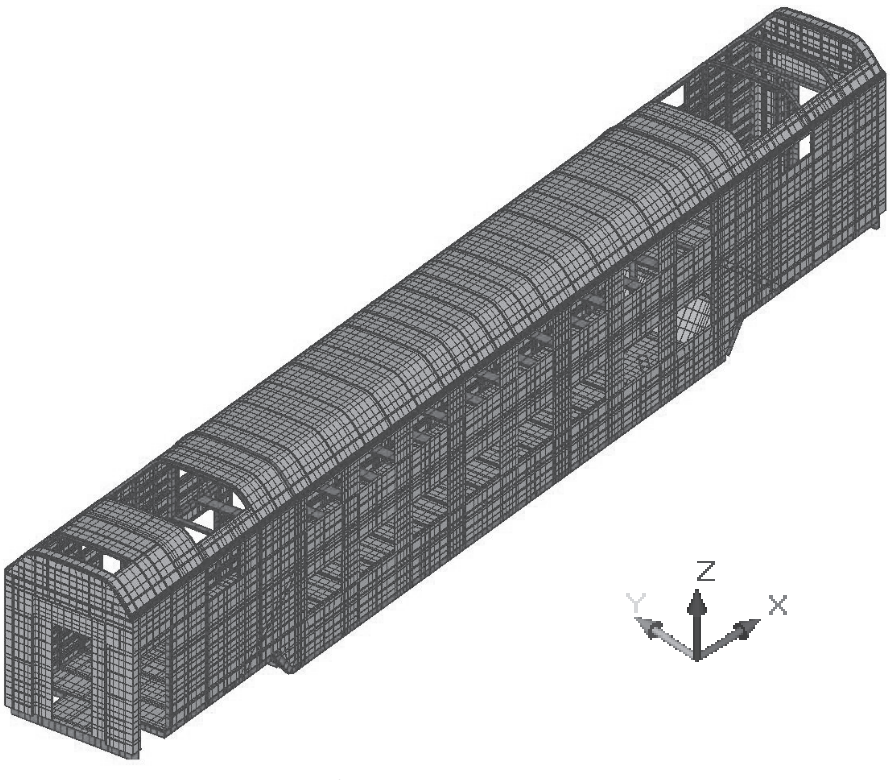


Рис. 2. Расчетная схема МКЭ кузова двухэтажного пассажирского вагона

каркаса с обшивкой. Обшивку моделировали треугольными и четырехугольными конечными элементами типа оболочки, для гладкой обшивки – изотропными, для гофрированной – ортотропными. Приведенные толщины ($\delta_{пр}$), модули упругости и коэффициенты Пуассона (E_x, ν_x, E_y, ν_y) для панелей обшивки кузова приведены в табл. 2.

Ограничение степеней свободы по оси Z обеспечивали четыре вертикальные линейные связи, расположенные в местах опор кузова на скользуны, по оси X – две линейные связи в месте приложения продольной нагрузки (на одном конце рамы), по оси Y – две линейные связи по концам рамы кузова. Расчет кузова проводили по расчетным режимам [2], приведенным в табл. 3.

Все нагрузки, действующие на расчётную модель, условно разделены на две группы: сосредоточенные и распределённые по элементам или площадям.

В первую группу были включены нагрузки от кондиционеров, резервуаров для воды, ящиков высоковольтного оборудования, преобразователей напряжения, аккумуляторных боксов, входных дверей, фекального бака.

ТАБЛИЦА 2. Приведенные толщины ($\delta_{пр}$), модули упругости и коэффициенты Пуассона (E_x, ν_x, E_y, ν_y) для панелей обшивки кузова

Панель	δ, мм	$\delta_{пр}$, мм	E_x, МПа	ν_x	E_y, МПа	ν_y
Пол гладкий	2,5	2,5	200 000	0,3	200 000	0,3
Пол гладкий в тамбуре	4,0	4,0	200 000	0,3	200 000	0,3
Пол гофрированный	1,5	1,7	200 000	0,3	3230	0,0005
Средняя часть крыши	1,5	1,6	200 000	0,3	6924	0,001
Скат	2,0	2,0	200 000	0,3	200 000	0,3
Торцевая стена	2,0	2,0	200 000	0,3	200 000	0,3
Гладкая обшивка боковой стены	1,5	1,5	200 000	0,3	200 000	0,3
Обшивка боковой стены, сваренная из гофрированного (δ = 1 мм) и гладкого (δ = 1,5 мм) листов	1,5 + 1,0	2,6	200 000	0,3	114 000	0,17

ТАБЛИЦА 3. Величина основных сил для расчетных режимов [2]

Расчетные параметры	Расчетные режимы	
	I	III
Продольная сила, МН	–2,5	±1,0
Вертикальная статическая нагрузка (сила тяжести)	Брутто	Брутто
Скорость движения при определении вертикальной динамической нагрузки, м/с	Не учитывается	45
Боковая сила	По п. 2.3.4, 2.4.4 «Норм…» [2]	Учитывается путем увеличения силы тяжести брутто на 12,5 %

Ко второй группе нагрузок относятся нагрузки от сцепки, межвагонных переходов, окон, люков, дверей, потолков, систем отопления и вентиляции, электрооборудования, веса пассажиров, ЗИП и сантехнического оборудования.

Все распределённые нагрузки приложены в следующих зонах: коридоры тормозного и нетормозного концов вагона, служебное помещение, бытовое помещение, купе с радиооборудованием, купе проводника, купе инвалида, салоны первого и второго этажей, нижняя кромка окон, туалеты первого этажа.

Продольные усилия с присоединенным моментом прикладывали к передним (растягивающим) или задним (сжимающим) упорам хребтовой балки.

Схема содержит более 37 400 узлов и около 49 000 элементов, в системе уравнений более 230 000 неизвестных.

Рис. 3. Кузов двухэтажного пассажирского вагона в стенде для прочностных статических испытаний нормативными нагрузками

Экспериментальная оценка прочности кузова

Выполнены комплексные прочностные испытания кузова вагона в соответствии с требованиями [1, 2, 5, 7]. При экспериментальных исследованиях в соответствии с требованиями нормативных документов на кузов воздействовали все виды испытательных нагрузок, имитирующих эксплуатационные режимы (табл. 3). Продольные нагрузки реализовывали в специальном стенде для статических прочностных испытаний вагонов, оборудованном гидравлической силовой системой и силоизмерительными устройствами (рис. 3). Вертикальные нагрузки тары и брутто создавали штатным пневматическим оборудованием стенда при дискретном приложении распределенных нагрузок на полы первого и второго этажей (рис. 4). Сосредоточенные нагрузки от веса тяжелого оборудования вагона имитировали габаритно-весовыми макетами.

Схемы расположения исследуемых сечений и зон установки тензодатчиков на кузове двухэтажного вагона (рис. 5) учитывают результаты расчетов. При разработке схем установки тензодатчиков особое внимание уделяли исследованию напряженного состояния основных несущих элементов рамы, зонам концентрации в углах вырезов и в узлах соединения элементов, которых существенно различаются по параметрам геометрических характеристик.

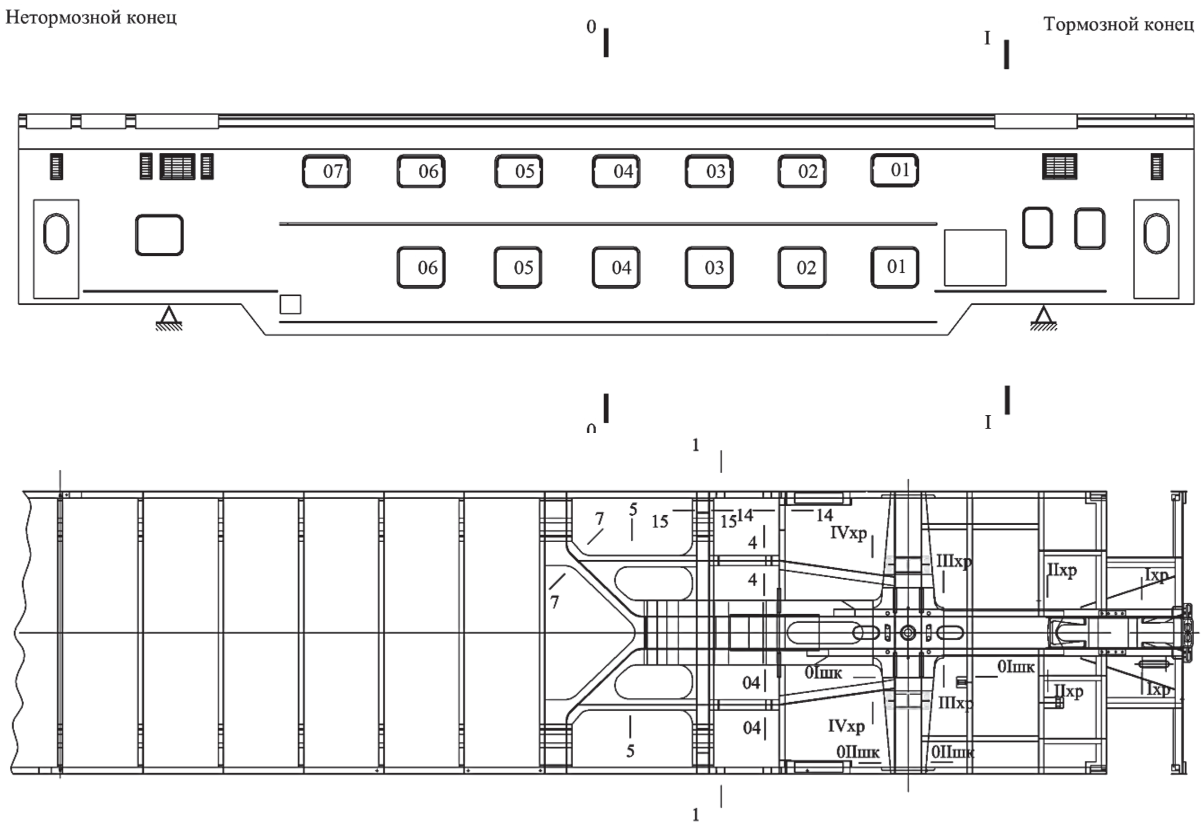
Напряженно-деформируемое состояние несущих элементов кузова определяли методом тензометрирования с использованием многоканальной микропроцессорной тензометрической системы ММТС-64.01 и тензометрических датчиков с базой 10 мм [1] (рис. 6). Обработку результатов испытания проводили согласно требованиям [5].

Оценка полученных результатов

В табл. 4 приведены максимальные напряжения (σ_x, МПа) в конструкции кузова по результатам расчетов и экспериментов [4], а

б

Рис. 4. Комплект пневматических приспособлений (а)
и реализация вертикальных нагрузок на первый и второй этажи кузова вагона (б)



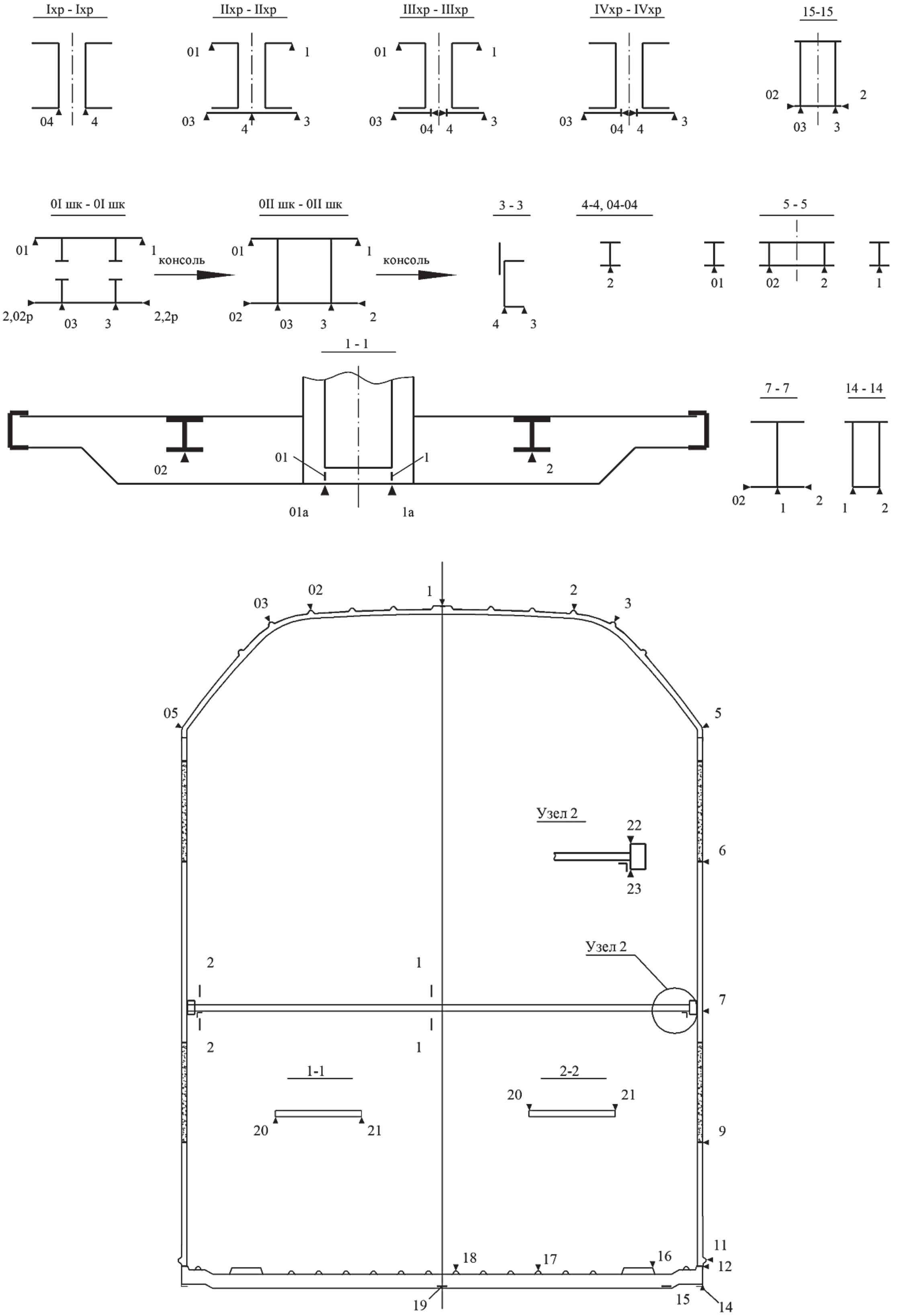


Рис. 5. Схемы расположения тензодатчиков на основных несущих элементах металлоконструкции кузова вагона

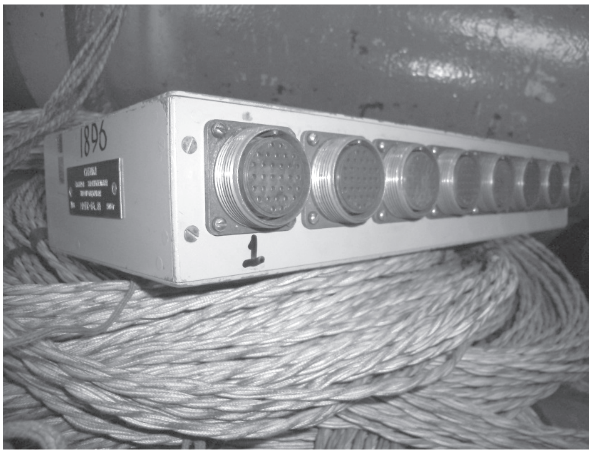


Рис. 6. Многоканальная микропроцессорная тензометрическая система ММТС-64.01

из которой видно, что расхождение полученных результатов не превышает 18 %.

Анализ результатов расчетов и испытаний от нагрузок различных видов выявил наиболее нагруженные зоны конструкции кузова с точки зрения как прочности рамы, так и устойчивости обшивки боковин. В первую очередь, это относится к местам перегиба рамы кузова в шкворневых зонах. Детальный анализ соотношения действующих в несущих элементах силовых факторов позволил разработать и реализовать эффективные меры, направленные на совершенствование конструкции по условиям прочности и устойчивости. Для повышения несущей способности боковых стен по всей длине кузова введены подоконные продольные балки, повышающие устойчивость боковин и разгружающие зону перегиба рамы при действии продольных нагрузок. На основании результатов расчетно-экспериментальных исследований металлоконструкции кузова выявлены резервы снижения массы за счет оптимизации сечений набора продольных и поперечных элементов жесткости, расположенных выше оконного пояса первого этажа кузова. Данные предложения успешно реализованы на металлоконструкции опытного кузова вагона.

Заключение

Анализ всего экспериментального и расчетного материала позволил сделать вывод, что методика расчетно-экспериментальной оценки прочности кузовов вагонов при воздействии нормативных нагрузок позволяет выполнять объективную оценку прочности кузовов современного пассажирского подвижного состава по требованиям технического регламента Таможенного союза в части как расчетов, так и испытаний. Методика апробирована при создании новых моделей кузовов пассажирских двухэтажных вагонов

ТАБЛИЦА 4. Максимальные напряжения (σ_x, МПа) в конструкции кузова

Элементы конструкции	$\sigma_т$	Допустимые [σ]		Режим			
				I		III (+/–)	
		I	III	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
Несущие элементы рамы	345	345/327	190/200	–297	–289	–133	–114
Обшивка и каркас крыши	260	260	172	–63	–52	18	15
Обшивка и каркас боковин	260	260	172	–128	–114	–54	–49
Обшивка и каркас торцевых стен	260	260	172	45	31	26	18

моделей 61-4465, 61-4472, 61-4473 и 61-4492, которые в настоящее время серийно производятся и эксплуатируются на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. Коршунов С.Д. Современные методы испытаний железнодорожного подвижного состава, прошедшего ремонты различных объемов и вновь построенного / С.Д. Коршунов, С.Л. Самошкин // Вагонный парк. – 2012. – № 7. – С. 15–18.

2. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ВНИИВ–ВНИИЖТ, 1983. – 260 с.

3. Оценка несущей способности кузовов одноэтажного и двухэтажного вагонов нового модельного ряда и выбор рационального варианта стрингерной конструкции боковых стен : отчет о НИР ; 11.11.211. – 2011. – 139 с.

4. Проведение предварительных испытаний и оценка прочности кузова двухэтажного пассажирского вагона модели 61-4465 : отчет о НИР/ЗАО НО «ТИВ»; 09.09.246. – Тверь, 2009. – 73 с.

5. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИ Вагоностроения, 1995. – 100 с.

6. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности железнодорожного подвижного состава» (ТР ТС 001/2011) (утв. решением комиссии Таможенного союза от 15.07.2011 г. № 710).

7. SCAD. Описание и применение. – М., 1995. – 220 с.

References

1. Korshunov S.D. & Samoshkin S.L. *Vagonnyy park – Rolling Stock*, 2012, no. 7, pp. 15-18.

2. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznyh dorog kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for Calculation and Design of New and Modernised Carriages for 1,520-mm Gauge Railways (Non-Self-Propelled). Moscow, VNIIV–VNIIZhT, 1983. 260 p.

3. Otsenka nesushchey sposobnosti kuzovov odnoetazhnogo i dvukhetazhnogo vagonov novogo modelnogo ryada i vybor ratsionalnogo varianta stringernoy konstruktsii bokovykh sten [Evaluation of Load-Bearing Capacity of Bodies of New Model Range of Single- and Double-Deck Carriages and Choice of Rational Option for Stringer Structure of Side Walls]. Research report; 11.11.211. 2011. 139 p.

4. Provedeniye predvaritelnykh ispytaniy i otsenka prochnosti kuzova dvukhetazhnogo passazhirskogo vagona modeli 61-4465 [Conducting Preliminary Tests and Strength Assessment of Model 61–4465 Double-Deck Passenger Carriage Body]. Research report; Tver Carriage-Building Institute JSC; 09.09.246. Tver, 2009. 73 p.

5. RD 24.050.37-95. Vagony gruzovyye i passazhirskiye. Metody ispytaniy na prochnost i khodovyye kachestva [Freight and Passenger Carriages. Methods for Strength and Ride Performance Tests]. Moscow, GosNII Vagonostroyeniya, 1995. 100 p.

6. Customs Union technical guidelines “On Safety of Railway Rolling Stock” (TR TS 001/2011) (approved by Customs Union commission on Jul. 15, 2011, no. 710).

7. SCAD. Opisaniye i primeneniye [Description and application]. Moscow, 1995. 220 p.

*КОРШУНОВ Сергей Дмитриевич – канд. техн. наук, зав. лабораторией, TIV-5@yandex.ru; СКАЧКОВ Александр Николаевич – канд. техн. наук, директор; САМОШКИН Сергей Львович – д-р техн. наук, начальник управления «Научно-технического обеспечения и развития»; ГОНЧАРОВ Дмитрий Игоревич – канд. техн. наук, зав. лабораторией; ЖУКОВ Александр Сергеевич – инженер (ЗАО НО «Тверской институт вагоностроения»).

УДК 656.078, 656.001

С. А. Селиверстов

РАЗРАБОТКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ

Дата поступления: 06.04.2015
Решение о публикации: 07.09.2015

Цель: Обосновать актуальность развития показателей транспортной обеспеченности в масштабах страны, региона, города, района и городского квартала, позволяющих оценивать структурно-функциональную организацию транспортных систем. Представить обзор подходов к оценке транспортной обеспеченности городов и регионов. Предложить показатели, позволяющие проводить сравнительную оценку транспортной обеспеченности по видам транспорта. **Методы:** Использованы методы системного анализа, методы относительной оценки транспортной обеспеченности территории, методы анализа данных. **Результаты:** Разработаны показатели оценки густоты сети с учетом количества транспортных средств и протяженности соответствующих транспортных коммуникаций, а также с учетом площади территории, количества транспортных средств и протяженности соответствующих транспортных коммуникаций. Представлены практические примеры, демонстрирующие сравнительную оценку транспортной обеспеченности согласно разработанным показателям. **Практическая значимость:** Разработанные показатели позволяют в масштабах страны, региона и города оценивать транспортную обеспеченность при изменении площади территории, протяженности транспортной сети, численности населения и количества транспортных средств по видам транспорта, а в масштабах городского квартала – интегральную транспортную доступность. В отличие от существующих методов данные показатели позволяют оценивать обеспеченность территории транспортными коммуникациями с учетом вида транспортных средств, тем самым позволяя проводить сравнительный анализ в границах транспортной обеспеченности.

Транспортная система, показатель транспортной обеспеченности, показатель густоты сети, показатель развития, транспортная сеть.

Svyatoslav A. Seliverstov, researcher, amuanator@rambler.ru (Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences) DEVELOPMENT OF INDICATORS OF TRANSPORT PROVISION

Objective: To justify currency of development of transport provision indicators on the national, regional, city, district and neighbourhood scale, allowing to evaluate structural and functional organisation of transport systems. To present an overview of approaches for evaluation of transport provision in regions and cities. To propose indices that allow to conduct comparative evaluation of transport provision by types of transport. **Methods:** Methods of systemic analysis, comparative evaluation of transport provision of territory, and data analysis methods were used. **Results:** Network density indicators were developed, taking into account the number of vehicles, length of corresponding transportation lines and territory surface area, number of vehicles and length of corresponding transportation lines. Practical examples demonstating comparative evaluation of transport provision according to the developed indicates were presented. **Practical importance:** Indicators developed allow to evaluate transport provision on the national, regional and city scale when territory, length of transport lines, population numbers and number of vehicles by transportation types are altered, and on the urban neighbourhood scale integral transport accessibility can be evaluated. Unlike existing methods, these indicators allow to evaluate territorial provision with transport lines taking transportation type into account, thus allowing for comparative analysis within transport provision framework.

Transport system, indicators of transport provision, density of network indicator by number of vehicles (mode of transport), development indicator by number of vehicles (mode of transport) and megalopolis area, transport network.

Сегодня городская транспортная система (ГТС) как часть антропогенной системы ресурсного обеспечения города гарантирует пространственное взаимодействие товаров, услуг и населения города, сокращая временные лаги, возникающие из-за необходимости преодолевать пространственные разрывы [1].

Посредством развитой ГТС жители города перемещаются к местам работы, учреждениям образования, здравоохранения, торговли и отдыха, имеют доступ к государственным учреждениям и сфере услуг.

Надлежащим образом сконструированная ГТС ускоряет транспортные и транспортно-логистические процессы, протекающие в городе, и как следствие – повышает уровень благосостояния транспортных компаний, работающих на рынке городских перевозок, торговых компаний и иных субъектов коммерческой деятельности, в статьи расходов которых входит услуга транспортировки [6, 13].

С другой стороны, нерационально спланированная и организованная ГТС не может в полной мере удовлетворить потребности пользователей транспортными услугами, усугубляет состояние финансово незащищенных групп населения, отражается на безопасности перевозок и несет повышенные издержки [16]. Снижение пропускной способности транспортных сетей может стать причиной дорожных заторов, аварий, что негативно скажется на разных сферах функционирования города.

Описанные проблемы более выражены в городских районах с высокими плотностью населения и концентрацией мест занятости.

По данным Международного энергетического агентства, сегодня на долю транспорта приходится 23 % общего объема выбросов CO_2, из которых 73 % генерируется автомобильным транспортом [26]. Это представляет серьезную проблему для энергетической безопасности и устойчивости стран и мира в целом, поэтому транспортный сектор считается одним из самых значительных источников неустойчивости в городских районах. Эта отрасль народного хозяйства вносит наибольший вклад в загрязнение окружающей среды. Нынешнее загрязнение воздуха влияет на здоровье жителей города. По данным [26], из-за загрязнения городской среды отходами транспорта в странах ЕС и в России происходит более 370 000 преждевременных смертей в год. Однако если основные характеристики ГТС надлежащим образом, качественно и количественно определены, то перечень проблем можно уменьшить [14, 20, 33].

Уровень эффективности функционирования ГТС, степень ее организации и мера пространственно-временной организованности протекающих в ней транспортных процессов определяются системой транспортных показателей, от качества которой напрямую зависит качество самой ГТС [18]. Следовательно, показатели функционирования, качества, эффективности и развития ГТС, а также протекающих в ней процессов должны быть взаимосвязаны, взаимозависимы и отражать сущность этих процессов [9, 17, 19].

Таким образом, разработка показателей эффективности актуальна, носит перспективный характер и позволяет на стадии проектирования ГТС заложить необходимые параметры функционирования последней, чему и посвящена данная статья. При этом предлагается сконцентрировать внимание на показателях транспортной обеспеченности города.

Анализ предметной области

Структурно-функциональный облик транспортной системы с учетом технико-экономических особенностей развития сетей путей сообщения по крупным географическим регионам и тенденций развития транспорта и перевозок исследуется в трудах С. С. Ушакова, Л. И. Василевского, при этом рассматриваемая система анализа включает относительные показатели развития транспорта, показатели развития сети путей сообщения по видам транспорта, относительные показатели густоты сетей путей сообщения и комплексные показатели обеспеченности территорий: коэффициент Энгеля, коэффициент Успенского [24]. Позже В. Г. Галабурда, В. А. Персианов, А. А. Тимошин предложили классификацию схем территориальной организации транспорта и его членение на иерархические уровни, разработали характеристические показатели транспортной обеспеченности и доступности, проанализировали статическую и динамическую подвижность населения, предложили показатели качества транспортного обслуживания по видам транспорта [2].

Организация систем функционирования и взаимодействия транспорта и перевозок в структуре обменных социально-экономических процессов позволила Г. А. Гольц подойти к решению вопросов взаимосвязанного развития транспорта и расселения. Затем В. В. Владимиров, Н. И. Наймарк, Г. В. Субботин сформировали планировочную структуру систем расселения и функционального зонирования, Фишельсон, Черепанов и И. А. Фомин спроектировали комплексные схемы транспорта в генеральных планах городов. Проблемы развития транспортной планировки города изучал Е. М. Лобанов. Он раскрыл методологические основы функционального зонирования города, организации дорожного движения и проектирования улично-дорожных сетей, при этом особое внимание уделил вопросам организации дорожной сети автомобильного транспорта и пешеходного движения с учетом технико-экономической оценки. Позже А. Э. Горев, А. И. Солодкий и И. Н. Пугачев рассмотрели практические вопросы организации дорожного движения и определили характеристики транспортных и пешеходных потоков [3].

Транспортную систему города и региона с позиции жизнеобеспечения территории рассмотрел Э. А. Сафронов [8]. Анализируя схемы расселения и развитие городов, он утверждал, что транспортная сеть формирует планировочную структуру города, являясь ее каркасом. Наряду с М. С. Фишельсоном он выделил восемь геометризированных планировочных схем (ГПТ). Система показателей ГПТ по Сафронову включает показатель предлагаемой и удельной работы системы ГПТ, характеристику производительности и коэффициент полезного действия (КПД) системы ГПТ. В. М. Дубов с соавторами предложили на концептуальном уровне системный подход оценки свойств и ресурсной устойчивости транспортной системы в зависимости от иерархии организационных и функциональных структур [4].

Среди последних зарубежных работ интерес представляет публикация [27], содержащая структурированную систему показателей транспорта. Концепция доступности и ее развитие в системе транспортного планирования и повышения мобильности городского населения проанализирована в [31].

Постановка проблемы

Важнейшим стратегическим направлением развития транспортной системы, согласно Транспортной стратегии РФ до 2030 г., является сбалансированное развитие транспортной инфраструктуры. Реализация этого направления означает согласованное комплексное развитие всех ее элементов, включая городские транспортные коммуникации, такие как автомобильные, велосипедные и пешеходные дороги. Проведенный анализ свидетельствует, что существующие показатели транспортной обеспеченности, например, густота сети, коэффициент Энгеля и другие рассчитываются лишь по данным эксплуатационной длины транспортной сети и численности населения в регионе.

Эти показатели не позволяют оценивать обеспеченность транспортными коммуникациями по видам транспорта.

Данная статья предлагает разработку необходимых показателей для анализа структурно-функционального развития ГТС с учетом протяженности городских транспортных сетей (по видам транспортных коммуникаций), количества транспортных средств (по видам транспорта) и общего числа жителей.

Разработка показателей

По результатам анализа представим наиболее используемые показатели оценки эффективности транспортных систем, а также впервые предложенные показатели (табл. 1).

Как видно из таблицы, предложенные показатели № 7 и 8 обладают формальной общностью с имеющимися показателями № 5 и 6, соответственно, однако функционально они различны, так как учитывают не количество жителей на исследуемой территории (№ 5 и 6), а количество транспортных средств и соответствующих им коммуникаций (№ 7 и 8). Та-

ТАБЛИЦА 1. Анализ показателей транспортной обеспеченности

№ п/п	Показатель	Ед. изм.	Обозначение, формула	Масштаб применения	Источник
1	Численность населения	чел.	H	Район, город, регион, страна	[2, 3, 24]
2	Площадь территории	км^2	S	Район, город, регион, страна	[2, 3, 24]
3	Наличие подвижного состава, функционирующего в городе (по видам транспорта)	ед.	N_{v_i}	Город, регион, страна	[2, 3, 24]
4	Эксплуатационная длина путей сообщения в городе (по видам транспорта)	км	L	Город, регион, страна	[2, 3, 24]
5	Густота сети	км/жит.	d_{LH}, $d_{LH} = \frac{L_i}{H}$ (I)	Город, регион, страна	[2, 24]
6	Коэффициент Энгеля	$\frac{\text{км}}{\sqrt[2]{\text{км}^2 \times (\text{жит.})}}$	d_{LSH}, $d_{LSH} = \frac{L_i}{\sqrt[2]{SH}}$ (II)	Город, регион, страна	[2, 24]
7	Густота сети с учетом количества тр. с. (I)	км/ед.т.с.	$d_{L_vN_v}, d_{L_vN_v} = \frac{L_v}{N_v}$ (I)	Городской квартал, район, город, регион, страна	Предложен впервые
8	Густота сети учетом площади, и численности тр. с. (II)	$\frac{\text{км}}{\sqrt[2]{\text{км}^2 \times (\text{ед.тр.с})}}$	$d_{L_vSN_v}, d_{L_vSN_v} = \frac{L_v}{\sqrt[2]{SN_v}}$ (II)	Городской квартал, район, город, регион, страна	Предложен впервые

ким образом, автомобильным дорогам будут соответствовать автомобильные транспортные средства, пешеходным дорогам – пешеходы.

Обоснование применения предложенных показателей для городского, регионального и государственного масштаба

Объединим в I группу показатель густоты сети с учетом количества жителей и показатель густоты сети с учетом количества транспортных средств, а во II группу – коэффициент Энгеля и показатель густоты сети с учетом площади территории и численности транспортных средств. Рассмотрим данные государственной статистики, описывающие изменения эффективности транспорта в России в 2000–2013 гг. [25]. В 2000–2010 гг. численность населения России устойчиво снижалась (табл. 2) при незначительном увеличении протяженности автомобильных дорог. С другой стороны, при устойчивом снижении численности населения в этот же период наблюдается устойчивый высокий рост численности автомобильных транспортных средств, который свидетельствует об ухудшении транспортной обеспеченности. Теперь рассмотрим, как данный процесс оценивают показатели I группы.

Динамика кривых, представленная на рис. 1, позволяет наблюдать, как в интервалах с 2000 по 2005 г. и с 2006 по 2010 г. коэффициент густоты сети автомобильных дорог с учетом числа жителей растет, что, казалось бы, говорит об общем положительном тренде развития транспортной обеспеченности. Однако в действительности имел место обратный процесс. Тренд предложенного коэффициента густоты сети с учетом численности автомобильных транспортных средств на этом же интервале, напротив, снижается, что говорит об ухудшении транспортной обеспеченности и подтверждается реальной ситуацией в транспортном комплексе России.

Таким образом, в условиях снижения численности населения и роста автотранспортных средств при оценке транспортной обеспеченности необходимо использовать не только коэффициент густоты сети с учетом численности населения, но и показатель густоты сети с учетом численности автомобильных транспортных средств.

Динамика кривых показателей II группы схожа с динамикой кривых I группы (рис. 2). В интервалах с 2001 по 2003 г. и с 2005 по 2007 г. тренд коэффициента Энгеля растет, а коэффициента густоты сети с учетом количества автомобильных транспортных средств и площади территории снижается (табл. 3).

Таким образом, в условиях, когда площадь оцениваемой территории постоянна при изменении протяженности сети, численности населения и количества автотранспортных средств, необходимо оценивать транспортную обеспеченность, используя не только коэффициент Энгеля, но и показатель густоты сети с учетом количества автомобильных транспортных средств и площади территории.

Для более достоверного анализа развития транспортной обеспеченности региона предлагаем при ее оценке использовать показатели и I, и II групп.

Обоснование применения показателей транспортной обеспеченности при оценке транспортной доступности городского квартала

Согласно [32], транспортная доступность является одним из наиболее важных критериев, характеризующих качество городской среды, уровень транспортного обслуживания и мобильности городского населения. В [31] среди факторов, влияющих на транспортную доступность, названо наличие транспортных коммуникаций, а критерием оценки при этом выступают только протяженность и плотность автомобильных дорог в масштабах города.

ТАБЛИЦА 2. Статистика транспортной отрасли России в 2000–2013 гг.

Год	Численность населения, млн чел., H	Протяженность автомобильных дорог общего пользования, 1000 км, L	Число легковых автомобилей, млн шт., N_v	Коэффициент густоты сети, d_{LH}	Коэффициент густоты сети с учетом численности транспортных средств (ЧТС) (автомобилей), d_{LNa}	Коэффициент Энгеля, d_{LSH}	Коэффициент густоты сети с учетом ЧТС и площади территории, d_{LSNa}
				I группа		II группа	
2000	145,2	532,4	20,353	3,66	26,16	1,91	0,90
2001	146,3	537	21,232	3,67	25,296	1,92	0,89
2002	145,2	541,1	22,468	3,72	24,086	1,93	0,87
2003	145	544,2	23,383	3,75	23,276	1,94	0,86
2004	144,3	546,4	24,208	3,78	22,576	1,95	0,85
2005	143,8	530,5	25,57	3,69	20,746	1,92	0,80
2006	143,2	597,3	26,794	4,17	22,29	2,04	0,88
2007	142,8	624,2	29,405	4,37	21,22	2,09	0,88
2008	142,8	629,1	32,021	4,40	19,64	2,10	0,85
2009	142,7	646,9	33,084	4,53	19,55	2,13	0,86
2010	142,8	664,6	34,354	4,65	19,34	2,16	0,87
2011	142,9	727,7	36,415	5,10	19,98	2,25	0,92
2012	143	925,2	38,792	6,47	23,85	2,54	1,14
2013	143,3	984,6	41,428	6,87	23,76	2,62	1,17

Примечание. Территория, S – 17 098 200 км^2.

Рис. 1. Сравнение коэффициентов I группы:
1 – коэффициент густоты сети;
2 – коэффициент густоты сети с учетом численности транспортных средств (ЧТС) (автомобилей)

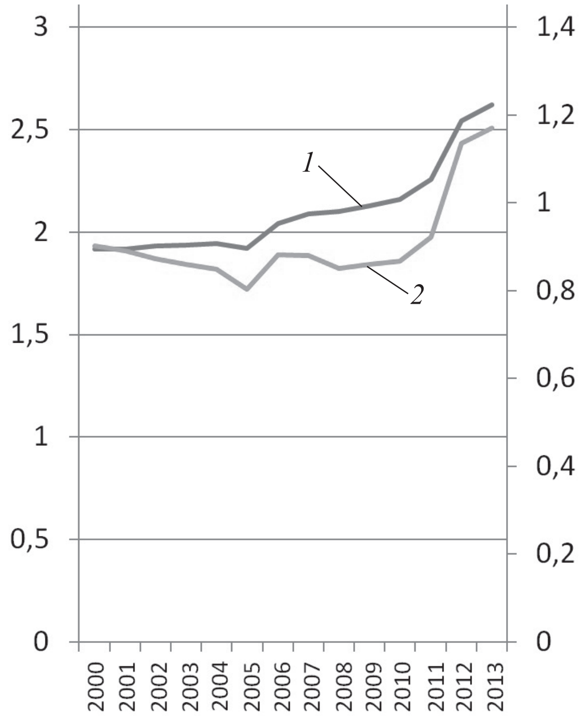


Рис. 2. Сравнение коэффициентов II группы:
1 – коэффициент Энгеля; 2 – коэффициент густоты сети с учетом ЧТС и площади территории

ТАБЛИЦА 3. Направление трендов показателей I и II группы в 2000–2013 гг.

Показатель	2000–2001	2001–2002	2002–2003	2003–2004	2004–2005	2005–2006	2006–2007	2007–2008	2008–2009	2009–2010	2010–2011	2011–2012	2012–2013
d_{LH}	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
d_{LNa}	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓
d_{LSH}	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
d_{LSNa}	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑

В свою очередь, базовым инфраструктурным элементом организации планировочной структуры города является городской квартал (ГК), определяемый как планировочная единица застройки в границах красных линий, ограниченная магистральными или жилыми улицами. Упорядоченная в территориальных границах города сеть ГК формирует каркас города и определяет конфигурацию уличной дорожной сети, а также ее структурные и функциональные особенности, включая наличие автомобильных, велосипедных и пешеходных дорог, их геометрические характеристики (например, протяженность), метрические (например, пропускную способность) и физические (например, скорость транспортных средств).

Выделение велосипедного транспорта как самостоятельного с предоставлением ему обособленной транспортной велосипедной коммуникации обусловлено данными статистики [5, 29].

Из рис. 3 видно, что темпы производства велосипедов на конец 2010 г. превышают темпы производства автомобилей в 3 раза.

Из рис. 4 видно, что, во-первых, доля поездок во всех перемещениях на 100 жителей в странах Европы и США лежит в интервале от 90 до 40; во-вторых, в среднем каждый житель Европы и каждый 10-й житель США на конец 2010 г. имел велосипед.

Последнее обстоятельство обусловливает включение в структуру городского квартала велосипедной транспортной составляющей наряду с пешеходной и автомобильной.

Таким образом, уровень обеспеченности ГК надлежащими транспортными коммуникациями определяет в дальнейшем уровень транспортной доступности и города в целом.

В настоящий момент отсутствуют интегральные показатели транспортной обеспеченности, позволяющие связать геометрические характеристики ГК, количество жителей, виды транспортных средств и их численность с соответствующими транспортными коммуникациями и оценивать транспортную обеспеченность.

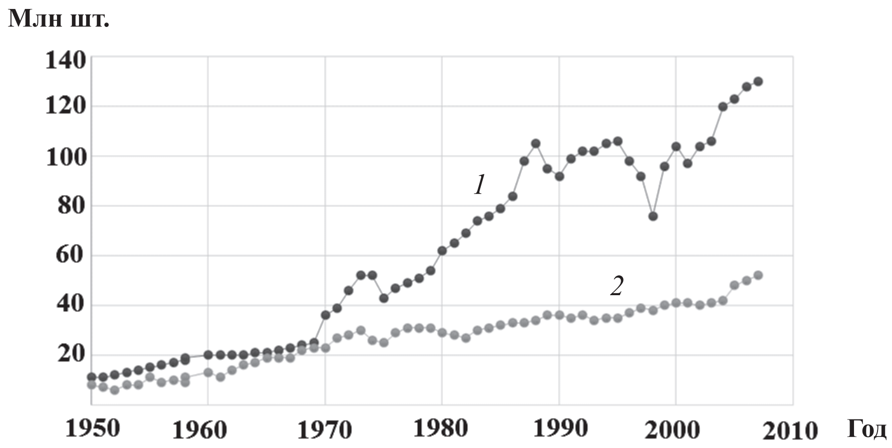


Рис. 3. Мировое производство велосипедов (1) и автомобилей (2)

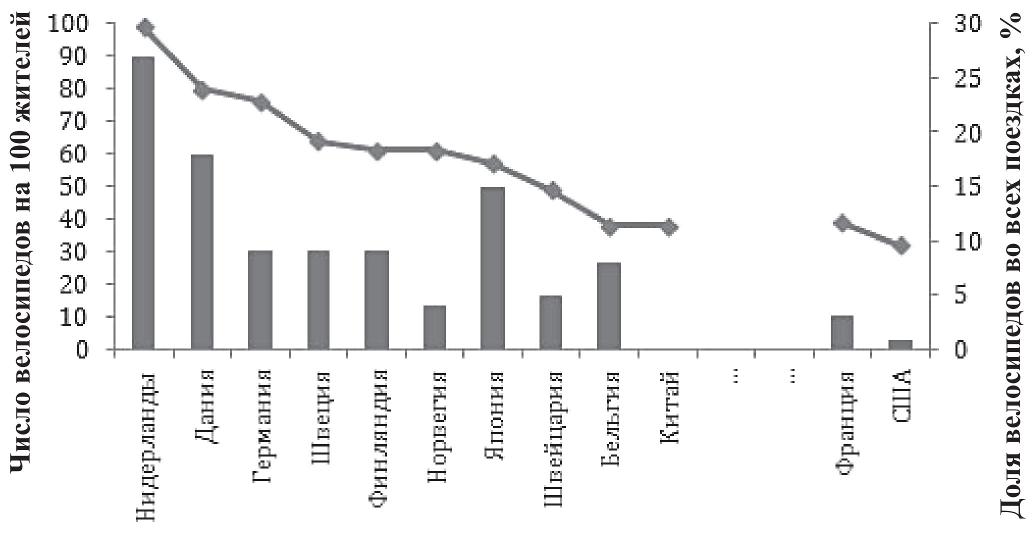


Рис. 4. Доля велосипедного транспорта в городских перемещениях

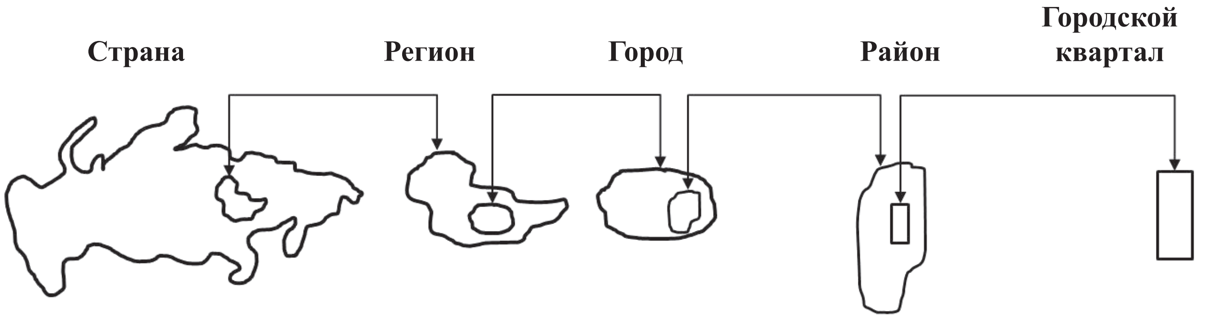
Для решения этой проблемы предлагается использовать показатель густоты сети с учетом количества транспортных средств, площади и численности транспортных средств, а также снижения размерности масштаба (рис. 5).

Поскольку до сих пор не проработана научная база, регламентирующая с различных сторон (социально-психологических, экологических, транспортных и др.) размеры транспортной составляющей (пешеходные, велосипедные, автомобильные дороги и парковочное пространство) в границах ГК, невозможно качественно определить эталонные значения предлагаемых показателей для сравнительной оценки, поэтому предлагаем рассмотреть формальный пример расчета экспериментальных сравнительных значений для предлагаемых показателей транспортной обеспеченности и этим обоснуем их работу.

Формальная разработка экспериментальных сравнительных значений для показателей транспортной обеспеченности городского квартала

Рассмотрим пример формирования сравнительных характеристик для прямоугольного ГК. Предлагается заложить следующие исходные условия. Минимальный и максимальный размер периметра ГК примем исходя из общемировой практики градостроительства от 316 м в таких городах, как Портленд, Хьюстон и Сакраменто, и до 2000 м – в разрабатываемом линейном городе [7]. Количество жителей предлагается ограничить величиной 6000 чел. как максимальную величину для ГК США [30]. Исходя из подходов транспортной доступности, пешеходные, велосипедные и автомобильные дороги должны располагаться по периметру ГК. Ширину пешеходной и велосипедной полосы примем согласно [23], ширину и количество автомобильных полос (проезжей части) – согласно [22]. Представим расчетные характеристики прямоугольного ГК, условные обозначения и расчетные формулы для определения экспериментально-сравнительных значений предлагаемых показателей транспортной обеспеченности в табл. 4.

Таким образом, если расчетное значение показателей транспортной обеспеченности выше или ровно сравнительному значению, то уровень транспортной доступности в рамках предлагаемых показателей соответствует норме. Если меньше сравнительного, требуются улучшения.



Страна	Регион	Город	Район	ГК
$d^{\text{С}}_{L_vN_v} = \frac{L_v}{N_v}$	$d^{\text{Р}}_{L_vN_v} = \frac{L_v}{N_v}$	$d^{\text{Г}}_{L_vN_v} = \frac{L_v}{N_v}$	$d^{\text{Р}}_{L_vN_v} = \frac{L_v}{N_v}$	$d^{\text{ГК}}_{L_vN_v} = \frac{L_v}{N_v}$
$d^{\text{С}}_{L_vSN_v} = \frac{L_v}{\sqrt[2]{SN_v}}$	$d_{L_vSN_v} = \frac{L_v}{\sqrt[2]{SN_v}}$	$d_{L_vSN_v} = \frac{L_v}{\sqrt[2]{SN_v}}$	$d_{L_vSN_v} = \frac{L_v}{\sqrt[2]{SN_v}}$	$d_{L_vSN_v} = \frac{L_v}{\sqrt[2]{SN_v}}$

Рис. 5. Применение показателей транспортной обеспеченности

ТАБЛИЦА 4. Расчет сравнительных значений показателей транспортной обеспеченности

Расчетная характеристика	Условное обозначение	Расчет сравнительного значения
Периметр городского квартала (без учета транспортных коммуникаций), м	П	300–2000
Количество жителей, чел.	Н	До 6000
Ширина пешеходный полосы, м	W_h	3
Ширина велосипедной полосы, м	W_b	2,2
Ширина проезжей части, м	W_a	3,5
Количество полос, шт.	–	3
Протяженность пешеходной полосы, м	L_H	П + 24
Протяженность велосипедной полосы, м	L_b	П + 42
Протяженность проезжей части, м	L_a	3 П + 196
Показатель густоты сети с учетом количества пешеходов	$d^{Э}_{L_pN_p}$	$d^{Э}_{L_pN_p} = \frac{П + 24}{H}$
Показатель густоты сети с учетом числа велосипедистов	$d^{Э}_{L_bN_b}$	$d^{Э}_{L_bN_b} = \frac{П + 42}{0,3H}$
Показатель густоты сети с учетом количества автомобильных ТРС	$d^{Э}_{L_aN_a}$	$d^{Э}_{L_aN_a} = \frac{3П + 196}{H}$
Показатель густоты сети с учетом площади городского квартала и количества пешеходов	$d^{Э}_{L_pSN_p}$	$d^{Э}_{L_pSN_p} = \frac{П + 24}{\sqrt[2]{SH}}$
Показатель густоты сети с учетом площади городского квартала и количества велосипедистов	$d^{Э}_{L_bSN_b}$	$d^{Э}_{L_bSN_b} = \frac{П + 42}{\sqrt[2]{S \cdot 0,3H}}$
Показатель густоты сети с учетом площади городского квартала и количества автомобильных ТРС	$d^{Э}_{L_aSN_a}$	$d^{Э}_{L_aSN_a} = \frac{3П + 196}{\sqrt[2]{S \cdot H}}$

Поясним на примере процедуру оценки транспортной обеспеченности ГК с использованием предложенных показателей.

Рассмотрим стандартный ГК планировочной структуры Нью-Йорка в районе Бруклина на пересечении улиц 5-я стрит, 4-я стрит, 8-я авеню, Проспект Парк Вест (рис. 6).

Рассматриваемый квартал имеет прямоугольную планировочную форму. Транспортная составляющая включает наличие пешеходных, велосипедных и автомобильных дорог. При этом пешеходные и автомобильные дороги располагаются по периметру ГК.

Планировочную структуру ГК зададим согласно [30], численность жителей, количество автомобилей и количество велосипедистов – согласно [28]. Параметры ГК представим в табл. 5.

Рассчитаем сравнительные показатели густоты сети с учетом количества транспортных средств и протяженности соответствующих коммуникаций:

$$d^{Э}_{L_pN_p} = \frac{П + 24}{H} = \frac{610 + 24}{5400} = 0,117 \text{, м/ед.;}$$

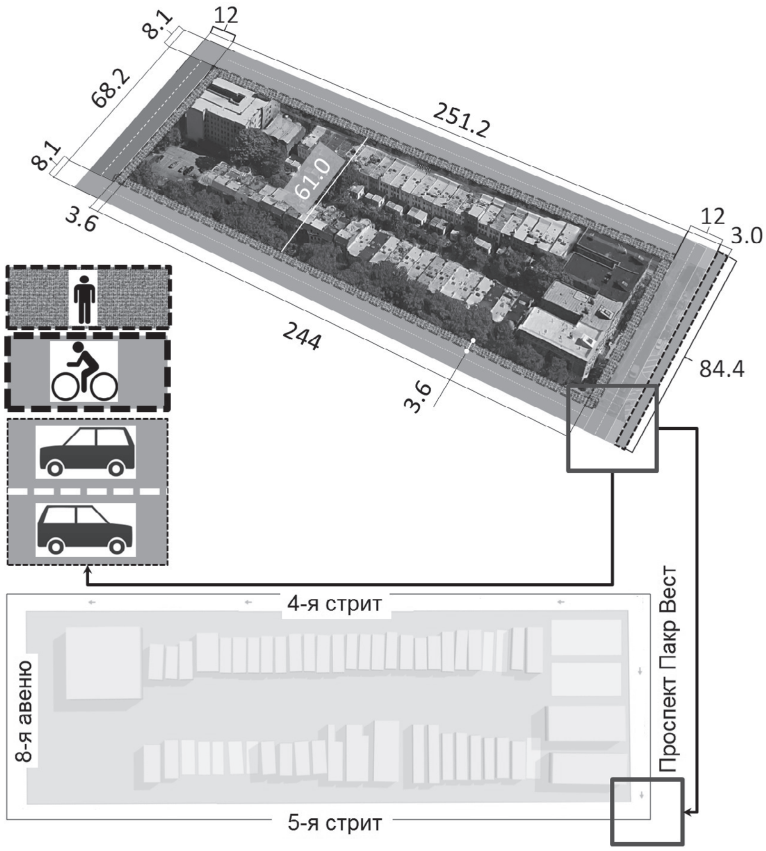


Рис. 6. Стандартный городской квартал, Бруклин, Нью-Йорк

ТАБЛИЦА 5. Параметры ГК

Характеристика городского квартала	Значение
Общая площадь, $S_о$, м^2	23 480,1
Периметр без учета транспортных коммуникаций П, м	610
Численность жителей H_p, чел.	5400
Численность автомобилей H_a, ед.	3078
Численность велосипедов H_b, ед.	1738
Эксплуатационная длина автомобильных дорог L_a, м	2013,6
Эксплуатационная длина велосипедных дорог L_b, м	168,8
Эксплуатационная длина пешеходных дорог L_p, м	624,4

$$d^{Э}_{L_b N_b} = \frac{П + 42}{0,3H} = \frac{610 + 42}{0,3 \cdot 5400} = 0,4 \text{, м/ед.;}$$

$$d^{Э}_{L_a N_a} = \frac{3П + 168}{H} = \frac{1830 + 168}{5400} = 0,375 \text{, м/ед.}$$

Рассчитаем сравнительные показатели густоты сети с учетом площади ГК, количества транспортных средств и протяженности соответствующих коммуникаций:

$$d^{Э}_{L_pSN_p}=\frac{П+24}{\sqrt[2]{SH}}=\frac{610+24}{\sqrt[2]{23480,1\cdot 5400}}=0,056;$$

$$d^{Э}_{L_bSN_b}=\frac{П+42}{\sqrt[2]{S\cdot 0,3H}}=$$
$$=\frac{610+42}{\sqrt[2]{23480,1\cdot 0,3\cdot 5400}}=0,1;$$

$$d^{Э}_{L_aSN_a}=\frac{3П+196}{\sqrt[2]{S\cdot H}}=\frac{1830+196}{\sqrt[2]{23480,1\cdot 5400}}=0,17.$$

Рассчитаем реальные показатели густоты сети с учетом количества транспортных средств и протяженности соответствующих коммуникаций:

$$d_{L_pH_p}=\frac{L_p}{H_p}=\frac{624,4}{5400}=0,12\text{, м/ед.;}$$

$$d_{L_bH_b}=\frac{L_b}{H_b}=\frac{168,8}{1738}=0,1\text{, м/ед.;}$$

$$d_{L_àH}=\frac{L_a}{H_a}=\frac{2013,6}{3078}=0,654\text{, м/ед.}$$

Рассчитаем реальные показатели густоты сети с учетом площади ГК, количества транспортных средств и протяженности соответствующих коммуникаций:

$$d_{L_pSH_p}=\frac{L_p}{\sqrt[2]{SH}_p}=\frac{624,4}{\sqrt{23408,1\cdot 5400}}=0,05;$$

$$d_{L_bSH_b}=\frac{L_b}{\sqrt[2]{SH}_b}=\frac{168,8}{\sqrt{23408,1\cdot 1738}}=0,026;$$

$$d_{L_aSH_a}=\frac{L_a}{\sqrt[2]{SH}_a}=\frac{2013,6}{\sqrt{23480,1\cdot 3078}}=0,24.$$

Сравним экспериментальные и реальные значения показателей (табл. 6).

Таким образом, транспортная обеспеченность ГК по предложенным показателям имеет наибольшее значение для автомобильного транспорта и наименьшее – для велосипедного, соответствует допустимым значениям – только для пешеходного и автомобильного транспорта.

ТАБЛИЦА 6. Сравнение экспериментальных и реальных показателей

Показатель	Сравнительное значение	Реальное значение	Вывод
Показатель густоты сети с учетом количества пешеходов	0,117	0,12	Соответствуют допустимому
Показатель густоты сети с учетом числа велосипедистов	0,4	0,1	Требуется улучшение
Показатель густоты сети с учетом количества автомобильных транспортных средств	0,375	0,654	Соответствуют допустимому
Показатель густоты сети с учетом площади городского квартала и количества пешеходов	0,056	0,05	Соответствуют допустимому
Показатель густоты сети с учетом площади городского квартала и количества велосипедистов	0,1	0,026	Требуется улучшение
Показатель густоты сети с учетом площади городского квартала и количества автомобильных транспортных средств	0,17	0,24	Соответствуют допустимому

Выводы

Впервые предложенные показатели позволяют оценивать транспортную обеспеченность в масштабах страны, регионального и городского развития при изменении площади территории, протяженности транспортной сети, численности населения и количества транспортных средств по видам транспорта, а в масштабах городского квартала – оценивать интегральную транспортную доступность. Данная группа показателей выгодно отличается от существующих, поскольку позволяет оценивать обеспеченность территории транспортными коммуникациями с учетом вида транспортных средств, следовательно, проводить сравнительный анализ в границах транспортной обеспеченности.

Однако отсутствие сравнительных значений предлагаемых показателей в масштабах района и городского квартала и качественных принципов их определения не позволяет в настоящее время использовать данные коэффициенты при оценке их транспортной доступности, что ставит новые научные задачи для таких научных направлений, как урбанистка и городская логистика.

Предложенный подход можно обобщить для оценки транспортной обеспеченности города в целом и включить в программные пакеты транспортного моделирования [10, 15].

Тенденции развития современных городов на принципах, изложенных в [11, 12, 21], свидетельствуют о росте разнообразия видов транспортных средств и транспортных коммуникаций, следовательно, актуальность предложенного анализа приобретает исключительный характер.

Библиографический список

1. Белый О.В. Проблемы построения и развития транспортных систем / О.В. Белый. – СПб. : Элмор, 2012. – 192 с.

2. Галабурда В.Г. Единая транспортная система: учеб. для вузов / В.Г. Галабурда, В.А. Персианов, А.А. Тимошин и др. ; под ред. В.Г. Галабурды. – М. : Транспорт, 1999. – 302 с.

3. Горев А.Э. Организация дорожного движения / А.Э. Горев, А.И. Солодкий, И.Н. Пугачев. – М. : Академия, 2013. – 240 с.

4. Дубов В.М. Проблематика сложных систем (концептуальные основы модельных представлений) / В.М. Дубов, Т.И. Капустянская, С.А. Попов, А.А. Шаров ; под общ. ред. С.А. Попова. – СПб. : Элмор, 2006. – 184 с.

5. Исследование рынка велосипедов в России. – URL : http://www.velomania.ru/2013/11/01/print:page,1, issledovanie_rynka_velosipedov_v_rossii_ch1.html.

6. Кокаев О.Г. О технологии анализа транспортных процессов в современных условиях хозяйствования / О.Г. Кокаев, О.Ю. Лукомская, С.А. Селиверстов // Транспорт РФ. – 2012. – № 2 (39). – С. 30–34.

7. Линейный город SkyWay в Абу-Даби. – URL : http://rsw-systems.com/assets/files/lineinii_gorog_v_abu_dabi.pdf.

8. Сафронов Э.А. Транспортные системы городов и регионов : учеб. пособие / Э.А. Сафронов. – М. : АСВ, 2005. – 272 с.

9. Селиверстов С.А. Методы и алгоритмы интеллектуального анализа процесса организации транспортной системы / С.А. Селиверстов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адм. С.О. Макарова. – 2014. – № 2 (24). С. 92–100.

10. Селиверстов С.А. Моделирование транспортных потоков мегаполиса с вводом новых видов водного внутригородского пассажирского транспорта / С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адм. С.О. Макарова. – 2015. – № 2 (30). – С. 69–80.

11. Селиверстов С.А. О методе оценки эффективности организации процесса дорожного движения мегаполиса / С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов // Вестн. транспорта Поволжья. – 2015. – № 2 (50). – С. 91–96.

12. Селиверстов С.А. О построении интеллектуальной системы организации и развития транспортной системы мегаполиса / С.А. Селиверстов, Я.А. Селиверстов // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2015. – Вып. 2/3 (217/222). – С. 139–161.

13. Селиверстов С. А. Основы теории бесконфликтного непрерывного транспортного процесса движения / С. А. Селиверстов, Я. А. Селиверстов // Науковедение. – 2014. – № 3. – С. 122.

14. Селиверстов Я. А. Использование правила резолюций в вопросно-ответной процедуре транспортного планировщика / Я. А. Селиверстов // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. Адм. С. О. Макарова. – 2013. – № 1 (20). – С. 145–152.

15. Селиверстов Я. А. Моделирование процессов распределения и развития транспортных потоков в мегаполисах / Я. А. Селиверстов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 1. – С. 43–50.

16. Селиверстов Я. А. О логико-алгебраическом представлении транспортно-логистического процесса / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – Вып. 200. – С. 57–68.

17. Селиверстов Я. А. О построении модели классификации межагентных отношений социально-экономического поведения городского населения в системах управления транспортными потоками мегаполиса / Я. А. Селиверстов // Науковедение. – 2014. – № 5. – С. 188.

18. Селиверстов Я. А. Основы теории субъективных функциональных возможностей рационального выбора / Я. А. Селиверстов // Науковедение. – 2014. – № 4. – С. 90.

19. Селиверстов Я. А. Особенности построения системы городского транспортно-логистического мониторинга / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов, А. Л. Стариченков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2015. – № 1. – С. 29–36.

20. Селиверстов Я. А. Построение моделей управления городскими транспортными потоками в условиях неопределенности внешней информационной среды / Я. А. Селиверстов, А. Л. Стариченков // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – Вып. 6 (210). – С. 81–94.

21. Селиверстов Я. А. Формальная аксиоматика теории функционального субъективного потребительского поведения / Я. А. Селиверстов, С. А. Селиверстов // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2014. – Вып. 4 (199). – С. 34–48.

22. СНиП 2.05.02-85* «Автомобильные дороги».

23. СНиП 2.07.01-89* «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений».

24. Ушаков С. С. Транспортная система мира / С. С. Ушаков ; под ред. С. С. Ушакова, Л. И. Василевского. – М. : Транспорт, 1971. – 216 с.

25. Федеральная служба государственной статистики. – URL : http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/transport.

26. CO_2 Emissions from fuel combustion. IEA statistics. Int. Energy Agency. – HIGHLIGHTS, 2014. – P. 138.

27. Denne T. Blueprint for a best practice measurement indicator set and benchmarking / T. Denne, R. Irvine, A. Schiff, C. Sweetman. – NZ Transp. Agency res. rep. 522, 2013. – 147 p.

28. Department of City Planning. – URL : nyc.gov/html/dcp/home.html.

29. International Road Traffic and Accident Database (IRTAD). – URL : http://www.internationaltransportforum.org/Irtadpublic/index.html.

30. Firley E. The Urban Housing Handbook / E. Firley, C. Stahl. – Hoboken, NJ : Wiley, 2009. – 328 p.

31. Litman T. Evaluating Accessibility for Transportation Planning. Measuring People’s Ability to Reach Desired Goods and Activities / T. Litman. – 2015. – 56 p.

32. Litman T. Measuring Transportation: Traffic, Mobility and Accessibility / T. Litman // ITE J. – 2003. – Vol. 73, N 10. – P. 28–32. – URL : www.vtpi.org / measure.pdf.

33. Zito P. Toward an urban transport sustainability index: an European comparison / P. Zito, G. Salvo // Eur. Transp. Res. Rev. – 2011. – N 3. – P. 179–195. DOI 10.1007 / s12544-011-0059-0.

References

1. Belyy O. V. Problemy postroyeniya i razvitiya transportnykh sistem [Problems in Building and Development of Transport Systems]. St. Petersburg, Elmor, 2012. 192 p.

2. Galaburda V. G., Persianov V. A., Timoshin A. A. et al. Yedinaya transportnaya sistema [Single Transport

System]. Coursebook for universities, ed. V. G. Galaburda. Moscow, Transport, 1999. 302 p.

3. Gorev A. E., Solodkiy A. I. & Pugachev I. N. Organizatsiya dorozhnogo dvizheniya [Road Traffic Organisation]. Moscow, Akademiya, 2013. 240 p.

4. Dubov V. M., Kapustyanskaya T. I., Popov S. A. & Sharov A. A. Problematika slozhnykh sistem (kontseptualnyye osnovy modelnykh predstavleniy) [Complex System Problematics (Conceptual Framework of Model Representations), ed. S. A. Popov. St. Petersburg, Elmor, 2006. 184 p.

5. Issledovaniye rynka velosipedov v Rossii [Study of the Russian Bicycle Market], available at: http://www.velomania.ru/2013/11/01/print: page,1, issledovanie_rynka_velosipedov_v_rossii_ch1.html.

6. Kokayev O. G., Lukomskaya O. Yu. & Seliverstov S. A. *Transport RF – Transport of the Russian Federation*, 2012, no. 2 (39), pp. 30-34.

7. Lineynyy gorod SkyWay v Abu-Dabi [SkyWay Linear City in Abu Dhabi], available at: http://rsw-systems.com/assets/files/lineinii_gorog_v_abu_dabi.pdf.

8. Safronov E. A. Transportnyye sistemy gorodov i regionov [Urban and Regional Transport Systems]. Study guide. Moscow, ASV, 2005. 272 p.

9. Seliverstov S. A. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni Admirala S. O. Makarova – Bull. Admiral Makarov State Univ. Maritime and Inland Shipping*, 2014, no. 2 (24), pp. 92-100.

10. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni Admirala S. O. Makarova – Bull. Admiral Makarov State Univ. Maritime and Inland Shipping*, 2015, no. 2 (30), pp. 69-80.

11. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Vestnik transporta Povolzhya – Volga Region Transport Bull.*, 2015, no. 2 (50), pp. 91-96.

12. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. – Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St Petersburg Polytechnic Univ. Informatics. Telecommunications. Management*, 2015, Is. 2/3 (217/222), pp. 139-161.

13. Seliverstov S. A. & Seliverstov Ya. A. *Naukovedeniye – Science Studies*, 2014, no. 3, pp. 122.

14. Seliverstov Ya. A. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni Admirala S. O. Makarova – Bull. Admiral Makarov State Univ. Maritime and Inland Shipping*, 2013, no. 1 (20), pp. 145-152.

15. Seliverstov Ya. A. *Izvestiya SPbGETU "LETI" – Bull. St. Petersburg Electrotechnical Univ. "LETI"*, 2013, no. 1, pp. 43-50.

16. Seliverstov Ya. A. & Seliverstov S. A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. – Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic Univ. Informatics. Telecommunications. Management*, 2014, Is. 200, pp. 57-68.

17. Seliverstov Ya. A. *Naukovedeniye – Science Studies*, 2014, no. 5, pp. 188.

18. Seliverstov Ya. A. *Naukovedeniye – Science Studies*, 2014, no. 4, pp. 90.

19. Seliverstov Ya. A., Seliverstov S. A. & Starichenkov A. L. *Izvestiya SPbGETU "LETI" – Bull. St. Petersburg Electrotechnical Univ. "LETI"*, 2015, no. 1, pp. 29-36.

20. Seliverstov Ya. A. & Starichenkov A. L. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. – Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic Univ. Informatics. Telecommunications. Management*, 2014, Is. 6 (210), pp. 81-94.

21. Seliverstov Ya. A. & Seliverstov S. A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskiye nauki – Sci. and Tech. Rep. of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic Univ.*, 2014, Is. 4 (199), pp. 34-48.

22. SNiP 2.05.02-85* Avtomobilnyye dorogi [Motorways].

23. SNiP 2.07.01-89* Gradostroitelstvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i selskikh poseleniy [Urban Planning. Designing and Building Urban and Rural Settlements].

24. Ushakov S. S. Transportnaya sistema mira [World Transport System], ed. S. S. Ushakov, L. I. Vasilevskiy. Moscow, Transport, 1971. 216 p.

25. Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki [Federal Service for State Statistics], available at: http://wwwgks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/transport.

26. CO_2 Emissions from fuel combustion. IEA statistics. Int. Energy Agency. HIGHLIGHTS, 2014. P. 138.

27. Denne T., Irvine R., Schiff A. & Sweetman C. Blueprint for a best practice measurement indicator set and benchmarking. NZ Transp. Agency res. rep. 522, 2013. 147 p.

28. Department of City Planning, available at: nyc.gov/html/dcp/home.html.

29. International Road Traffic and Accident Database (IRTAD), available at: http://www.internationaltransportforum.org/Irtadpublic/index.html.

30. Firley E. & Stahl C. The Urban Housing Handbook. Hoboken, NJ, Wiley, 2009. 328 p.

31. Litman T. Evaluating Accessibility for Transportation Planning. Measuring People's Ability to Reach Desired Goods and Activities. 2015. 56 p.

32. Litman T. Measuring Transportation: Traffic, Mobility and Accessibility. *ITE J.*, 2003, Vol. 73, no. 10, pp. 28–32, available at: www.vtpi.org/measure.pdf.

33. Zito P. & Salvo G. Toward an urban transport sustainability index: an European comparison. *Eur. Transp. Res. Rev.*, 2011, no. 3, pp. 179-195. DOI 10.1007/s12544-011-0059-0.

СЕЛИВЕРСТОВ Святослав Александрович – научный сотрудник, amuanator@rambler.ru (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук).

УДК 656.21.001.2

Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко

ПРИМЕР РАСЧЁТА ВРЕМЕНИ И СКОРОСТИ ВАГОНА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ ПО ВСЕЙ ДЛИНЕ УЧАСТКА ПЕРВОЙ ТОРМОЗНОЙ ПОЗИЦИИ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВСТРЕЧНОГО ВЕТРА МАЛОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Дата поступления: 29.09.2015
Решение о публикации: 17.11.2015

Цель: Вычислить ускорение вагона, найти время движения и скорость вагона при воздействии встречного ветра. **Метод:** Вычисление искомых величин основано на принципе Даламбера и широко известных из курса элементарной физики формулы скорости и пути при равноускоренном движении тела. **Результаты:** Исследования, основанные на силовых соотношениях, которые имеют место на участке первой тормозной позиции горки при воздействии встречного ветра малой величины, позволили получить конкретное значение ускорения вагона при различных видах сопротивления движению вагона. По заданной величине скорости входа вагона на участок первой тормозной позиции (начальной скорости) и вычисленному значению ускорения вагона рассчитано время движения и скорость вагона по всей длине рассматриваемого участка. Построены графические зависимости времени движения от длины исследуемого участка горки и скорости скатывания вагона от времени. **Практическая значимость:** По результатам исследований можно разработать программу расчётов ускорения, времени движения и скорости скатывания вагона при воздействии ветров разных направлений, которые позволяют выполнить расчёт и проект всей сортировочной горки.

Сортировочная горка, вагон, встречный ветер, упрощённая методика, движение вагона, ускорение, первая тормозная позиция.

***Khabibulla T. Turanov**, D. Eng., professor, khturanov@yandex.ru; **Andrey A. Gordiyenko**, teaching assistant, gordiii89@yandex.ru (Ural State University of Railway Transport) EXAMPLE OF CALCULATION OF TIME AND SPEED OF A CAR DURING ITS MOVEMENT ALONG THE ENTIRE LENGTH OF THE FIRST PORTION OF THE BRAKING POSITION OF THE MARSHALLING HUMP UNDER THE INFLUENCE OF A SMALL-SIZED CROSS WIND

Objective: To calculate acceleration of a carriage, to find movement time and carriage speed under the influence of cross wind. **Methods:** Calculation of the sought values is based on d’Alembert’s principle and on formulae of speed and path progression under uniform acceleration, widely known from an elementary course of physics. **Results:** Studies based on force correlations occurring on a section of the first portion of braking position of a marshalling hump under the influence of small-sized cross wind allowed to obtain concrete values of carriage acceleration under different types of resistance to carriage movement. Movement time and speed of the carriage along the entire length of the section under study were calculated from the set value of carriage speed when entering the section of the first portion of the braking position (initial speed) and from calculated carriage acceleration values. Curves for dependencies of movement time from the length of studied hump section, and speed of carriage rolling from time. **Practical importance:** Results of the study may allow to develop a program for calculation of acceleration, movement time and carriage rolling speed under the influence of winds from different directions, allowing calculation and design of the entire length of the marshalling hump.

Marshalling hump, carriage, cross wind, simplified techniques, time and speed of the carriage, acceleration, first portion of the braking position.

Отметим, что результаты ранее выполненных исследований по динамике скатывания вагона по профилю сортировочной горки оказались ошибочными [1]. Учитывая это, в [2, 3] подробно изложен упрощённый метод построения математической модели движения вагона с ускорением на участке первой тормозной позиции (1ТП) при воздействии встречного ветра малой величины. Причём движение вагона по всей длине участка 1ТП горки (т. е. при движении «на проход») в [3] отнесено к первому этапу движения вагона (общий случай) на этом участке, а движение вагона с затормаживанием [2] – ко второму этапу.

Для практического использования актуальны результаты вычислительных экспериментов (или конкретный пример расчёта) по определению времени и скорости вагона при его движении по всей длине участка 1ТП горки, т. е. «на проход».

В данной статье на основе ранее разработанной математической модели [3] впервые приведены результаты вычислительных экспериментов по расчёту времени и скорости вагона при его движении по всей длине участка 1ТП горки при воздействии встречного ветра. Она является продолжением серии статей [1–4] по динамике скатывания вагона с сортировочной горки, базирующихся на принципе Даламбера в координатной форме [5].

Цель статьи – на основе силовых соотношений, которые возникают при движении вагона по всей длине участка 1ТП сортировочной горки («на проход») при воздействии встречного ветра малой величины, вычислить ускорения вагона на данном участке горки.

Требуется получить конкретный пример расчёта времени и скорости вагона при его движении по всей длине участка 1ТП горки по упрощённой методике, где по известной величине всей длины 1ТП горки $l_{1тп} = x(t_{тп})$ можно было бы найти время $t_{тп}$, в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью до конца рассматриваемого участка горки, а по величине времени $t_{тп}$ – скорость вагона $v(t_{тп})$.

Общий подход к решению задачи при движении вагона по всей длине участка 1ТП горки

При решении задач использованы основной принцип Даламбера в координатной форме [5] и классические формулы пути и скорости тела элементарной физики.

В условиях задачи и принятых предпосылках рассмотрен случай, когда вагон по уклону сортировочной горки входит на участок 1ТП горки с заданной начальной скоростью $v_0 = v_{01тп}$ (согласно расчётным данным предыдущих участков горки с учётом воздействия только сопротивления среды $F_с$ и при одновременном воздействии сопротивления среды $F_с$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rвy}$) [2, 3]. При входе одиночного вагона на 1ТП горки считаем, что вагон будет испытывать воздействие в основном внешних сил в виде силы тяжести вагона с грузом, силы аэродинамического сопротивления встречного ветра малой величины как вдоль вагона $F_{rвx}$, так и поперёк него $F_{rвy}$, а также силы трения качения колёс о поверхность катания рельсовых нитей $F_{тр.к}$ и трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр.ск}$. Причём сила трения скольжения $F_{тр.ск}$ появляется из-за воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rвy}$.

При формировании расчётной модели движения вагона по всей длине участка 1ТП горки принято предположение, что колёсные пары по рельсовым нитям катятся при чистом качении колёс относительно поверхности катания рельсовых нитей $F_{тр.к}$ и трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити $F_{тр.ск}$ при учёте воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву} = F_{rбу}$, т. е. $F_{тр.x} = F_{\tau} = F_{тр.к} + F_{тр.ск}$.

Пусть в соответствии с этим расчётная модель движения вагона на участке 1ТП горки, согласно принципу освобождаемости от связей теоретической механики [5], имеет вид, представленный на рис. 1.

На рис. 1 обозначено: ψ_{03} – угол наклона участка 1ТП горки; $\overline{v}_0 = \overline{v}_{в.x}$ – скорость входа вагона на рассматриваемый участок; $\overline{v}_{rв.x}$ – относительная скорость встречного ветра малой величины (обычно в пределах 4–6 м/с); $\overline{v} = \overline{v}_в$ – переносная скорость (скорость вагона); G, G_{x1} и G_z – сила тяжести вагона с грузом и её проекции на ось Ox_1 и Oz; $F_{rвx}$ – сила аэродинамического сопротивления, рассматриваемая как «удерживающая» сила встречного ветра; $F_с = F_{ср}$ – силы сопротивления среды; N и $F_{тр.x}$ – нормальная и касательная составляющая реакции связей (рельсовых нитей) с учетом, что сила $F_{тр.x}$ направлена по оси Ox_1. Причём $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ и $F_{тр.x} = F_{тр.x1} + F_{тр.x2} + F_{тр.x3} + F_{тр.x4}$ как параллельные силы. Отметим, что на рис. 1 не показано направление воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву} = F_{rбу}$.

Таким образом, используя основной принцип Даламбера и широко известные из курса элементарной физики формулы скорости и пути при равноускоренном движении тела по известной величине всей длины 1ТП горки $l_{1тп} = x(t_{тп})$, определено время $t_{тп}$, в течение которого вагон движется с заданной начальной скоростью до конца рассматриваемого участка горки, а по величине времени $t_{тп}$ – скорость вагона $v(t_{тп})$.

Упрощённая методика расчёта времени и скорости вагона при его движении по всей длине участка 1ТП горки

Упрощённую методику расчёта скорости вагона по всей длине участка 1ТП сортировочной горки при воздействии встречного ветра применяют аналогично [7] в такой последовательности.

1. При проектировании сортировочной горки полную длину участка 1ТП горки $l_{1тп}$ принимают согласно рекомендациям [6]. Например, уклон горки 14‰, $\psi_{03} = 0{,}014$ рад. (sin $(\psi_{03}) = 0{,}014$), длина $l_{1тп} = 29$ м.

2. Рассчитывают проекции силы воздействия встречного ветра на вагон $F_{rв}$, например, юго-восточного направления, по продольной Ox и поперечной Oy_1 оси (на рис. 1 ось Oy_1 не показана) в виде, кН:

$$F_{rвx} = 0{,}5A_т;\;\; F_{rвб} = 0{,}5A_б, \qquad (1)$$

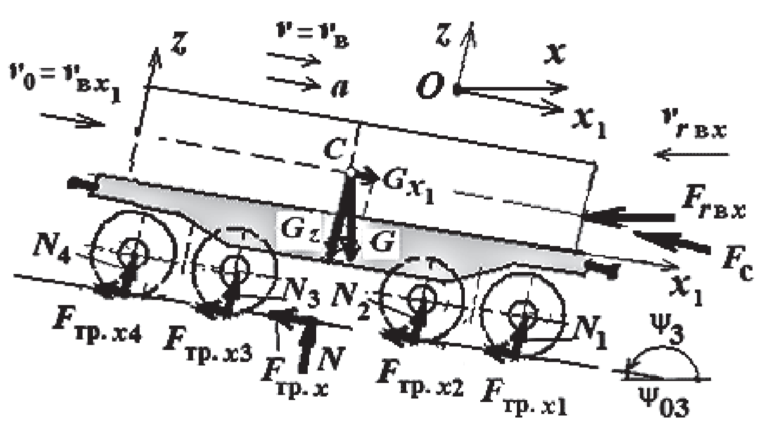


Рис. 1. Упрощённая расчётная модель движения вагона по профилю 1ТП горки при встречном ветре

где 0,5 – удельное давление на 1 м^2 площади, кН/м^2 [7]; $A_т$ – площадь торцевой поверхности вагона с грузом, м^2; $A_б$ – площадь боковой поверхности вагона с грузом, м^2. Например, если $A_т$ = 6,384 и $A_б$ = 27,36 м^2, то $F_{rв.x}$ = 3,192 и $F_{rв.y}$ = 13,68 кН.

3. Вычисляют силу трения качения $F_{тр.к}$ от проекции силы тяжести вагона с грузом G_z и силы сопротивления встречного ветра $F_{rв.x}$ на направление оси Oz (см. рис. 1) как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) $F_τ$, которая согласно закону Кулона равна (см. (2) [3])

$$F_{тр.к} = f_0(G\cos(\psi 03) + F_{rвx}\sin(\psi 03)), \quad (2)$$

где f_0 – некоторый приведённый коэффициент трения качения, учитывающий количество колёс в тележках, трения качения по кольцам подшипника и колеса по рельсу (обычно принимают f_0 = 0,0001) [2–4]. Например, если f_0 = 0,0001, G = 538 кН – сила тяжести вагона с грузом с учётом инерции вращающихся масс (колёсных пар) (без учёта этой инерции G = = 280 кН, т.е. груз легковесный), cos(ψ_{03}) = 1, $F_{rв.x}$ = 3,192 кН, sin (ψ_{03}) = 0,014, то $F_{тр.x1}$ = = $F_{тр.к}$ = 0,056 кН.

4. Вычисляют силу трения скольжения $F_{тр.ск}$ как касательную составляющую реакции связи (рельсовых нитей) $F_τ$, которая согласно закону Кулона равна (см. (2) [3])

$$F_{трб.x1} = F_{тр.ск} = f_{ск0}F_{rвy} = f_{ск0}F_{rбy}, \quad (3)$$

где $f_{ск0}$ – коэффициент трения скольжения гребней колёс о боковую поверхность рельсовой нити (обычно принимают $f_{ск0}$ = 0,25). Например, если $f_{ск0}$ = 0,25, $F_{rв.y}$ = $F_{rбy}$ = 13,68 кН, то $F_{трб.x1}$ = $F_{тр.ск}$ = 3,42 кН.

5. С учётом (2) и (3) вычисляют силу трения вдоль движения вагона как сумму сил трения качения $F_{тр.к}$ и сил трения скольжения $F_{тр.ск}$ при учёте воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rв.y}$ в виде

$$F_{тр.x1} = F_τ = F_{тр.к} + F_{тр.ск}. \quad (4)$$

Например, если $F_{тр.к}$ = 0,054, $F_{тр.ск}$ = 3,42 кН, то $F_{тр.x1}$ = 3,476 кН.

6. Находят силы сопротивления движению вагона от среды $F_с$ = $F_{ср}$ в виде (см. (3) [7])

$$F_{ср} = k_{ср}G, \quad (5)$$

где $k_{ср}$ – коэффициент, учитывающий долю силы тяжести G при учёте сопротивления среды (обычно в пределах 0,0005–0,00011 при скорости встречного ветра от 4 до 6 м/с [8]. Например, если $k_{ср}$ = 0,0008 и G = 908 кН, то $F_{ср}$ = 0,726 кН.

7. Вычисляют все силы, воздействующие на скатывающийся вагон при воздействии встречного ветра постоянной величины, кН:

• «сдвигающие» силы $F_{сд.x1}$

$$F_{сд.x1} = G\sin(\psi_{03}). \quad (6)$$

Например, если G = 538 кН; sin (ψ_{03}) = = 0,014, то $F_{сд.x1}$ = 7,532 кН;

• «удерживающие» силы $F_{уд.x1}$ (т.е. силы сопротивления движению вагона в виде силы трения скольжения), как бы препятствующие движению вагона на участке 1ТП горки, в виде (см. (5) [3])

$$F_{уд.x1} = F_{rвx} + F_{тр.x1} + F_{ср}. \quad (7)$$

Например, если $F_{rв.x}$ = 3,192 кН; $F_{тр.x1}$ = = 0,056 кН (по (2)); $F_{ср.}$ = 0,726 кН, то $F_{уд.x1}$ = = 3,678 кН, а при учёте проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rв.y}$ = = 13,68 кН, $F_{трб.x1}$ = $F_{трб.к}$ = 3,42 кН (по (3)), $F_{уд0.x1}$ = 7,098 кН.

8. По величине «сдвигающей» $F_{сд.x1}$ и «удерживающей» $F_{уд.x1}$ сил вычисляют силу $F_{1тп}$, способствующую движению вагона на рассматриваемом участке 1ТП горки, кН (см. (6) [3]):

$$F_{1тп} = F_{сд.x1} - F_{уд.x1}. \quad (8)$$

Например, если $F_{сд.x1}$ = 7,532 кН; $F_{уд.x1}$ = = 3,678 кН, то $F_{3\,тп}$ = 3,854 кН – сила, при воздействии которой происходит движение вагона с ускорением по всей длине участка 1ТП горки при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$, а при одновременном воздействии сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву}$ – $F_{уд0.x1}$ = 7,098 кН, то $F_{01тп}$ = 0,434 кН.

9. Используя (6) и (7), находят условие движения вагона на рассматриваемом участке 1ТП горки в виде [4]:

$$F_{сд.x1} > F_{уд.x1}. \tag{9}$$

10. По значению силы $F_{1тп}$ и массы вагона M с учётом инерции вращающихся частей находят ускорение вагона $a_{1тп}$ при движении на рассматриваемом участке горки с ускорением, м/с^2 (см. (8) [3]):

$$a_{1тп} = \frac{F_{1тп}}{M}. \tag{10}$$

Например, если $M = 5{,}484 \cdot 10^4$ кг – масса вагона с грузом с учётом инерции вращающихся частей вагона и $F_{1тп}$ = 3,678 кН, то ускорение вагона, при котором происходит ускоренное движение при воздействии только сопротивления среды, $F_{ср}$ – $a_{1тп}$ = 0,07 м/с^2 (если учесть одновременное воздействие сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву}$, то при $F_{01тп}$ = 0,434 кН – $a_{1тп}$ = 0,0079 м/с^2).

11. Вычисляют время $t_{1тп}$ в с, в течение которого вагон движется прямолинейно равноускоренно, на данном участке 1ТП горки длиной $l_{1\,тп}$, м:

$$t_{1тп} = \frac{-v_{01тп} + \sqrt{v_{01тп}^2 + 2a_{1тп}l_{1тп}}}{a_{1тп}}, \tag{11}$$

где $v_{01тп}$ – начальная скорость вагона, м/с (скорость входа вагона на участок 1ТП горки при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$, например, 6,833 м/с, а при одновременном воздействии сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву}$ – 6,44 м/с).

Например, если $v_{01тп}$ = 6,833 м/с, $a_{1тп}$ = = 0,07 м/с^2, $l_{1тп}$ = 29 м, то время $t_{1тп}$, в течение которого происходит скатывание вагона на рассматриваемом участке горки при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$, $t_{1тп}$ = 4,706 с, а при одновременном воздействии сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву}$ – $t_{01тп}$ = 4,525 с.

При необходимости, изменяя длину данного участка горки $l_{1тп}$, находят графическую зависимость t ($l_{1тп}$).

12. Определяют скорость вагона в конце 1ТП горки при отключенном вагонном замедлителе $v_{1тп}$ по классической формуле элементарной физики, м/с:

$$v_e(t_{1тп}) = v_{01тп} + a_{1тп}t_{1тп}. \tag{12}$$

Например, для заданных исходных данных: $v_{01тп}$ = 6,833 м/с, $l_{1тп}$ = 29 м, $a_{1тп}$ = 0,07 м/с^2, $t_{1тп}$ = 4,436 с скорость вагона в конце участка 1ТП горки v ($t_{1тп}$) = 7,145 м/с или 25,7 км/ч при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$ (при одновременном воздействии сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{rву}$ – $a_{1тп}$ = = 0,057 м/с^2, $t_{1тп}$ = 4,813 с, $v(t_{1тп})$ = 6,46 м/с, или 23,26 км/ч).

Пример расчёта времени и скорости вагона при его движении по всей длине участка 1ТП горки

Пусть исходными данными будут: $v_{01тп}$ = = 6,833 – начальная скорость вагона (скорость входа вагона на участок 1ТП горки), м/с; $l_т$ = 31,0 – длина участка 1ТП горки с учётом длины входа на данный участок (2 м), м; $M = 5{,}484 \cdot 10^4$ – масса вагона с грузом с учётом инерции вращающихся деталей (колёсных пар), кг; F_{01} = 3,854 кН – сила, при воздействии которой вагон движется на участке 1ТП горки с ускорением; $a_{1тп}$ = 0,07 м/с^2 – ускорение вагона; $t_{1тп}$ = 4,436 с – время движения вагона; скорость вагона в конце участка 1ТП горки $v(t_{1тп})$ = 7,145 м/с, или 25,7 км/ч, без учёта воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона (при учёте воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $v_{01тп1}$ = 6,44 м/с; $a_{01тп}$ = = 0,0079 м/с^2, $t_{01тп}$ = 4,813 с, $v(t_{01тп})$ = 6,46 м/с, или 23,2 км/ч).

Ниже приведён макет-документ, полученный в программе MathCAD [9].

Для примера покажем графические зависимости времени движения от пройдённого пути вагона по всей длине участка 1ТП горки и скорости вагона в любой момент времени t (рис. 2, 3).

• l1тп: = 0,1–29 – изменение пути прохождения вагона l на всей длине участка 1ТП сортировочной горки, м.

– время движения вагона $t_{1тп}$ ($l_{1тп}$) при вариации всей длины участка 1ТП сортировочной горки l при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$, вычисленное по (11), с;

– время движения вагона $t_{1тп}(l_{1тп})$ при вариации всей длины участка 1ТП сортировочной горки l при одновременном воздействии сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{гву} = F_{гбу}$, также вычисленное по (11), с;

• t: = 0, 0,1–5 – изменение времени движения вагона t по всей длине участка 1ТП сортировочной горки, с;

• ve1тп: = v01тп + a1тп·t – скорость вагона $v(t)$ в любой момент времени t по всей длине участка 1ТП сортировочной горки при воздействии только сопротивления среды $F_{ср}$, вычисленное по (12), м/с;

• ve01тп: = v01тп1 + a01тп·t – скорость вагона $v(t)$ в любой момент времени t по всей длине участка 1ТП сортировочной горки при одновременном воздействии сопротивления среды $F_{ср}$ и проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{гву} = F_{гбу}$, также вычисленное по (12), м/с.

Анализ графических зависимостей $v(t)$ показывает, что в течение времени t = 4,668 с его скорость (см. рис. 3) уменьшается незначительно при учёте воздействия проекции встречного ветра с боковой стороны вагона $F_{гву} = F_{гбу}$ – с 7,145 (≈ 25,7 км/ч) до 6,46 м/с (≈ 23,2 км/ч). При этом вагон пройдёт расстояние 29,0 м (это принятая длина участка

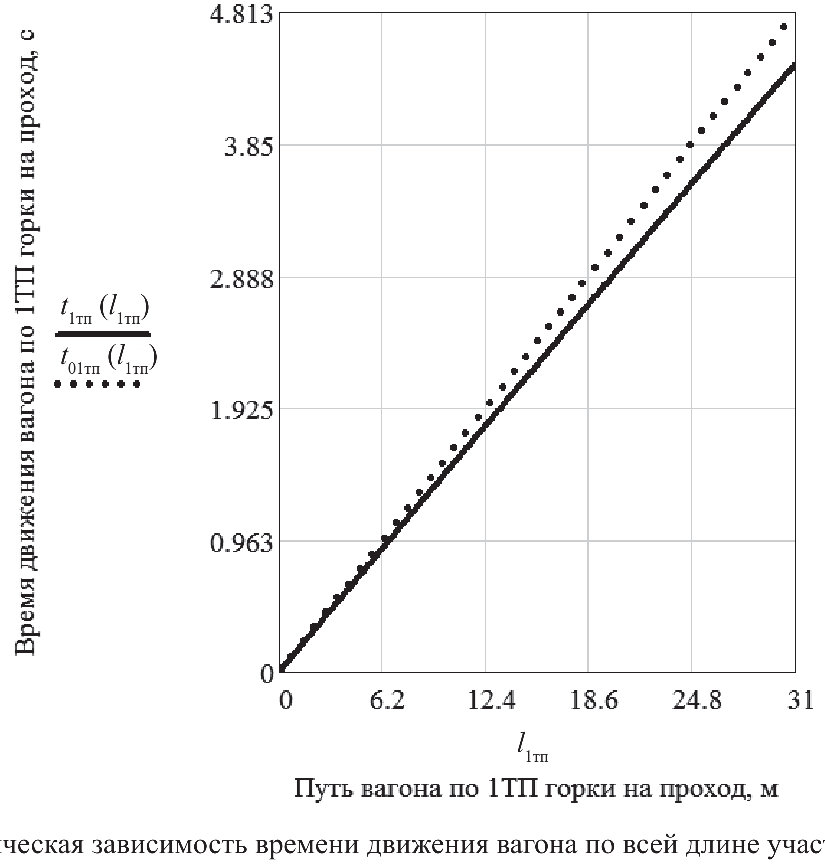


Рис. 2. Графическая зависимость времени движения вагона по всей длине участка 1ТП горки

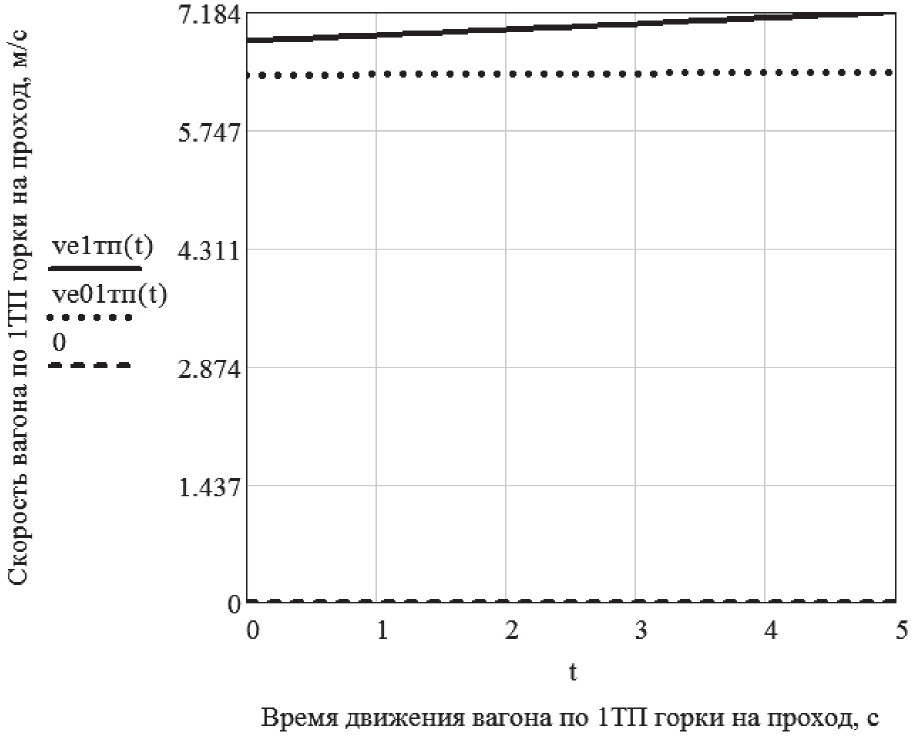


Рис. 3. Графическая зависимость скорости вагона при движении по всей длине участка 1ТП горки

1ТП горки), поэтому при выполнении практических расчётов воздействием проекции встречного ветра с боковой стороны вагона можно пренебречь.

Выводы

Силовые соотношения, имеющее место при движении вагона по всей длине участка 1ТП сортировочной горки, дали возможность вычислить ускорения вагона на данном участке горки.

Расчёты по упрощённой методике позволили по известной величине пройдённого расстояния вагона по всей длине участка 1ТП горки («на проход») $l_{1тп}$ и вычисленной величине ускорения вагона $a_{01тп}$ рассчитать конкретное значение времени движения вагона $t_{1тп}$, в течение которого вагон будет равноускоренно двигаться на данном участке горки. Величина $t_{1тп}$ дала возможность найти скорость вагона в конце рассматриваемого участка $v_{1тп}(t_{1тп})$.

Результаты исследований можно использовать для расчета и проектирования промежуточного участка сортировочной горки.

Библиографический список

1. Земблинов С. В. Альбом схем элементов станций и узлов / С. В. Земблинов, И. И. Страковский. – М. : Всесоюз. изд.-полиграфич. объединение МПС, 1963. – 89 с.

2. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0 / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.

3. Лойцянский Л. Г. Курс теоретической механики. Т. II. Динамика / Л. Г. Лойцянский, А. И. Лурье. – М. : Наука, 1983. – 640 с.

4. Образцов В. Н. Станции и узлы. Ч. II / В. Н. Образцов. – М. : Трансжелдориздат, 1938. – 492 с.

5. Приложение 3 к СМГС «Технические условия размещения и крепления грузов». – URL : http://osjd.org/doco/public/ru.

6. Туранов Х. Т. Исследование движения вагона с замедлением на участке первой горочной тормозной позиции при воздействии встречного ветра / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2015. – № 5. – С. 3–6.

7. Туранов Х. Т. Математические модели движения вагона по всей длине участка первой горочной тормозной позиции сортировочной горки при воздействии встречного ветра / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Транспорт : наука, техника, управление. – 2015. – № 8. – С. 44–47.

8. Туранов Х. Т. Некоторые проблемы теоретической предпосылки динамики скатывания вагона по уклону сортировочной горки / Х. Т. Туранов, А. А. Гордиенко // Бюл. транспортной информации. – 2015. – № 3 (237). С. 29–36.

9. Turanov K. Analitical Determination of Conditions of Wagon Rolling Doun Marshslling Hump Profiles / K. Turanov, A. Gordiienko // Open Acces Library J. – 2015 – N 2, e1912. – P. 1–11. – DOI : http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912.

References

1. Zemblinov S. V. & Strakovskiy I. I. Albom skhem elementov stantsiy i uzlov [Album of Schemes of Station and Junction Elements]. Moscow, Vsesoyuznoye izdatelsko-poligraficheskoye obyedineniye MPS, 1963. 89 p.

2. Kiryanov D. V. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. St. Petersburg, BVKh-Peterburg, 2012. 432 p.

3. Loytsyanskiy L. G. & Lurye A. I. Kurs teoreticheskoy mekhaniki [Theoretical Mechanics Course]. Vol. II. Dynamics. Moscow, Nauka, 1983. 640 p.

4. Obraztsov V. N. Stantsii i uzly [Stations and Junctions]. Pt. II. Moscow, Transzheldorizdat, 1938. 492 p.

5. Appendix 3 to Agreeement on International Railway Freight Traffic, "Technical Conditions for Cargo Positioning and Fastening", available at: http://osjd.org/doco/public/ru.

6. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transp.: Sci., Eng., Manage.*, 2015, no. 5, pp. 3-6.

7. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transp.: Sci., Eng., Manage.*, 2015, no. 8, pp. 44-47.

8. Turanov Kh. T. & Gordiyenko A. A. *Byulleten transportnoy informatsii – Transp. inf. bull.*, 2015, no. 3 (237), pp. 29-36.

9. Turanov Kh. & Gordiienko A. *Open Acces Library J.*, 2015, no. 2, e1912, pp. 1–11; DOI http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1101912.

*ТУРАНОВ Хабибулла Туранович – докт. техн. наук, профессор, khturanov@yandex.ru; ГОРДИЕНКО Андрей Александрович – ассистент, gordiii89@yandex.ru (Уральский государственный университет путей сообщения).

УДК 656.2.08

А. В. Швецов

ТРАНСПОРТНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МЕТРОПОЛИТЕНА

Дата поступления: 14.09.2015
Решение о публикации: 16.11.2015

Цель: Рассмотреть вопросы организации транспортной безопасности на станциях метрополитена. Определить направления решения выявленных проблем в обеспечении транспортной безопасности на метрополитене. **Методы:** Использовались аналитические методы, сопоставление, сравнительный анализ. **Результаты:** Приведены данные по оснащению метрополитенов инженерно-техническими средствами и системами обеспечения транспортной безопасности. Изучены возможности внедряемых на метрополитенах инженерно-технических средств и систем обеспечения транспортной безопасности. Приведены данные по перспективным исследованиям, направленным на создание принципиально новых систем безопасности, которые бы создали непреодолимый рубеж на пути террористов, проносящих взрывные устройства в метро. Проанализированы проблемы в реализуемых и планируемых мероприятиях, направленных на выполнение требований по обеспечению транспортной безопасности на метрополитене. Выявлено, что в настоящий момент отсутствуют методики по выбору места размещения зон досмотра, учитывающие взрывоопасность зоны досмотра, а также технологии, обеспечивающие 100%-ный досмотр пассажиропотока на предмет наличия взрывчатых веществ, взрывных устройств без металлической оболочки и взрывных устройств, не начиненных металлическими поражающими элементами. Сформулированы практические рекомендации по организации системы досмотра на станциях метрополитена, в том числе по выбору места размещения зон досмотра, учитывающих их взрывоопасность. **Практическая значимость:** Реализация рекомендаций позволит повысить уровень обеспечения транспортной безопасности на метрополитене. Внедрение методических рекомендаций в практическую деятельность по обеспечению транспортной безопасности позволит при взрыве взрывного устройства в зоне досмотра, значительно снизить последствия теракта.

Метрополитен, транспортная безопасность, террористический акт, зона досмотра, взрывное устройство.

Aleksey V. Shvetsov, postgraduate student, techzdservis@mail.ru (Far Eastern State Transport University)
UNDERGROUND RAILWAY TRANSPORT SAFETY

Objective: To consider the issues of transport safety organisation at underground railway stations. To determine the directions for solving the issues identified in ensuring transport safety on the underground railways. **Methods:** Analytical methods, juxtaposition and comparative analysis were used. **Results:** Data on equipping underground railway systems with engineered features and systems for ensuring transport safety is provided. Possibilities of engineering features and systems for ensuring transport safety that are being introduced on the underground railway systems are studied. Data on long-term studies aimed at creating conceptually new security systems capable of creating unsurmountable barriers in the path of terrorists attempting to bring explosive devices to the underground railways is provided. Issues in measures aimed at ensuring fulfillment of demands for ensuring transport safety on the underground rail systems, both planned and already undertaken, were analysed. It was established that at the moment, methods for choosing the location of inspection zones that take explosion hazards into account do not exist, and neither do technologies that ensure total inspection of passenger flow for presence of exposives, explosive devices without metallic shell or explosive devices that are not stuffed with metallic projectiles.

Practical recommendations for organisation of inspection system at underground railway station are formulated, including for choosing the location of inspection zones that take explosion hazards into account. **Practical importance:** Realisation of recommendations in the paper will allow to increase transport safety on the underground railways. Introducing best practices into practical activity on ensuring transport safety will allow for significant reduction of consequences of terror attack in case an explosion occurs in inspection zone.

Underground railway, transport safety, terror attack, inspection zone, explosive device.

В настоящее время из-за террористических актов на Московском метрополитене и повышения уровня террористической угрозы особое внимание уделяется оснащению метрополитенов России инженерно-техническими средствами и системами обеспечения транспортной безопасности. Мероприятия по оснащению определены в утвержденной распоряжением Правительства РФ от 30 июля 2010 г. № 1285-р комплексной программе обеспечения безопасности населения на транспорте (далее – Программа) [2].

Федеральное агентство железнодорожного транспорта (Росжелдор) осуществляет сопровождение Программы в части метрополитенов и железнодорожного транспорта [7].

За счет предоставленных из федерального бюджета субсидий за годы действия Программы закуплены и установлены на метрополитенах следующие инженерно-технические средства и системы обеспечения транспортной безопасности:

• рамки металлообнаружителей;
• ручные металлообнаружители;
• аппаратура радиационного контроля;
• стационарные сканирующие рентгеновские установки для персонального обследования пассажиров;
• стационарные досмотровые рентгеновские установки конвейерного типа для досмотра багажа;
• переносные рентгенотелевизионные комплексы;
• взрывозащитные контейнеры;
• портативные обнаружители паров взрывчатых веществ (ВВ);
• переносные комплексы обнаружения ВВ на основе быстрых меченых нейтронов;
• системы подавления радиолиний управления взрывными устройствами (ВУ).

В настоящее время в Российской Федерации действуют восемь метрополитенов [5]:

1) Московский;
2) Санкт-Петербургский;
3) Екатеринбургский;
4) Новосибирский;
5) Нижегородский;
6) Самарский;
7) Казанский;
8) Волгоградский (метротрам).

В настоящий момент на метрополитенах России активно создаются и оснащаются зоны досмотра пассажиров и багажа. К примеру, на Московском метрополитене практически на всех станциях в центре города уже функционируют зоны досмотра. В ближайшее время планируется ввести в эксплуатацию в общей сложности 294 досмотровые зоны на 188 станциях [3]. Изыскиваются места для размещения зон досмотра на каждой станции [1]. Организацией и обслуживанием зон досмотра занимаются администрация и служба безопасности Московского метрополитена.

Следует отметить, что подобрать место для размещения зоны досмотра не просто, так как многие станции, особенно старой постройки, являются индивидуальными объектами, имеющими историческую и архитектурную ценность. Учитывая дефицит свободных площадей в вестибюлях, по каждой станции приходится принимать индивидуальные технические решения. При этом важно обеспечить необходимую пропускную способность станций, особенно в часы пик, и не парализовать их работу [3].

Работу в досмотровых зонах организуют в соответствии с действующими нормативными правовыми актами. Дополнительно в ближайшее время должен выйти приказ Министерства транспорта России (Минтранс) «Об утверждении Правил проведения досмотра, дополнительного досмотра и повторного досмотра в целях обеспечения транспортной безопасности». Приказ будет включать перечни оружия, взрывчатых веществ или других устройств, предметов и веществ, которые запрещены или ограничены для перемещения в зону транспортной безопасности или ее часть, данный приказ будет распространяться на метрополитен. Кроме этого, должен выйти приказ Минтранса «Об утверждении Порядка проведения наблюдения и/или собеседования в целях обеспечения транспортной безопасности».

В настоящее время – до выхода регламентирующих приказов Минтранса – в досмотровых зонах метрополитенов действуют на основании временных инструкций, разработанных метрополитеном с учетом действующего законодательства. В досмотровых зонах работники метрополитена взаимодействуют с сотрудниками полиции [3].

Организация досмотра на метрополитене

Методик выбора места размещения зон досмотра в настоящий момент нет, место для размещения зоны досмотра определяется сотрудниками метрополитена. В результате выбор не учитывает взрывоопасность зоны досмотра, которая обусловливается тем, что в настоящий момент ВУ локализуется путем его помещения во взрывозащищенный контейнер, но нет решения по защите от взрыва во время досмотра террориста, в момент изъятия ВУ и его помещения в контейнер. Хотя вероятность подрыва бомбы именно в момент досмотра, когда террорист-смертник понимает, что он обнаружен и что при досмотре специальными средствами ВУ будет выявлено и изъято сотрудниками службы безопасности метрополитена, достаточно высока.

Дополнительно анализ мероприятий по созданию зон досмотра и изучение возможностей инженерно-технических средств и систем обеспечения транспортной безопасности, которыми оснащаются зоны досмотра метрополитена, выявили, что системы безопасности обеспечивают досмотр пассажиропотока, входящего в метрополитен, со следующими показателями:

1) полный досмотр пассажиропотока:

- наличие металлических предметов, в том числе оружия;
- наличие ВУ с металлической оболочкой либо начиненных металлическими поражающими элементами;
- наличие радиоактивных предметов и веществ;
- видеоконтроль на предмет выявления потенциально опасных лиц;

2) частичный выборочный досмотр пассажиропотока:

- наличие взрывчатых веществ;
- наличие ВУ без металлической оболочки и не начиненных металлическими поражающими элементами.

Локализация выявленных ВУ в системе безопасности метрополитена обеспечивается наличием на станциях взрывозащищенных контейнеров.

Сильным местом инженерно-технических средств и систем, которыми оснащаются зоны досмотра, можно считать то, что они позволяют гарантированно обнаруживать оружие, ВУ с металлической оболочкой, ВУ, начиненные металлическими поражающими элементами, радиоактивные предметы и вещества.

Слабым местом этих инженерно-технических средств и систем можно считать то, что они позволяют обнаруживать ВВ, ВУ без металлической оболочки и ВУ, не начиненные металлическими поражающими элементами, только при выборочном досмотре, что, учитывая огромный пассажиропоток, создает высокую вероятность проноса ВУ и совершения теракта в метрополитене.

Обеспечить 100 %-ный досмотр пассажиропотока на предмет выявления ВВ, ВУ без металлической оболочки и ВУ, не начиненных металлическими поражающими элементами, могла технология дистанционного обнаружения взрывчатых веществ и выявления террористов-смертников в общественном транспорте, разрабатывавшаяся в рамках проекта «СТАНДЭКС».

В 2009 г. Совет Россия – НАТО приступил к реализации этого проекта при поддержке программы НАТО «Наука ради мира и безопасности». Эта технология позволяла бы обнаруживать ВВ и ВУ, проносимые человеком в толпе, например, на станции метро в час пик. В то же время обнаружение должно было бы минимизировать неудобства большому количеству людей, ежедневно пользующихся общественным транспортом [6].

В основе проекта лежала система, способная на большом расстоянии «по запаху» определять присутствие ВВ. Задача разработчиков состояла в том, чтобы не только выявлять само присутствие ВВ, но и достоверно устанавливать их местонахождение среди пассажиров. В настоящее время с такой работой способны справиться только специально обученные собаки кинологической службы.

Через 4 года с начала разработки, в 2013 г., оборудование было испытано в Парижском метро и показало положительные результаты в выявлении ВВ на теле человека [4]. Следующие практические испытания планировалось провести в Санкт-Петербургском метрополитене.

По завершения практических испытаний предполагалось перейти ко второй стадии – от обнаружения к предотвращению. Однако на этом этапе проект был заморожен, как и остальное сотрудничество России и НАТО.

В программе участвовали несколько стран, руководил ею консорциум, в который входили лаборатории и научно-исследовательские институты из разных стран, в том числе из России. Участники проекта: Комиссия по альтернативным источникам энергии и атомной энергии Франции, германский Институт Фраунгофера, Организация прикладных научных исследований Нидерландов, российские Радиевый институт им. Хлопина, Научно-технический центр прикладной физики (НТЦ ПФ) и ЗАО «Полупроводниковые приборы», а также итальянское Национальное агентство новых технологий, энергетики и устойчивого экономического развития.

Анализ выявил следующие проблемы в создании и оснащении зон досмотра пассажиров и багажа на метрополитене:

• отсутствие методик выбора места размещения зон досмотра, учитывающих взрывоопасность зоны досмотра;

• отсутствие технологий, позволяющих досматривать 100 % пассажиропотока на предмет наличия ВВ, ВУ без металлической оболочки и ВУ, не начиненных металлическими поражающими элементами, без влияния на скорость движения пассажиропотока.

Рекомендации по организации досмотра на метрополитене

Полный досмотр пассажиропотока на предмет наличия ВВ, ВУ без металлической оболочки и ВУ, не начиненных металлическими поражающими элементами, в настоящий момент невозможен, так как нет технологии, позволяющей досматривать 100 % пассажиропотока без влияния на пропускную способность станций метро. Досмотр пассажиров, как в аэропортах, невозможен из-за высокого пассажиропотока метрополитена, достигающего на некоторых станциях в утренние и вечерние часы пик до 3–4 тыс. чел. в час.

Частично решить проблему более полного досмотра пассажиропотока на предмет выявления безоболочных ВУ и ВУ, не начиненных металлическими поражающими элементами, в настоящий момент можно, увеличив количество находящихся на станциях метро патрулей, в состав которых входят специально обученные на поиск ВВ собаки. Сейчас данный подход наиболее эффективен.

Для разработки методических рекомендаций по выбору места размещения зон досмотра, учитывающих их взрывоопасность, нужно учитывать, что зону досмотра нельзя располагать вблизи:

• несущих конструкций станции метрополитена, так как при взрыве ВУ может обрушиться здание, что приведет к значительно большему количеству жертв, чем только при взрыве;

• путей эвакуации, так как в случае взрыва возможен завал или перекрытие пожаром путей эвакуации, что приведет к большему количеству жертв, чем только при взрыве;

• конструкций здания, которые могут создать эффект кумуляции и перенаправить энергию взрыва в сторону скопления людей, например в сторону очереди на эскалатор.

Заключение

Использование сотрудниками службы безопасности метрополитена перечисленных методических рекомендаций позволит при взрыве ВУ в зоне досмотра снизить количество пострадавших среди находящихся на станции метрополитена людей на 20–30%, вероятность обрушения здания станции – на 15–20%.

Библиографический список

1. Бюллетень ежедневного мониторинга СМИ Министерства транспорта РФ. Министерство транспорта РФ. – URL : http://mintrans.ru/upload/iblock/621/2201.doc (дата обращения 21.08.2015).

2. Комплексная программа обеспечения безопасности населения на транспорте (утв. распоряжением Правительства РФ от 30 июля 2010 г. № 1285-р).

3. Пегов Д. Главная цель метрополитена – безопасная перевозка пассажиров / Д. Пегов // Транспортная безопасность и технологии. – URL : http://www.securitymedia.ru/publication_one_70.html (дата обращения 15.05.2015).

4. Россия – НАТО : ученые против террористов. – URL : http://ru.euronews.com/2013/10/31/nato-and-russia-unveil-bomb-detection-system-that-works-in-crowds (дата обращения: 28.05.2015).

5. Соколов М. Ю. Доклад на заседании Правительства РФ / М. Ю. Соколов // Стенограмма заседания Правительства РФ. – URL : http://government.ru/news/10255 (дата обращения 21.08.2015).

6. «СТАНДЭКС»: сотрудничество в противодействии терроризму. Организация североатлантического договора. – URL : http://www.nato.int/cps/ru/natohq/news_92692.htm?selectedLocale=ru (дата обращения 05.06.2015).

7. Чепец В. Ю. Железнодорожный транспорт и метрополитен / В. Ю. Чепец. – URL : http://federalbook.ru/files/BEZOPASNOST/soderghanie/NB %20I/VIII/Chepec.pdf (дата обращения 21.08.2015).

References

1. *Byulleten yezhednevnogo monitoringa SMI Ministerstva transporta RF – Daily Media Monitoring Bulletin of the Russian Federation Transport Ministry*, available at: mintrans.ru/upload/iblock/621/2201.doc.

2. Kompleksnaya programma obespecheniya bezopasnosti naseleniya na transporte [Integrate Programme for Ensuring Population's Safety on the Transport], approved by Russian Federation government Jul. 30, 2010, no. 1285-r.

3. Pegov D. Glavnaya tsel metropolitena – bezopasnaya perevozka passazhirov [Main Purpose of Underground Railway Is Safe Passenger Transportation]. *Transportnaya bezopasnost i tekhnologii –- Transport Safety and Technologies*, available at: securitymedia.ru/publication_one_70.html.

4. Rossiya – NATO: uchenyye protiv terroristov [Russia – NATO: Scientists Vs Terrorists], available at: ru.euronews.com/2013/10/31/nato-and-russia-unveil-bomb-detection-system-that-works-in-crowds.

5. Sokolov M.Yu. Report at Russian Federation government session, available at: government.ru/news/10255.

6. STANDEX: Sotrudnichestvo v protivodeystvii terrorizmu [STANDEX: Co-operation in Countering Terrorism]. North Atlantic Treaty Organisation, available at: nato.int/cps/ru/natohq/news_92692.htm?selectedLocale=ru.

7. Chepets V.Yu. Zheleznodorozhnyy transport i metropoliten [Railway Transport and Underground Railway], available at: http://federalbook.ru/files/BEZOPASNOST/soderghanie/NB %20I/VIII/Chepec.pdf.

ШВЕЦОВ Алексей Владиславович – аспирант, techzdservis@mail.ru (Дальневосточный государственный университет путей сообщения).

УДК 621.314.21

А. Я. Якушев, А. Г. Середа

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С СЕКЦИОНИРОВАННЫМИ ВТОРИЧНЫМИ ОБМОТКАМИ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Дата поступления: 08.07.2015
Решение о публикации: 08.09.2015

Цель: Адекватно воспроизвести переходные процессы в силовых цепях электроподвижного состава (ЭПС) при компьютерном моделировании рабочих режимов ЭПС переменного тока. **Методы:** Рассмотрен способ математического описания физических процессов в тяговом трансформаторе с секционированными вторичными обмотками, при котором применяется форма записи системы дифференциальных уравнений в пространстве состояний. Предложена методика расчета индуктивностей рассеяния обмоток тягового трансформатора, основывающаяся на теории многообмоточных трансформаторов. **Результаты:** Получены выражения для расчета индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора и взаимных индуктивностей, учитывающих изменение магнитного поля рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток. Описан алгоритм для расчета элементов матриц уравнения состояния. Получена математическая модель тягового трансформатора, учитывающая изменение магнитного поля рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток. **Практическая значимость:** Моделирование электромагнитных процессов в силовых цепях ЭПС позволяет воспроизводить переходные процессы в силовых цепях ЭПС, экспериментальное исследование которых требует применения дорогостоящих измерительных комплексов, или если экспериментальное исследование работы ЭПС невыполнимо в реальных условиях.

Тяговый трансформатор, многообмоточный трансформатор, индуктивность рассеяния, пространство состояний, уравнение состояния.

Aleksey Ya. Yakushev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, professor, el_tyaga@mail.ru; ***Aleksandr G. Sereda**, postgraduate student, ag-sereda@mail.ru (Petersburg State Transport University) SIMULATION MODEL OF TRACTION TRANSFORMER WITH SECTIONED SECONDARY COIL IN STATE OF SPACE

Objective: To sufficiently simulate transient processes in power circuits of electrically propelled vehicles during computer simulation of working regimes of electrically propelled vehicles of alternating current. **Methods:** A method for mathematical description of physical processes occurring in traction transformer with sectioned secondary coil is considered, with a form of recording of differential equation system in state of space used. A method for calculating scattered inductance of traction transformer coils is proposed, based on the theory of multi-curcuit transformers. **Results:** Equations for calculating scattered inductance of transformer coils and mutual inductance were produced, taking into account coil leakage magnetic field variations in case of discrete load switching of traction coil sections. An algorithm for calculating matrix elements of equation of state was described. A simulation model of a traction transformer which takes into account coil leakage magnetic field variations in case of discrete load switching of traction coil sections. **Practical importance:** Simulation of electromagnetic processes in electrically propelled vehicles' power circuits allows to reproduce transient processes in electrically propelled vehicles' power circuits, experimental study of which requires application of expensive measuring systems, or if expermeintal studies of electrically propelled vehicles' operation is impossible in real conditions.

Traction transformer, multi-circuit transformer, leakage inductance, state of space, equation of condition.

Компьютерное моделирование квазиустановившихся и переходных процессов в силовых цепях электроподвижного состава (ЭПС) позволяет исследовать работу его устройств и системы управления, не прибегая к натурным испытаниям из-за сложностей организации эксперимента и значительных финансовых затрат. Пакеты схемотехнического моделирования (MATLAB Simulink, OrCAD, DesigneLab) используют для исследования большого круга электротехнических и электромеханических устройств. Они обеспечивают простое формирование схем компьютерных моделей, но в то же время по отдельным агрегатам, таким как электродвигатели постоянного и переменного тока, многообмоточный трансформатор, не достаточно полно отображают их физические свойства.

При создании компьютерной модели силовой цепи ЭПС переменного тока для адекватного воспроизведения работы тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в режимах коммутации тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя предлагается описать его работу в пространстве состояний [4, 8]. Для этого необходимо определить собственные и взаимные индуктивности трансформатора, а также элементы матриц уравнения состояния.

Определение индуктивностей рассеяния тягового трансформатора

В отсутствие емкостных токов и токов утечки в изоляции, а также пренебрегая влиянием вихревых токов, n-обмоточный трансформатор описывает система из n уравнений [5, 6]:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_p \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1q} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & \cdots & r_{pq} & \cdots & r_{pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nq} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_p \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} L_{11} & \cdots & L_{1q} & \cdots & L_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{p1} & \cdots & L_{pq} & \cdots & L_{pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & \cdots & L_{nq} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_p \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где u – n-мерный вектор, элементами которого являются напряжения обмоток трансформатора; i – n-мерный вектор, элементами которого являются токи, протекающие по обмоткам трансформатора; r – матрица размерностью $(n; n)$, элементами которой являются активная составляющая взаимного сопротивления, учитывающая потери в стали и добавочные потери; при $p = q$ учитывается также сопротивление обмотки постоянному току; L – матрица размерностью $(n; n)$, элементами которой являются $L_{pq} = L_{qp}$ взаимные (при $p = q$ – собственные) индуктивности обмоток трансформатора.

Магнитное поле трансформатора можно условно разбить на взаимосвязанные части: основное поле и поле рассеяния обмоток [3]. Тогда, приводя все обмотки к числу витков сетевой обмотки, запишем систему уравнений (1) следующим образом [2] (считаем, что источник питания подключен к 1-й обмотке):

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ -u_n^{'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m + r_{\sigma_1} & \cdots & r_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m & \cdots & r_m + r_{\sigma n}^{'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_p^{'} \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma_1} & \cdots & L_m \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_m & \cdots & L_m + L_{\sigma n}^{'} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n^{'} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где r_m – активное сопротивление, учитывающее потери в стали; L_m – взаимная индуктивность, обусловленная потоком, все силовые линии которого полностью замыкаются по сердечнику; $r_{\sigma p}^{'}$ – активное сопротивление, учитывающее потери от потока рассеяния p-й обмотки, приведенное к числу витков сетевой обмотки; $L_{\sigma p}^{'}$ – индуктивность рассеяния p-й обмотки, приведенная к числу витков сетевой обмотки.

Во время работы трансформатора под нагрузкой отдельные секции тяговых обмоток выключают из цепи, что изменяет магнитодвижущие силы первичной и вторичных обмоток. Следовательно, изменяется магнитное поле рассеяния обмоток, а вместе с ним – индуктивности рассеяния обмоток. Это изменение предлагается учитывать взаимными индуктивностями $L_{\sigma pq}^{'}$ обмоток p и q относительно индуктивностей рассеяния обмоток, определенных для n опытов короткого замыкания трансформатора. Тогда систему уравнений (2) запишем следующим образом:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ -u_n^{'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m + r_{\sigma 1} & \cdots & r_m + r_{\sigma 1 n}^{\prime} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m + r_{\sigma n 1}^{'} & \cdots & r_m + r_{\sigma n}^{'} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_p^{'} \end{bmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma 1} & \cdots & L_m + L_{\sigma 1 n}^{\prime} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_m + L_{\sigma n 1}^{'} & \cdots & L_m + L_{\sigma n}^{'} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n^{'} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $r_{\sigma pq}^{'} = r_{\sigma qp}^{'}$ – активная составляющая взаимного сопротивления, учитывающая изменение потерь от потоков рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток, приведенная к числу витков сетевой обмотки (при $p = q$ – активное сопротивление, учитывающее потери от потока рассеяния p-й обмотки); $L_{\sigma pq}^{'} = L_{\sigma qp}^{'}$ – взаимная индуктивность, учитывающая изменение индуктивностей рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток, приведенная к числу витков сетевой обмотки (при $p = q$ – индуктивность рассеяния).

Опыты короткого замыкания тяговых трансформаторов между сетевой обмоткой и одной или более последовательно соединенными секциями тяговых обмоток приведены в ряде руководств по эксплуатации электровозов. Применяя теорию многообмоточных трансформаторов [1], определим взаимосвязь между индуктивностями рассеяния обмоток, активными потерями от потоков рассеяния и сопротивлением короткого замыкания при s ($s = 1, 2, \ldots, n - 1$) последовательно соединенных секций вторичных обмоток (пример для $s = n - 1$):

$$w^2 L_{\text{к}1s} = w^2 L_{\sigma 1} + \sum_{p=2}^{n} w_p^2 L_{\sigma p}^{'}, \quad (4)$$

$$w^2 r_{\text{к}1s} = w^2 r_{\sigma 1} + \sum_{p=2}^{n} w_p^2 r_{\sigma p}^{'}, \quad (5)$$

где $w = \sum_{p=2}^{n} w_p$ – суммарное число витков вторичных обмоток; $r_{\text{к}1s}$ – активное сопротивление короткого замыкания трансформатора со стороны зажимов 1–1; $L_{\text{к}1s}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания трансформатора со стороны зажимов 1–1.

Для опытов короткого замыкания трансформатора, когда $s < n - 1$, p-я обмотка не закорочена и w_p, $r_{\sigma p}^{'}$, $L_{\sigma p}^{'}$ равны нулю.

Решениями систем из n различных уравнений (4) и (5) являются индуктивности рассеяния обмоток и активные сопротивления, учитывающие потери от потоков рассеяния, для n опытов короткого замыкания трансформатора. Изменение индуктивности рассеяния обмоток и активных потерь от потоков рассеяния при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток можно определить также относительно n опытов холостого хода, когда $L'_{\sigma p}$, $r'_{\sigma p}$ равны нулю (так как магнитное поле рассеяния обмоток проявляется при наличии тока не менее чем в двух обмотках [3]).

Тогда взаимосвязь между $L'_{\sigma pq}$, $r'_{\sigma pq}$ и сопротивлением короткого замыкания при s ($s = 1, 2, \ldots, n-1$) последовательно соединенных секций вторичных обмоток (пример для $s = n-1$) определим по уравнениям

$$w^2 L_{\text{к}1s} - w^2 L_{\sigma 1} - \sum_{p=2}^{n} w_p^2 L'_{\sigma p} = -w^2 \sum_{p=2}^{n} w_p L'_{\sigma 1p} + \sum_{q=2}^{n} \sum_{\substack{p=2,\\ p\neq q}}^{n} w_q w_p L'_{\sigma pq} \quad (6)$$

$$w^2 r_{\text{к}1s} - w^2 r_{\sigma 1} - \sum_{p=2}^{n} w_p^2 r'_p = -w^2 \sum_{p=2}^{n} w_p r'_{\sigma 1p} + \sum_{q=2}^{n} \sum_{\substack{p=2,\\ p\neq q}}^{n} w_q w_p r'_{\sigma q p}. \quad (7)$$

Для опытов короткого замыкания трансформатора, когда $s < n-1$, p-я обмотка не закорочена и w_p, $r'_{\sigma p}$, $L'_{\sigma p}$, $r'_{\delta pq}$, $L'_{\sigma pq}$ равны нулю.

Определим взаимные индуктивности $L'_{\sigma pq}$ и активную составляющую взаимных сопротивлений $r'_{\sigma pq}$, решив матричные уравнение относительно матриц L'_{σ} и r'_{σ}, соответственно:

$$\left\|L'_{\text{к}}\right\| = \left\|K_L\right\| \cdot \left\|L'_{\sigma}\right\|;$$

$$\left\|r'_{\text{к}}\right\| = \left\|K_r\right\| \cdot \left\|r'_{\sigma}\right\|,$$

где $L'_{\text{к}}$ – $n \cdot (n-1)/2$-мерный вектор, элементами которого являются выражения в левой части уравнений (6); L'_{σ} – $n \cdot (n-1)/2$-мерный вектор, элементами которого являются взаимные индуктивности, обусловленные изменением индуктивностей рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток; K_L – матрица размерностью $(n \cdot (n-1)/2;\ n \cdot (n-1)/2)$, элементами которой являются коэффициенты при взаимных $L'_{\sigma pq}$ индуктивностях уравнений (6); $r_{\text{к}}$ – $n \cdot (n-1)/2$-мерный вектор, элементами которого являются выражения в левой части уравнений (7); r'_{σ} – $n \cdot (n-1)/2$-мерный вектор, элементами которого являются взаимные активные сопротивления, обусловленные изменением потерь от потоков рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток; K_r – матрица $(n \cdot (n-1)/2;\ n \cdot (n-1)/2)$, элементами которой являются коэффициенты при активной составляющей взаимных сопротивлений $r'_{\sigma pq}$ уравнений (7).

Определение элементов матриц динамики и входа

Запишем векторно-матричную форму [7] системы дифференциальных уравнений (3) для вектора состояния $x^T = [i_1, \ldots, i'_p, \ldots, i'_n]$.

$$\frac{d}{dt} x(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t)$$ – уравнение состояния (динамики);

$$y(t) = C \cdot x(t)$$ – уравнение выхода,

где $x(t)$ – n-мерный вектор состояния, компонентами которого являются переменные состояния системы n-го порядка (i'_p ток p-й обмотки, приведенный к числу витков сетевой обмотки (w_1)); $u(t)$ – n-мерный вектор входа (управления), компонентами которого являются входные переменные состояния (u'_p напряжение p-й обмотки, приведенное к числу витков сетевой обмотки); $y(t)$ – n-мерный выходной вектор, компонентами которого являются выходные переменные состояния (i_p ток p-й обмотки);

$$C = \begin{bmatrix} 1 & \ldots & 0 & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & \ldots & w_1/w_p & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & \ldots & 0 & \ldots & w_1/w_n \end{bmatrix} -$$

матрица выхода размерностью $(n;\ n)$.

Выбор коэффициентов матрицы выхода обусловлен тем, что в уравнение динамики входят электрические величины u'_p, i'_q, приведенные к числу витков сетевой обмотки; A, B – матрицы динамики (коэффициентов системы) и входа, соответственно, размерностью $(n; n)$.

Для определения элементов матриц динамики и входа необходимо разрешить систему дифференциальных уравнений первого порядка (3) относительно производных. Найдем элементы первой строки матриц A и B, выражая производную тока, протекающего по первичной обмотке, через оставшиеся токи. Для этого составим матрицы, элементами которых являются коэффициенты при токах, их производных и напряжениях обмоток трансформатора системы уравнений (3):

$$
{}_{L}A =
$$
$$
=\begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma 1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma 1q} & \cdots & L_m + L'_{\sigma 1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_m + L'_{\sigma p1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma p} & \cdots & L_m + L'_{\sigma pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_m + L_{\sigma n1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma nq} & \cdots & L_m + L'_{\sigma n} \end{bmatrix};
$$

$$
{}_{r}A = \begin{bmatrix} r_m + r'_{\sigma 1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma 1q} & \cdots & r_m + r'_{\sigma 1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m + r'_{\sigma p1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma p} & \cdots & r_m + r'_{\sigma pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m + r'_{\sigma n1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma nq} & \cdots & r_m + r'_{\sigma n} \end{bmatrix};
$$

$$
{}_{u}B = -\begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}.
$$

Обозначая номер шага символом k, запишем выражения в теле цикла:

$$
{}_{L}^{k}A = \begin{bmatrix} {}_{L}^{k-1}a_{1,1} & \cdots & {}_{L}^{k-1}a_{1,n-k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_{L}^{k-1}a_{n-k,1} & \cdots & {}_{L}^{k-1}a_{n-k,n-k} \end{bmatrix} \times
$$
$$
\times {}_{L}^{k-1}a_{n-k+1,n-k+1} - \begin{bmatrix} {}_{L}^{k-1}a_{1,n-k+1} \\ \vdots \\ {}_{L}^{k-1}a_{n-k,n-k+1} \end{bmatrix} \times \qquad (8)
$$
$$
\times \begin{bmatrix} {}_{L}^{k-1}a_{n-k+1,1} & \cdots & {}_{L}^{k-1}a_{n-k+1,n-k} \end{bmatrix};
$$

$$
{}_{r}^{k}A = \begin{bmatrix} {}_{r}^{k-1}a_{1,1} & \cdots & {}_{r}^{k-1}a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_{r}^{k-1}a_{n-k,1} & \cdots & {}_{r}^{k-1}a_{n-k,n} \end{bmatrix} \times
$$
$$
\times {}_{L}^{k-1}a_{n-k+1,n-k+1} - \begin{bmatrix} {}_{L}^{k-1}a_{1,n-k+1} \\ \vdots \\ {}_{L}^{k-1}a_{n-k,n-k+1} \end{bmatrix} \times \qquad (9)
$$
$$
\times \begin{bmatrix} {}_{r}^{k-1}a_{n-k+1,1} & \cdots & {}_{r}^{k-1}a_{n-k+1,n} \end{bmatrix};
$$

$$
{}_{u}^{k}B = \begin{bmatrix} {}_{u}^{k-1}b_{1,1} & \cdots & {}_{u}^{k-1}b_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ {}_{u}^{k-1}b_{n-k,1} & \cdots & {}_{u}^{k-1}b_{n-k,n} \end{bmatrix} \times
$$
$$
\times {}_{L}^{k-1}a_{n-k+1,n-k+1} - \begin{bmatrix} {}_{L}^{k-1}a_{1,n-k+1} \\ \vdots \\ {}_{L}^{k-1}a_{n-k,n-k+1} \end{bmatrix} \times \qquad (10)
$$
$$
\times \begin{bmatrix} {}_{u}^{k-1}b_{n-k+1,1} & \cdots & {}_{u}^{k-1}b_{n-k+1,n} \end{bmatrix}.
$$

Выражения (8)–(10) на первом шаге примут вид

$$
{}_{L}^{1}A = \begin{bmatrix} L_m + L_{\sigma 1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma 1n-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_m + L'_{\sigma n-11} & \cdots & L_m + L'_{\sigma n-1} \end{bmatrix} \times
$$
$$
\times (L_m + L'_{\sigma n}) - \begin{bmatrix} L_m + L'_{\sigma 1n} \\ \vdots \\ L_m + L'_{\sigma n-1n} \end{bmatrix} \times
$$
$$
\times \begin{bmatrix} L_m + L'_{\sigma n1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma n\,n-1} \end{bmatrix};
$$

$$ {}_{r}^{1}A = \begin{bmatrix} r_m + r_{\sigma 1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma 1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r'_m + r'_{\sigma n-11} & \cdots & r_m + r'_{\sigma n-1n} \end{bmatrix} \times $$

$$ \times (L_m + L'_{\sigma n}) - \begin{bmatrix} L_m + L'_{\sigma 1n} \\ \vdots \\ L_m + L'_{\sigma n-1n} \end{bmatrix} \times $$

$$ \times \begin{bmatrix} r_m + r'_{\sigma n1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma nn} \end{bmatrix}; $$

$$ {}_{u}^{1}B = \begin{bmatrix} -1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & -1 & 0 \end{bmatrix} \times $$

$$ \times (L_m + L'_{\sigma n}) - $$

$$ - \begin{bmatrix} L_m + L'_{\sigma 1n} \\ \vdots \\ L_m + L'_{\sigma n-1n} \end{bmatrix} \times [0 \quad \cdots \quad -1], $$

на последнем шаге $(n - 1)$ –

$$ {}_{L}^{n-1}A = {}_{L}^{n-2}a_{1,1} \times {}_{L}^{n-2}a_{2,2} - {}_{L}^{n-2}a_{1,2} \times {}_{L}^{n-2}a_{2,1}; $$

$$ {}_{r}^{n-1}A = \begin{bmatrix} {}_{r}^{n-2}a_{1,1} & \cdots & {}_{r}^{n-2}a_{1,n} \end{bmatrix} \times $$

$$ \times {}_{L}^{n-2}a_{2,2} - {}_{L}^{n-2}a_{1,2} \times $$

$$ \times \begin{bmatrix} {}_{r}^{n-2}a_{2,1} & \cdots & {}_{r}^{n-2}a_{2,n} \end{bmatrix}; $$

$$ {}_{u}^{n-1}B = \begin{bmatrix} {}_{u}^{n-2}b_{1,1} & \cdots & {}_{u}^{n-2}b_{1,n} \end{bmatrix} \times $$

$$ \times {}_{L}^{n-2}a_{2,2} - {}_{L}^{n-2}a_{1,2} \times $$

$$ \times \begin{bmatrix} {}_{u}^{n-2}b_{2,1} & \cdots & {}_{u}^{n-2}b_{2,n} \end{bmatrix}. $$

Затем вычислим элементы первой строки матриц динамики и входа:

$$ \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,q} & \cdots & a_{1,n} \end{bmatrix} = $$

$$ = -\frac{1}{{}_{L}^{n-1}a_{1,1}} \begin{bmatrix} {}_{r}^{n-1}a_{1,1} & \cdots & {}_{r}^{n-1}a_{1,q} & \cdots & {}_{r}^{n-1}a_{1,n} \end{bmatrix}; $$

$$ \begin{bmatrix} b_{1,1} & \cdots & b_{1,q} & \cdots & b_{1,n} \end{bmatrix} = $$

$$ = -\frac{1}{{}_{L}^{n-1}a_{1,1}} \begin{bmatrix} {}_{u}^{n-1}b_{1,1} & \cdots & {}_{u}^{n-1}b_{1,q} & \cdots & {}_{u}^{n-1}b_{1,n} \end{bmatrix}. $$

Меняя местами элементы 1-й и p-й строки, а также 1-го и p-го столбца матриц ${}_{L}A$, ${}_{r}A$ и ${}_{u}B$, получим

$$ {}_{L}A = $$

$$ = \begin{bmatrix} L_m + L'_{\sigma p} & \cdots & L_m + L'_{\sigma p1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L'_{p1} + L'_{\sigma 1p} & \cdots & L_m + L_{\sigma 1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma 1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_m + L'_{\sigma np} & \cdots & L_m + L'_{\sigma n1} & \cdots & L_m + L'_{\sigma n} \end{bmatrix}; $$

$$ {}_{r}A = \begin{bmatrix} r_m + r'_{\sigma p} & \cdots & r_m + r'_{\sigma p1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma pn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m + r'_{\sigma 1p} & \cdots & r_m + r_{\sigma 1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma 1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_m + r'_{\sigma np} & \cdots & r_m + r'_{\sigma n1} & \cdots & r_m + r'_{\sigma n} \end{bmatrix}; $$

$$ {}_{u}B = -\begin{bmatrix} -1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix}, $$

а выполняя вычисления по выражениям (8)–(10), $n - 1$ раз найдем элементы p-й строки матриц динамики и входа:

$$ \begin{bmatrix} a_{p,1} & \cdots & a_{p,q} & \cdots & a_{p,n} \end{bmatrix} = $$

$$ = -\frac{1}{{}_{L}^{n-1}a_{1,1}} \begin{bmatrix} {}_{r}^{n-1}a_{1,p} & \cdots & {}_{r}^{n-1}a_{1,1} & \cdots & {}_{r}^{n-1}a_{1,n} \end{bmatrix}; $$

$$ \begin{bmatrix} b_{p,1} & \cdots & b_{p,q} & \cdots & b_{p,n} \end{bmatrix} = $$

$$ = -\frac{1}{{}_{L}^{n-1}a_{1,1}} \begin{bmatrix} {}_{u}^{n-1}b_{1,p} & \cdots & {}_{u}^{n-1}b_{1,1} & \cdots & {}_{u}^{n-1}b_{1,n} \end{bmatrix}. $$

Зная элементы матриц динамики и входа, можно перейти к моделированию тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в пространстве состояний.

Заключение

Для адекватного воспроизведения работы тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками в режимах коммутации тиристорных плеч выпрямительно-инверторного преобразователя необходимо знать $n \cdot (n - 1)/2$ опытов короткого замыкания трансформатора.

Изменение индуктивностей рассеяния обмоток при дискретном переключении нагрузки секций тяговых обмоток можно учесть взаимными индуктивностями и активной составляющей взаимных сопротивлений обмоток математической модели трансформатора в пространстве состояний.

Библиографический список

1. Васютинский С. В. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. В. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970. – 431 с.

2. Вольдек А. И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы / А. И. Вольдек, В. В. Попов. – СПб. : Питер, 2008. – 320 с.

3. ГОСТ 16110-82. Трансформаторы силовые. Термины и определения.

4. Лебедев С. К. Математические основы теории автоматического управления / С. К. Лебедев ; Кафедра Электропривода и автоматизации промышленных установок. – URL : http://drive.ispu.ru/elib/lebedev/index.html (дата обращения 06.07.2015).

5. Лейтес Л. В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов / Л. В. Лейтес, А. М. Пинцов. – М. : Энергия, 1974. – 192 с.

6. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 392 с.

7. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / В. Стрейц ; пер. с англ. под ред. Я. З. Цыпкина. – М. : Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985. – 296 с.

8. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор ; пер. с англ. Б. И. Копылова. – М. : Лаборатория Базовых знаний, 2001. – 616 с.

References

1. Vasyutinskiy S. V. Voprosy teorii i rascheta transformatorov [Issues of Transformer Theory and Calculations]. Leningrad, Energiya, 1970. 431 p.

2. Voldek A. I. & Popov V. V. Elektricheskiye mashiny. Vvedeniye v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory [Electric Machines. Introduction to Electromechanics. Direct Current Machines and Transformers]. St. Petersburg, Piter, 2008. 320 p.

3. GOST 16110-82. Transformatory silovyye. Terminy i opredeleniya [Power Transformers. Terms and Definitions].

4. Lebedev S. K. Matematicheskiye osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya [Mathematical Foundations of Automatic Control Theory], available at: http://drive.ispu.ru/elib/lebedev/index.html.

5. Leytes L. V. & Pintsov A. M. Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov [Multi-Circuit Transformer Equivalent Circuits]. Moscow, Energiya, 1974. 192 p.

6. Leytes L. V. Elektromagnitnyye raschety transformatorov i reaktorov [Electromagnetic Calculations for Transformers and Reactors]. Moscow, Energiya, 1981. 392 p.

7. Streyts V. Metod prostranstva sostoyaniy v teorii diskretnykh lineynykh sistem upravleniya [State of Space Method in the Theory of Discrete Linear Control Systems]. Moscow, Nauka, 1985. 296 p.

8. Fillips Ch. & Kharbor R. Sistemy upravleniya s obratnoy svyazyu [Closed-Circuit Control Systems]. Moscow, Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001. 616 p.

ЯКУШЕВ Алексей Яковлевич – канд. техн. наук, доцент, профессор, el_tyaga@mail.ru; *СЕРЕДА Александр Геннадьевич – аспирант, ag-sereda@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 629.423.1:621.3

А. Я. Якушев, А. В. Плакс, Е. В. Опарина

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ПОДСИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Дата поступления: 13.11.2015
Решение о публикации: 18.11.2015

Цель: Исследовать способы повышения показателей безопасности и живучести цифровых подсистем управления электромеханическими аппаратами, служащих для модернизации электровозов ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К, ЭП2К. **Методы:** Для повышения безопасности рассмотрен метод маскировки отказов в цифровых системах посредством применения аппаратно избыточных структур. **Результаты:** Предложена функциональная схема цифровой подсистемы автоматического управления с обратной связью на основе мажоритарной системы два из трех с реконфигурацией «2v3P». Проведен сравнительный анализ вероятностей безотказной и безопасной работы мажоритарной многоканальной системы и одноканальной системы управления. **Практическая значимость:** Результаты исследования можно применить для модернизации микропроцессорных систем управления электровозов ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К, ЭП2К.

Электроподвижной состав, микропроцессорная подсистема управления**,** безотказность, безопасность, мажоритарная система.

Aleksey Ya. Yakushev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, professor, el_tyaga@mail.ru; **Aleksey V. Plaks**, D. Eng., professor, professor; ***Yekaterina V. Oparina**, postgraduate student, sirayaekaterina@mail.ru (Petersburg State Transport University) INCREASED SECURITY MICROPROCESSOR CONTROL SUBSYSTEM DEVICES OF ELECTRIC ROLLING STOCK

Objective: To study methods of increasing safety and failure survival indices of digital subsystems for control of electromechanical devices used for modernisation of EP1, EP1M, 2ES5K and EP2K electric locomotives. **Methods:** Method of masking failures in digital systems by applying redundant hardware structures is considered for increasing security. **Results:** A functional scheme of digital subsystem for automatic control with inverse link based on the two out of the three majority system with 2v3P reconfiguration is proposed. Comparative analysis of possibilities of no-failure and secure operation of majority multi-channel control system and single-channel control system is conducted. **Practical importance:** Study results can be used in modernisation of microprocessor schemes of EP1, EP1M, 2ES5K and EP2K electric locomotives.

Electric rolling stock, microprocessor control susbsystem, no-failure operation, majority system.

Микроэлектронная и микропроцессорная техника широко используется при построении современных систем управления электрическим подвижным составом. По сравнению с релейной микроэлементная база позволяет существенно расширить функциональные возможности систем, но в то же время теряет свойства наглядности и очевидности исполнительных функций, восполняемые информационными сообщениями или схемнографической конфигурацией цепей электровоза, выводимыми на дисплее пульта машиниста.

Применение микроэлектронных средств для передачи дискретных сигналов в виде закодированных команд в последовательном протоколе между подсистемами управления электрооборудованием широко распространено в системах управления электровозов пятого поколения, таких как ЭП20, 2ЭС5, 2ЭС7, 2ЭС6К, 2ЭС10 [3, 4].

Вопрос усовершенствования подсистем управления электромеханическими аппаратами и агрегатами посредством цифровых интерфейсов особенно актуален для электровозов отечественного производства серий ЭП2К, ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К, поскольку позволяет решать следующие задачи:

• уменьшать число задействованных индивидуальных каналов передачи управляющих команд;

• заменять схемную логику управления исполнительными аппаратами программной логикой,

• совершенствовать диагностические функции.

Принципы повышения отказоустойчивости и безопасности подсистемы управления

Структура предлагаемой усовершенствованной подсистемы передачи сигналов управления на объекты управления (электромеханические аппараты) посредством применения цифрового канала передачи управляющих сигналов приведена на рис. 1.

Функциональное состояние электровозов серий ЭП1, ЭП1М, 2ЭС5К зависит от рабочего состояния таких аппаратов и агрегатов, как тормозные переключатели, контакторы включения электродвигателей вспомогательного привода и собственно электродвигатели, контакторы подачи питания на усилители-формирователи импульсов управления тиристорными приборами силовых преобразователей.

Замена схемно-логических цепей с использованием электромеханических блокировочных элементов на программно-логические функции с применением цифровых каналов для передачи информационных и управляющих команд позволит существенно повысить надежность и диагностическую информативность подсистем управления аппаратами и агрегатами, определяющими рабочую функциональность («живучесть») электровоза [2, 8].

Особенностью микроэлектронной элементной базы является наличие кратковременных самоустраняющихся сбоев, интенсивность которых возрастает с увеличением скорости выполнений операций. Кратковременная фиксация ложного сигнала 1 или 0 на выходе логического элемента проявляется на выходе микросхемы при определенном логическом наборе на ее входе и может привести к формированию ошибочной команды на исполнительный электроаппарат [5, 6]. В связи с этим для микроэлектронных и микропроцессорных систем на первый план выходят задачи безопасности, отказоустойчивости и контролепригодности.

Методы повышения показателей безопасности подсистемы управления

Безопасной является система, которая при возникновении неисправности составляющих элементов структуры не оказывает опасного воздействия на функциональность объектов управления.

Показатели безопасности повышаются двумя методами: маскировкой и обнаружением отказов [5, 6].

Маскировка отказов достигается посредством аппаратно или программно избыточных структур. Наиболее распространенные структурно избыточные системы имеют дублирование, троирование рабочих каналов (мажоритарные системы) и т. д. Главным элементом, отличающим подобные структуры от структур с «горячим» резервированием, является наличие устройства безопасного сравнения, которое сравнивает сигналы, формируемые параллельно работающими каналами, и при их совпадении или удовлетворении определенным пороговым условиям выдает выходной безопасный сигнал управления [1, 6].

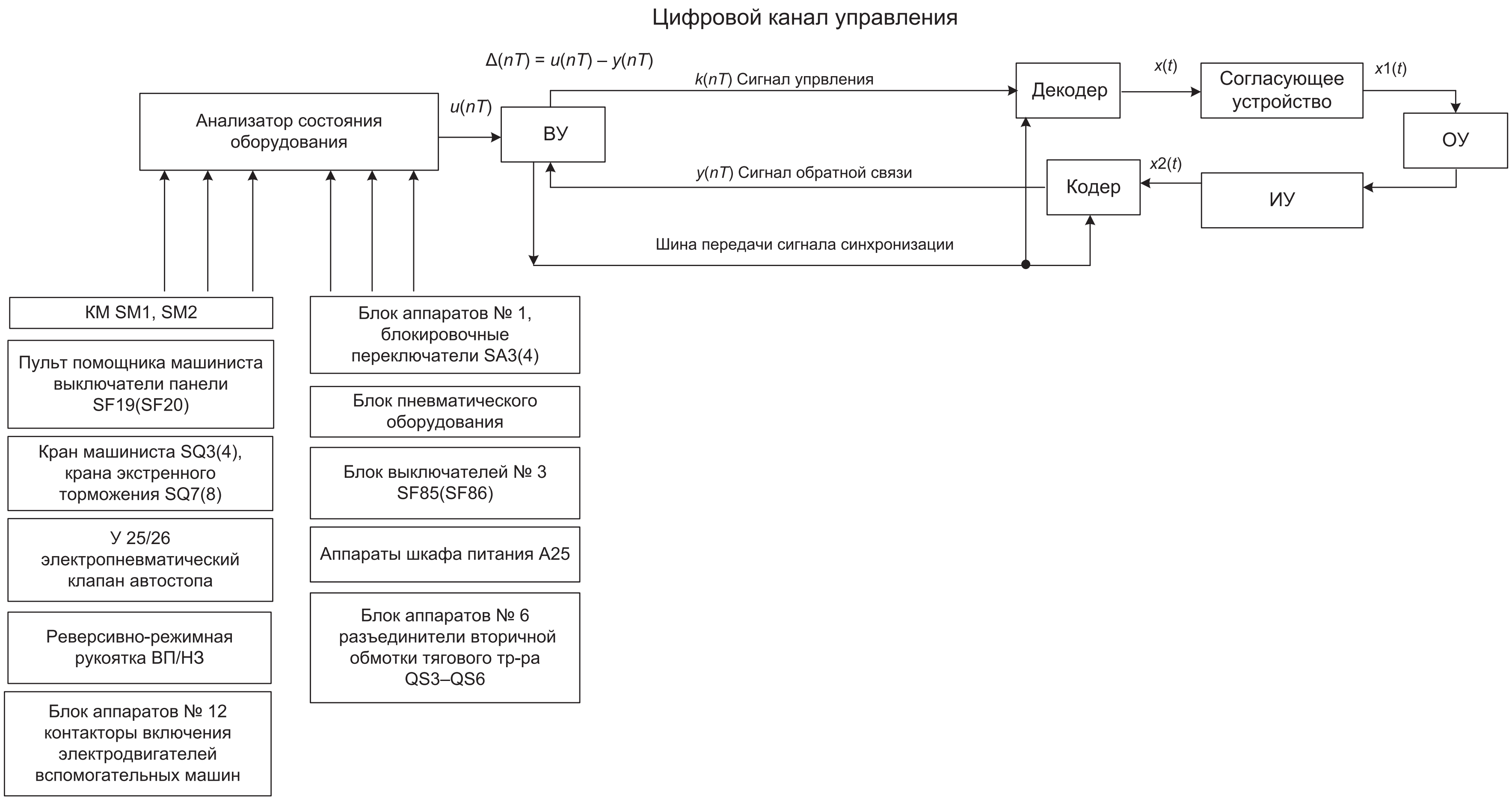


Рис. 1. Функциональная схема цифровой подсистемы автоматического управления с обратной связью

При замене принципов передачи сигналов управления через индивидуальные каналы цифровой передачей данных посредством интерфейса необходимо спроектировать систему управления с наиболее высокими показателями безопасности и безотказности, которые могут быть обеспечены применением мажоритарной системы «два из трех с реконфигурацией» («2v3P») [2, 6] (рис. 2). Система «2v3P» состоит из трех параллельно работающих каналов управления. При отказе одного из них система отключает его, таким образом реконфигурируется в систему с дублированием каналов «два из двух» («2v2»). Цифровые сигналы управления $u\,(nT)$ в соответствии с диаграммой замыкания контакторов на позициях контроллера подаются через вычислительные устройства (ВУ) на соответствующие блоки исполнительных аппаратов по параллельно работающим каналам через безопасные устройства сравнения. Устройства безопасного сравнения считаются абсолютно надежными. Граф состояний системы «2v3P» приведен на рис. 3.

Принципы работы мажоритарной системы «2v3P» характеризуется следующими состояниями:

• система работоспособна (Р), если работоспособны хотя бы два канала из трех (состояния 1, 2, 3, 4). Вероятности нахождения мажоритарной системы в состоянии 1 $P_{2v3} = e^{-3\lambda t}$, в состояниях 2, 3, 4 $P_{2v3} = e^{-2\lambda t}(1-e^{-\lambda t})$;

• при отказе двух каналов система переходит в защитное (З) состояние (состояния 5, 6, 7). Вероятность нахождения мажоритарной системы в состоянии 5, 6, 7 $P_{2v3} = e^{-\lambda t}(1-e^{-\lambda t})^2$;

• при отказе трех каналов система переходит в опасное (О) состояние (состояние 8);

• при отказе одного канала его выходы отключаются и структура «2v3P» реконфигурируется в структуру «2v2».

Вероятность безотказной работы (ВБР) P_{2v3P}, согласно графу состояний, определяется суммой вероятностей рабочих состояний системы:

$$P_{2v3P} = P1 + P2 + P3 + P4 = 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}.$$

Вероятность безопасной работы $P_{Б2v3P}$ определяется суммой вероятностей рабочих и защитных состояний системы:

$$P_{Б2v3P} = P1 + P2 + P3 + P4 + P5 + P6 + P7 = \\ = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}.$$

Для одноканальной системы показатели безотказности равны показателям безопасности:

$$P_{1v1} = P_{Б1v1} = e^{-\lambda t}.$$

Отношение ВБР мажоритарной системы к ВБР одноканальной системы равно

$$\frac{P_{2v3P}}{P_{1v1}} = \frac{3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = 3e^{-\lambda t} - 2e^{-2\lambda t}.$$

Отношение вероятности безопасной работы мажоритарной системы к ВБР одноканальной системы равно

$$\frac{P_{Б2v3P}}{P_{1v1}} = \frac{3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = 3 - 3e^{-\lambda t} + e^{-2\lambda t}.$$

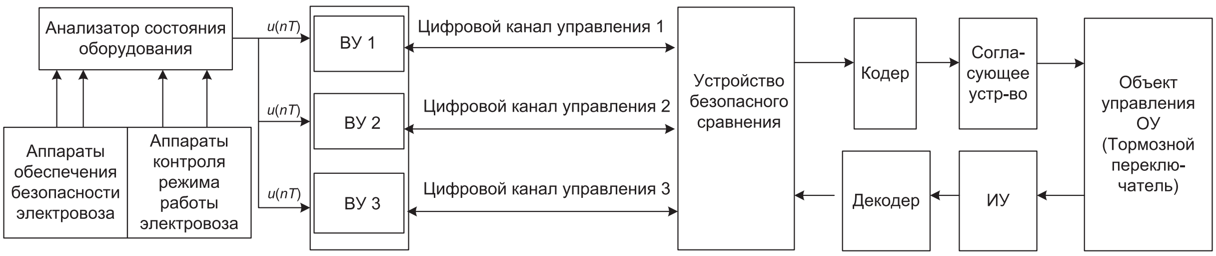


Рис. 2. Структура мажоритарной системы «2v3P»

Пусть одноканальная система (см. рис. 1) имеет следующие показатели безотказности (при $T_{\text{расч}} = 10^5$ ч):

$$\lambda = 2{,}74 \cdot 10^{-6}\ 1/\text{ч};\ P = 0{,}76;\ T_{\text{ср}} \approx 40\ \text{лет}.$$

Соотношения между безотказностью и безопасностью мажоритарной многоканальной и одноканальной систем приведены в таблице.

Результаты расчетов вероятностей безопасной и безотказной работы представлены на рис. 4, 5.

С точки зрения безотказности показатели мажоритарной многоканальной системы уступают показателям одноканальной системы. Так, в области больших значений λt ВБР мажоритарной системы становится меньше ВБР одноканальной системы (рис. 4). При $\lambda t \to \infty$ система реконфигурируется в дублированную систему с интенсивностью отказов, близкой к 2λ, среднее время наработки до отказа становится меньше наработки до отказа одноканальной системы и составляет

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty 3e^{-2\lambda t} - 2e^{-3\lambda t} = 0{,}83/\lambda.$$

Это – следствие приоритета показателей безопасности над показателями безотказности в соответствии с концепцией безопасного построения микроэлектронных систем [2].

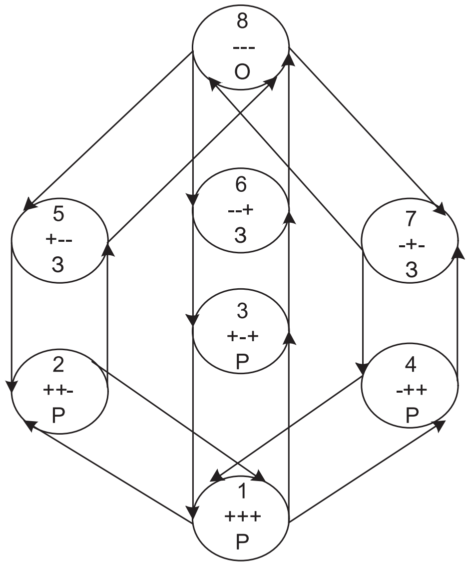


Рис. 3. Граф состояний мажоритарной системы

Наибольший выигрыш в безотказности достигается при $0{,}027 \le \lambda t \le 0{,}6$ (рис. 5). При $\lambda t \ge 0{,}6$ безотказность одного канала становится больше безотказности мажоритарной многоканальной системы из-за того, что безотказность отказоустойчивой мажоритарной системы существенно выше в первые годы работы (10^5 ч, что составляет 11,4 года). Через указанное время цифровую систему заменят

Соотношения между безотказностью и безопасностью многоканальной мажоритарной и одноканальной систем

λt, 1/ч	0,00274	0,0274	0,274	2,74
$T_{\text{расч}}$	$T_{\text{расч}} = 10^3$ ч	$T_{\text{расч}} = 10^4$ ч	$T_{\text{расч}} = 10^5$ ч	$T_{\text{расч}} = 10^6$ ч
$P_{1\text{v}1}$	0,9972	0,9729	0,7603	0,0642
$P_{2\text{v}3\text{Р}}$	0,9999	0,9978	0,8552	0,0119
$P_{\text{Б}2\text{v}3\text{Р}}$	0,9999	0,9999	0,9861	0,1814
$\dfrac{P_{2\text{v}3\text{Р}}}{P_{1\text{v}1}}$	1,0027	1,0255	1,1247	0,1853
$\dfrac{P_{\text{Б}2\text{v}3\text{Р}}}{P_{1\text{v}1}}$	1,0027	1,0278	1,3011	2,8354

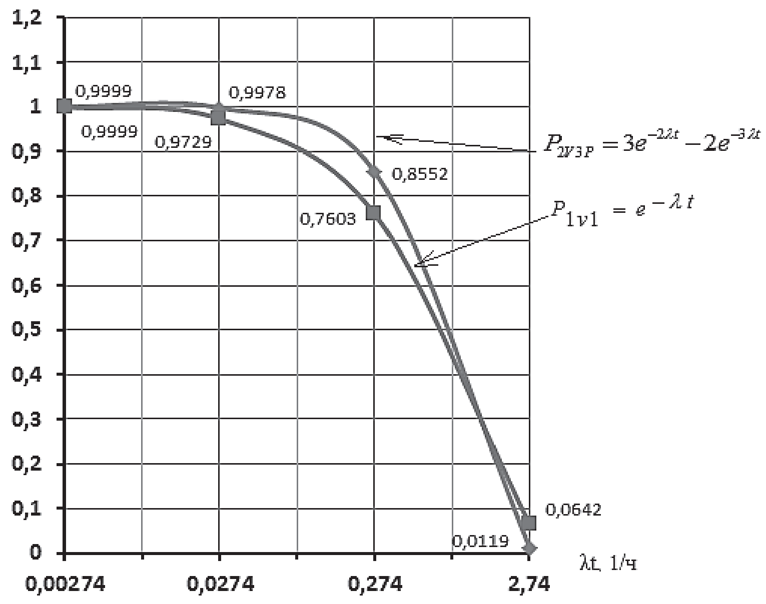


Рис. 4. Вероятности безотказной работы мажоритарной многоканальной системы и одноканальной системы P_{1v1}

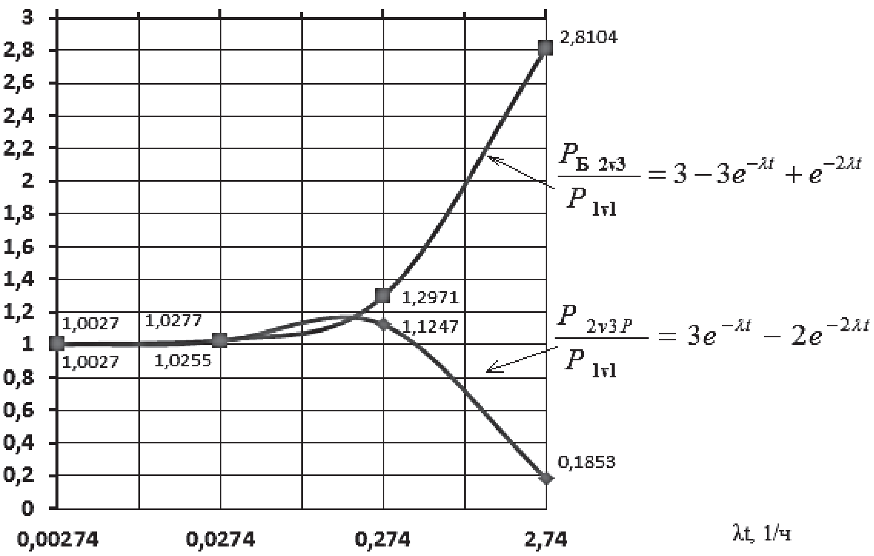


Рис. 5. Соотношения между безопасностью и безотказностью многоканальной мажоритарной и одноканальной систем

или проведут ремонтно-восстановительные работы для увеличения её ресурса.

С точки зрения безопасности наилучшие показатели имеет мажоритарная многоканальная система «2v3P». Из рис. 5 видно, что в области больших значений λt вероятность безопасной работы системы P_{2v3P} в три раза превышает величину P_{1v1} ($\lim\limits_{t\to\infty}\frac{P_{Б2v3}}{P_{1v1}} = 3$), поскольку опасный отказ в ней происходит при одновременном отказе всех трех каналов [6, 7].

Заключение

Достижение определенного уровня безопасности микроэлектронных систем – актуальная задача, которая ранее не ставилась перед релейными системами управления.

Микроэлектронные системы управления, согласно концепции безопасности, необходимо проектировать так, чтобы одиночные дефекты аппаратных и программных средств не приводили к опасным отказам и обнаруживались раньше, чем в системе возникнет второй дефект. В связи с этим для повышения уровня безопасности допускается снижение других показателей надежности.

Наилучшими показателями безопасности обладает многоканальная мажоритарная система «2v3Р».

Библиографический список

1. Опарина Е. В. Аспекты безопасности и надежности при проектировании оптимизированной подсистемы управления электромеханическими аппаратами ЭПС / Е. В. Опарина // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы 5-й междунар. науч.-практич. конф., посвященной 40-летию начала строительства Байкало-Амурской магистрали : в 2 т. Т. 2. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2014. – С. 394–398.

2. Опарина Е. В. Оптимизация системы управления электрическими аппаратами электровозов ЭП1, ЭП2К с помощью мультиплексных каналов / Е. В. Опарина, А. Я. Якушев // Изв. ПГУПС. – 2013. – № 2 (35). – С. 192–200.

3. Плис В. И. Электронные системы управления электровозами и коллекторными тяговыми двигателями / В. И. Плис, Б. К. Сокут // Вестн. ВЭлНИИ. – 2008. – № 2 (56). – С. 179–188.

4. Покровский С. В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / С. В. Покровский, М. И. Корешков, С. В. Волконовский, А. И. Шутко. – М. : Интекст, 2009. – 356 с.

5. Сапожников Вл. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи : учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М. : УМК МПС РФ, 2003. – 262 с.

6. Сапожников Вл. В. Сертификация и доказательство безопасности систем железнодорожной автоматики / Вл. В. Сапожников, В. В. Сапожников, В. И. Талалаев. – М. : Транспорт, 1997. – 288 с.

7. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники / Б. С. Сотсков. – М. : Высш. шк., 1970. – 269 с.

8. Хвощ С. Т. Мультиплексные каналы межмодульного обмена корабельных систем / С. Т. Хвощ, В. В. Дорошенко, С. В. Бочкарев и др. – Л. : ЦНИИ «Румб», 1986. – 144 с.

References

1. Oparina Ye. V. Aspekty bezopasnosti i nadezhnosti pri proyektirovanii optimizirovannoy podsistemy upravleniya elektromekhanicheskimi apparatami EPS [Aspects of Security and Failure Survival in Designing Optimised Subsystem for Electric Rolling Stock Electromechanical Devices Control]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: materialy 5-oy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf., posvyashchennoy 40-letiyu nachala stroitelstva Baykalo-Amurskoy magistrali* (*Transport Infrastructure of the Siberian Region: Proc. of the 5th Intl. Sci. and Practice Conf., Dedicated to the 40th Anniversary of the Start of Construction of the Baikal-Amur Mainline*). Vol. 2. Irkutsk, Izdatelstvo IrGUPS, 2014. Pp. 394-398.

2. Oparina Ye. V. & Yakushev A.Ya. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ*., 2013, Is. 2 (35), pp. 192-200.

3. Plis V. I. & Sokut B. K. *Vestnik VElNII – Proc. of Electric Locomotive Building Research and Design Institute*, 2008, no. 2 (56), pp. 179-188.

4. Pokrovskiy S. V., Koreshkov M. I., Volkonovskiy S. V. & Shutko A. I. Sistema upravleniya i diagnostiki elektrovoza EP10 [Control and Diagnostics System of the EP10 Electric Locomotive]. Moscow, Intekst, 2009. 356 p.

5. Sapozhnikov Vl. V., Sapozhnikov V. V. & Shamanov V. I. Nadezhnost sistem zheleznodorzhnoy avtomatiki, telemekhaniki i svyazi [Security of Railway Automatics, Telemechanics and Communication Systems]. Course guide. Moscow, UMK MPS RF, 2003. 262 p.

6. Sapozhnikov Vl. V., Sapozhnikov V. V. & Talalayev V. I. Sertifikatsiya i dokazatelstvo bezopasnosti sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki [Certification and Safety Proof of Railway Automatics Systems]. Moscow, Transport, 1997. 288 p.

7. Sotskov B. S. Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti elementov i ustroystv avtomatiki i vychislitelnoy tekhniki [Foundations for Theory and Calculation of Safety of Automatics and Computing Elements and Devices]. Moscow, Vysshaya shkola, 1970. 269 p.

8. Khvoshch S. T., Doroshenko V. V., Bochkarev S. V., Lebedev V. T. & Vasilyev A. N. Multipleksnyye kanaly mezhmodulnogo obmena korabelnykh sistem [Multiplex Channels for Inter-Module Exchange of Ship Systems]. Leningrad, TsNII Rumb, 1986. 144 p.

ЯКУШЕВ Алексей Яковлевич – канд. техн. наук, доцент, профессор, el_tyaga@mail.ru; ПЛАКС Алексей Владимирович – д.т.н., профессор, профессор; *ОПАРИНА Екатерина Владимировна – аспирант (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

ОБЩЕТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

УДК 681.300

Е. Ю. Бурсиан

ПОСТРОЕНИЕ БАЗ ДАННЫХ ЭТАЛОННЫХ СИМВОЛОВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РАСПОЗНАВАНИИ ТЕСТОВ

Дата поступления: 27.07.2015
Решение о публикации: 08.09.2015

Цель: Исследовать процесс автоматического распознавания тестов, применяемых для самопроверки и контроля знаний студентов; определить и повысить эффективность алгоритмов обработки отсканированного изображения рукописных текстов, содержащих специальные знаки и таблицы, в тестах студентов. **Методы:** Использованы методы построения скелетных представлений символов и их сравнение с эталонами. При этом базы данных скелетных представлений эталонных символов разделяются на общие и частные, дополняемыми новыми эталонами с помощью методов теории графов. Базы данных структурированы с использованием особенностей задачи. **Результаты:** В предлагаемой модели для каждого испытуемого и каждого символа построен набор скелетных представлений. Вычислена матрица подобия, элементы которой равны коэффициенту подобия между скелетными представлениями. На основе матрицы подобия построен нагруженный граф, вершины которого соответствуют распознаваемым символам, определены центры графа, радиус и степени вершин. В качестве частной базы данных скелетных графов выбрано доминирующее множество, содержащее вершины наибольшей степени и центры графа, построенного на основе матрицы подобия. В результате частные базы данных не перегружаются, так как содержат только центральные элементы. Для проверки предлагаемой модели разработана экспериментальная программа автоматической проверки тестов. **Практическая значимость:** Обращение к построенным с помощью методов теории графов частным базам данных образцов скелетных графов символов позволит повысить вероятность распознавания символов теста, а применение метрических характеристик графов в качестве параметров частных баз данных – структурировать их и оптимизировать по объёму.

Моделирование, процесс распознавания, скелетный граф, вектор информативных характеристик.

Yelena Yu. Bursian, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, bursianeu@mail.ru (Petersburg State Transport University) BUILDING REFERENCE SYMBOL DATABASES IN AUTOMATIC RECOGNITION OF TESTS

Objective: To study the process of automatic recognition of tests used for self-examination and control of students' knowledge; to determine and to increase efficiency of algorithms for processing scanned images of hand-written texts which contain special signs and tables in students' tests. **Methods:** Methods for building skeletal representation of symbols and their comparison with reference symbols were used. In the process, databases of skeletal representations of reference symbols are divided into general and specific ones, with the latter databases augmented by new reference symbols with the use of graph theory methods. Databases are structured in accordance with specific tasks. **Results:** In the model proposed, for each person undergoing test and for each symbol a set of skeletal representations is built. Similarity matrix is calculated, elements of which equate the coefficient of similarity between skeletal representations. Loaded graph is built on the basis of similarity matrix, with graph points corresponding to recognised symbols; graph centres, range and degrees of points established. Dominating set which includes graph points of the highest degree and centres of a graph built on the basis of similarity matrix was selected as a specific database. As a result, specific databases are not overloaded as they only contain central elements. An experimental automatic test check program was developed to check the proposed model. **Practical importance:** Application to specific databases of skeletal graphs of exemplary symbols built with help of graph theory methods will allow to increase probability of recognising test symbols, and the application of metric characterisation of graphs as parameters of specific databases will allow to structure them and to optimise their size.

Simulation, recognition process, skeletal graph, informative characteristics vector.

На современном этапе развития образования применяют разные формы контроля деятельности студентов, в частности, широко используется тест как текущая и периодическая форма проверки знаний.

Для самоконтроля и ускорения проверки тестов необходима система компьютерной поддержки обработки отсканированных тестов. Составляющей такой системы является комплекс программ автоматического распознавания отдельных рукописных символов и знаков.

Разработки комплексов программ распознавания отдельных рукописных символов основаны на методах общей теории распознавания, наиболее известны российские исследования в этой области Ю. И. Журавлёва, В. В. Рязанова, О. В. Сенько, Е. В. Дюковой [4]. К прикладным исследованиям относятся работы Л. М. Местецкого, Ю. В. Визильтера, Я. А. Фурмана [2, 5]. Среди иностранных исследований по анализу и обработке изображений, адаптивному бустингу известны работы R. C. Gonzalez, T. Y. Zhang, C. Y. Suen, H. Blum, R. O. Duda, P. E. Hart, P. Viola, M. Jones, S. Rosset [3, 7, 8].

Созданы комплексы программ распознавания отдельных рукописных символов для изображений хорошего качества, в частности, ABBYY FormReader, CuneiForm, OmnPage, ReadirisPro. При этом их применение для распознавания тестов не всегда удобно из-за специфики учебных дисциплин и различных методов составления тестов.

При использовании данных пакетов часто возникают затруднения при автоматической настройке на индивидуальные особенности почерка тестируемых и пишущего инструмента. Таким образом, актуальна разработка программ автоматического чтения отдельных рукописных символов и специальных знаков, пригодных для автоматической проверки тестов студентов.

В данной работе рассматривается модель процесса распознавания символов, основанная на представлении символов в виде скелетных графов и их сравнении с эталонными графами [3].

Постановка задачи

Требуется построить модель процесса автоматического распознавания изображения отдельных рукописных символов и специальных знаков, применимую в условиях многократного тестирования групп испытуемых.

На основе построенной модели необходимо разработать алгоритм распознавания изображения тестов, использующий дополнительную информацию об индивидуальных особенностях написания знаков, полученную в ходе предыдущих обращений к системе автоматического тестирования.

Далее необходимо разработать экспериментальный комплекс программ автоматической обработки тестов. При этом предполагается, что указанный программный комплекс позволит обрабатывать изображения нечётко прорисованных знаков при многократном применении к документам с повторяющимися особенностями.

Для хранения и использования информации, полученной в ходе предыдущих обращений, надо создать инструменты систематического обновления дополнительных (частных) баз данных.

Модель процесса распознавания отдельных рукописных символов теста в условиях многократного тестирования групп испытуемых

На предварительном этапе обработки отсканированного изображения удаляют шумы и помехи с последующим созданием соответствующего бинарного изображения и с выделением на нём дискретных фигур [5].

Символы предварительно классифицируют, сравнивая скелетные графы распознаваемых дискретных фигур с элементами стандартной базы эталонных графов символов [3].

На следующем этапе строят частную базу эталонных графов, предполагая, что распознаваемый тест заполнен одним почерком. Частные базы данных эталонных графов систематически обновляют и сохраняют для повторного использования.

С помощью частной базы данных вычисляют дополнительные параметры, используемые на завершающем этапе в алгоритме сравнения скелетных графов распознаваемых областей с эталонными графами. Ведение частных баз данных эталонных графов позволяет учитывать характеристики пишущего инструмента и индивидуальные особенности изображения символов тестируемым.

Построение дополнительных баз данных нагруженных графов для эталонных символов

Одним из основных параметров, содержащих информацию об индивидуальных особенностях написания символов, являются скелетные представления образцов символов (нагруженные графы эталонных символов). При построении системы скелетных представлений образцов символов применяются методы теории графов.

Множество ветвей каждого скелетного графа эталонного символа разбивается на два подмножества: основных и второстепенных ветвей (рис. 1).

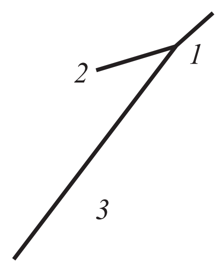


Рис. 1. Скелетный граф эталонного символа

На рис. 1 подмножество основных ветвей – $\{2, 3\}$, второстепенных – $\{1\}$. Отдельно для основных и для первоначальных скелетных представлений вычисляются топологические характеристики графов эталонных символов: $k(G)$ – число компонент связности графа G, $v(G) = p(G) - b(G) + k(G)$ – цикломатическое число ($p(G)$ – число вершин, $b(G)$ – число ребер), число ветвей, степени вершин.

Предполагается, что на этапе распознавания гомеоморфизм между скелетными графами распознаваемых и эталонных символов устанавливается отдельно для основных и для первоначальных скелетных представлений.

При вычислении векторов информативных характеристик нагруженные графы эталонных символов приводят к единому прямоугольнику расположения. Множество ветвей скелетных графов эталонных символов упорядочивают по координатам узлов.

С каждым эталонным символом сопоставляют вектор информативных характеристик – последовательность значений кодированных углов наклонов ребер на ветвях скелетных графов, взятых через равные промежутки по длине рёбер. Таким образом, для каждой ветви скелетного графа применяют цепное кодирование (вариант естественного уравнения кривой для дискретного изображения) [3].

Определение параметров множества модификаций изображения для каждого символа дополнительной базы данных

Для определения структуры множества модификаций, соответствующих различным изображениям символа, применим методы теории графов.

Множество модификаций изображения символа предлагаем представлять в виде нагруженного орграфа $G_S(V,E)$, в котором каждой вершине $v \in V$ соответствует модификация изображения символа S. Дуга $e\,(i,j) \in E$, где i, $j \in \{1, \dots, N\}$, N – число различных модификаций символа S, если в процессе построения частной базы данных будет установлено подобие между различными модификациями $v(i)$ и $v(j)$.

Для установления подобия для каждой модификации $v(i)$ вычислим вектор информативных характеристик – набор значений закодированных углов наклонов ветвей скелетных графов, взятых через равные расстояния на соответствующих ветвях:

$$\overline{\varphi}\,(i) = (\varphi_1(i),\ \dots,\ \varphi_n(i));$$

$$\varphi_k(i) \in \{0, 1, \dots m-1\},$$

где $k \in \{1, \dots, n\}$.

В качестве вектора информативных характеристик рассматривается также вектор коэффициентов дискретного преобразования Фурье углов наклонов ветвей скелетных графов:

$$c_l(j) = \sum_{k=0}^{n-1} \varphi_k(j) \exp\left(\frac{2\pi ikl}{n}\right),$$

где $l \in \{1, \dots, n\}$.

Для каждого графа $G_S(V,E)$ вычислим матрицу подобия $A = [a_{ij}]$. Дуга $e\,(i,j)$ не принадлежит $E\,(a_{ij} = 0)$, если не существует гомеоморфизма между скелетным графом, соответствующим модификации $v(i)$ и подграфом, соответствующим модификации $v(j)$, при котором расстояния между соответствующими узлами не превышают порогового значения. При этом рассматриваются только подграфы скелетных графов, в которых последовательно удаляются второстепенные ветви.

В качестве меры подобия $v(i)$ и $v(j)$ выберем цепную взаимно-корреляционную функцию $C(i,j)$:

$$C(i,j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \overline{\varphi_k(i)\varphi_k(j)};$$

$$\overline{\varphi_k(i)\varphi_k(j)} = \cos(\varphi_k(i) - \varphi_k(j)).$$

В альтернативном варианте как мера подобия рассматривается корреляционная функция $r(i,j)$:

$$r(i,j) = \frac{\sum_{k=1}^{n} \varphi_k(i)\varphi_k(j) - \varphi_0(i)\varphi(j)_0}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n} (\varphi_k(i) - \varphi_0(i))^2 \sum_{k=1}^{n} (\varphi_k(j) - \varphi_0(j))^2}}.$$

Матрица подобия вычисляется по формуле

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & C(i,j) \ge C_0, (r(i,j) \ge r_0); \\ 0, & C(i,j) < C_0, (r(i,j) < r_0). \end{cases}$$

Константы C_0 (соответственно r_0) – пороговое значение цепной взаимно-корреляционной функции (корреляционной функции). Дуга $e(i, j)$ принадлежит E при $a_{ij} = 1$, $e(i, j)$ не принадлежит E при $a_{ij} = 0$.

На следующем этапе предлагается дополнить множество дуг графа $G_S(V, E)$ с помощью евклидова расстояния между векторами информативных характеристик соответствующих вершин либо с помощью расстояния Ли [1]. Каждой дуге $e(i, j)$ приписывается метрическая характеристика – расстояние между векторами информативных характеристик модификаций $v(i)$ и $v(j)$:

$$d(i, j) = d_L(\overline{\varphi}_i, \overline{\varphi}_j).$$

Множество E дополняется дугой $e(i, j)$, если соответствующее ей расстояние Ли либо евклидово расстояние меньше порогового значения:

$$d(i, j) < d_0.$$

Расстояние Ли и нормированное расстояние Ли определим с помощью веса Ли:

$$W_L(\overline{\varphi}) = \sum_{k=1}^{n} |\varphi_k|,$$

где

$$|\varphi| = \begin{cases} \varphi, & \varphi \le \dfrac{m}{2} \\ m - \varphi & \varphi > \dfrac{m}{2} \end{cases}.$$

$$d_L(\overline{\varphi}_i, \overline{\varphi}_j) = W_L(\overline{\varphi}_i - \overline{\varphi}_j);$$

$$d_L^0(\overline{\varphi}_i, \overline{\varphi}_j) = \frac{W_L(\overline{\varphi}_i - \overline{\varphi}_j)}{n}.$$

Для описания структуры множества модификаций, относящихся к различным изображениям эталонного символа, и построения частных баз данных эталонных символов вычислим метрические характеристики неорграфа $G_S^0(V,E)$, соотнесённого с орграфом $G_S(V, E)$: центры, диаметр и радиус связных компонент графа. При этом также определим вершины с наибольшей степенью, внешне устойчивые множества вершин и ядра неорграфа $G_S^0(V, E)$ [1].

В множестве вершин неорграфа $G_S^0(V,E)$ выберем подмножество V_0, вершины которого соответствуют эталонным символам, сравниваемым с распознаваемыми символами. При этом на первом этапе рассматривается множество $V_0 = \{v_1\}$, где v_1 – вершина наибольшей степени. Если вершин наибольшей степени несколько, выбирается вершина, наиболее близкая к одному из центров связных компонент неорграфа $G_S^0(V, E)$.

На следующем этапе в множество V_0 добавляется вершина наибольшей степени неорграфа $G_S^0\,(V - v_1, E)$, т. е. подграфа, из которого исключены вершины, включённые в V_0 и т. д., пока множество V_0 не станет являться доминирующим множеством в графе $G_S^0\,(V, E)$.

При построении множества V_0 предпочтение отдаётся вершинам, наиболее близким к одному из центров связных компонент неорграфа $G_S^0\,(V, E)$ и несмежным с вершинами, уже включёнными в множество V_0. Таким образом, V_0 в наилучшем случае – одно из ядер неорграфа $G_S^0\,(V, E)$. В остальных случаях V_0 будет внешне устойчивым (доминирующим) множеством, не являясь при этом ядром.

При распознавании символов в качестве эталонных изображений символов берем те, которые соответствуют вершинам множества V_0 в неорграфе $G_S^0\,(V, E)$. При этом неорграф $G_S^0\,(V, E)$ пополняется новыми вершинами за счёт распознаваемых символов и используется в дальнейшем для статистической обработки.

Метрические характеристики неорграфа $G_S^0(V, E)$ вычисляются с помощью евклидова расстояния либо расстояния Ли. Пороговое значение p_0 в алгоритме распознавания не превышает радиуса неорграфа $p\,(G_S^0(V, E)$.

Если евклидово расстояние либо расстояние Ли между векторами информативных характеристик распознаваемого символа и эталонного символа S меньше порогового значения p_0, распознаваемый символ идентифицируется как символ S:

$$d(\overline{\varphi}, \overline{\varphi}_S) < p_0 . \quad (1)$$

При этом предполагается, что расстояния Ли между векторами информативных характеристик различных эталонных символов в случае установления гомеоморфизма между скелетными графами превышают диаметры связных компонент неорграфа $d(G_S^0(V,E))$.

Если множество вершин в неорграфе $G_S^0(V,E)$ достаточно велико для проведения статистического анализа выборки векторов информативных характеристик, то применение формулы (1) в качестве решающего правила при распознавании символов обосновывается с помощью результатов статистического анализа.

Если есть основания предполагать, что углы, соответствующие закодированным значениям, нормально распределены и ковариационную матрицу векторов информативных характеристик можно оценить, то разделяющие функции могут быть записаны в явном виде.

В качестве разделяющих функций, согласно Байесовской теории принятия решений [3], можно взять логарифм плотности нормального распределения, умноженной на вероятность появления символа S:

$$g(\overline{\varphi}_S) = -\frac{1}{2}(\overline{\varphi} - \overline{\varphi}_S)^T \Sigma_S^{-1} (\overline{\varphi} - \overline{\varphi}_S) - \\ -\frac{n}{2}\ln 2\pi - \frac{1}{2}\ln|\Sigma_S| + \ln P(S),$$

где $P(S)$ – априорная вероятность появления символа S; $|\sum_s|$ – определитель ковариационной матрицы символа.

Если вероятности появления различных символов равны, что возникает при распознавании ответов в виде целых чисел, и для гомеоморфных графов величины логарифмов модулей ковариационных матриц близки, то в качестве решающего правила применяется сравнение расстояний махаланобиса:

$$r_L(\overline{\varphi}, \overline{\varphi}_S) < r_0 ;$$

$$r_L(\overline{\varphi}, \overline{\varphi}_S) = (\overline{\varphi} - \overline{\varphi}_S)^T \Sigma_S^{-1} (\overline{\varphi} - \overline{\varphi}_S) .$$

Если предположить, что компоненты векторов информативных характеристик имеют одинаковые дисперсии и при сравнении выбираются статистически независимо, разделяющие функции могут быть приведены к виду

$$g(\overline{\varphi}_S) = (\overline{\varphi} - \overline{\varphi}_S)^T (\overline{\varphi} - \overline{\varphi}_S) = d_L^2(\overline{\varphi}, \overline{\varphi}_S).$$

Вычисление параметров множества модификаций изображения символов при построении частной базы данных

В эксперименте рассматривали модель автоматического распознавания, в которой характеристиками изображения символа считались разности между текущими и предыдущими ненулевыми изменениями углов наклона ветвей скелетных графов:

$$\overline{\varphi} = (\varphi_1, \ldots \Delta\varphi_v, \ldots, \Delta\varphi_n) ;$$

$$\Delta\varphi_i = \begin{cases} \varphi_i - \varphi_{i-1}, & \varphi_i - \varphi_{i-1} \neq 0; \\ \Delta\varphi_{i-1}, & \varphi_i - \varphi_{i-1} = 0. \end{cases}$$

В качестве порогового значения, при котором дуга считалась не принадлежащей орграфу $G_S(V,E)$ множества модификаций символа S, рассматривалось значение коэффициента корреляции между векторами углов наклона ветвей скелетных графов, равное $r_0 = 0{,}9$.

На рис. 2 представлены различные модификации изображения символа, полученные при тестировании одного из испытуемых, на рис. 3 – соответствующие скелетные графы.

В табл. 1, 2 представлены значения коэффициентов корреляции и нормированных расстояний Ли между векторами информативных характеристик для рассматриваемых модификаций символа.

Рис. 2. Модификации изображения символа

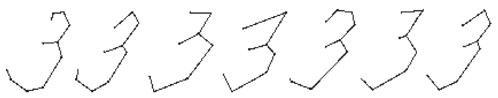


Рис. 3. Скелетные графы

По полученным значениям коэффициентов корреляции построен неорграф $G_S^0\,(V,E)$. $p(G_S^0\,(V,E)) = 0{,}446$, $d\,(G_S^0\,(V,E)) = 0{,}519$; пороговым значением, при котором изображение символа считается изображением символа S, принимается значение $p_0 = 0{,}25$. В частную базу данных эталонных скелетных графов для символа S вносятся нагруженные графы 7 и 3, соответствующие центрам неорграфа $G_S^0(V,E)$, $V_0 = \{3,7\}$ – ядро $G_S^0(V,E)$. При хорошем почерке испытуемого предлагаемый метод позволяет повысить вероятность распознавания символа до 0,95.

Заключение

Тестирование студентов необходимо проводить как на компьютере, так и на бумажном носителе информации. При этом индивидуальные особенности изображения символов испытуемыми во многих случаях затрудняют автоматическое распознавание и проверку работ непосредственно после выполнения.

В процессе учебной деятельности, как правило, один и тот же испытуемый многократно обращается к тестированию, таким образом, имеется возможность собрать необходимые

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициентов корреляции между информативными характеристиками различных модификаций символа

№	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,95	0,90	0,89	0,93	0,89	0,92
2	0,95	1	0,90	0,92	0,92	0,89	0,95
3	0,90	0,90	1	0,86	0,90	0,92	0,88
4	0,89	0,92	0,86	1	0,93	0,88	0,93
5	0,93	0,92	0,90	0,93	1	0,90	0,95
6	0,89	0,89	0,92	0,88	0,90	1	0,90
7	0,92	0,95	0,88	0,93	0,95	0,90	1

ТАБЛИЦА 2. Значения нормированных расстояний Ли между информативными характеристиками различных модификаций символа

№	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0,205	0,258	0,286	0,231	0,282	0,254
2	0,205	0	0,279	0,263	0,265	0,289	0,213
3	0,258	0,279	0	0,279	0,244	0,211	0,276
4	0,286	0,263	0,279	0	0,240	0,307	0,238
5	0,231	0,265	0,244	0,240	0	0,258	0,202
6	0,282	0,289	0,211	0,307	0,258	0	0,265
7	0,254	0,213	0,276	0,238	0,202	0,265	0

данные и построить частные базы данных скелетных графов символов.

Экспериментальные вычисления показывают, что введение дополнительных параметров и обращение к частным базам данных образцов скелетных графов символов позволяет повысить вероятность распознавания символов теста. Применение метрических характеристик графов: центров, диаметров и радиусов графов как параметров частных баз данных – позволяет их структурировать и оптимизировать по объёму.

Библиографический список

1. Берж К. Теория графов и её применения / К. Берж. – М. : Иноиздат, 1962. – 316 с.

2. Визильтер Ю. В. Построение морфологических спектров полутоновых изображений / Ю. В. Визильтер, С. В. Сидякин // Вестн. компьютерных и информационных технологий. – 2012. – № 4. – С. 8–17.

3. Дуда Р. О. Распознавание образов и анализ сцен / Р. О. Дуда, П. Е. Харт. – М. : Мир, 1976. – 507 с.

4. Журавлев Ю. И. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю. И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. В. Сенько. – М. : Физматлит, 2005. – 159 с.

5. Местецкий Л. М. Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры / Л. М. Местецкий. – М. : Физматлит, 2009. – 288 с.

6. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон. – М. : Мир, 1976. – 593 с.

7. Rosset S. Boosting as a Regularized Path to a Maximum Margin Classifier / S. Rosset, J. Zhu, T. Hastie // J. Mach. Learn. Res. – 2004. – N 5. – P. 941–973.

8. Viola P. Robust real-time face detection / P. Viola, M. Jones // Int. J. Comput. Vision. – 2004. – Vol. 57, N 2. – P. 137–154.

References

1. Berzh K. Teoriya grafov i yeyo primeneniya [Graph Theory and Its Applications]. Moscow, Inoizdat, 1962. 316 p.

2. Vizilter Yu. V. & Sidyakin S. V. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy – Computer and Information Technologies Newsletter*, 2012, no. 4, pp. 8-17.

3. Duda R. O. & Khart P. Ye. Raspoznavaniye obrazov i analiz stsen [Image Recognition and Scene Analysis]. Moscow, Mir, 1976. 507 p.

4. Zhuravlev Yu. I., Ryazanov V. V. & Senko O. V. Raspoznavaniye. Matematicheskiye metody. Programmnaya sistema. Prakticheskiye primeneniya [Recognition. Mathematical Methods. Program System. Practical Applications]. Moscow, Fizmatlit, 2005. 159 p.

5. Mestetskoy L. M. Nepreryvnaya morfologiya binarnykh izobrazheniy: figury, skelety, tsirkulyary [Continuous Morphology of Binary Images: Figures, Skeletons, Circulars]. Moscow, Fizmatlit, 2009. 288 p.

6. Piterson U. & Ueldon E. Kody, ispravlyayushchiye oshibki [Error-Correcting Codes]. Moscow, Mir, 1976. 593 p.

7. Rosset S., Zhu J. & Hastie T. Boosting as a Regularized Path to a Maximum Margin Classifier. *J. Mach. Learn. Res.*, 2004, no. 5, pp. 941-973.

8. Viola P. & Jones M. Robust real-time face detection. *Int. J. Comput. Vision.*, 2004, Vol. 57, no. 2, pp. 137-154.

БУРСИАН Елена Юрьевна – канд. техн. наук, доцент, bursianeu@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 625.142.42

Е. К. Галанов, В. Я. Соловьёва

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЦЕМЕНТА М400 В ПРОЦЕССЕ ГИДРАТАЦИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Дата поступления: 09.06.2015
Решение о публикации: 24.11.2015

Цель: Исследовать влияние концентрации и подвижности ионов и поляронов на процесс гидратации и кристаллизации цемента. **Методы:** Одним из эффективных методов контроля гидратации и кристаллизации цементов следует считать исследование электропроводности этих материалов в широком температурном диапазоне и в области частот 10–10^6 Гц. **Результаты:** Изучена электропроводность цементов М400 в процессе гидратации и кристаллизации при температурах –20…+20 °С на частоте 20 Гц. Показано, что в процессе твердения цемента с водно-цементным отношением 0,4 изменяется тип проводимости от водно-ионной до геле-ионной и электронной прыжковой. Выяснено, что гидратация цемента является важной характеристикой, определяющей его твёрдость. Показано, что процесс гидратации можно контролировать путём измерения интегральной во времени электропроводности. Достижение наивысшей электропроводности твердеющего цемента в интервале времени от 6 до 20 ч с момента приготовления цементного раствора трактуется как результат электролиза молекул воды в наноразмерном кристаллическом поле цемента. Показано, что введение ряда присадок существенно увеличивает концентрацию ионов в цементном геле и ускоряет процесс гидратации, в частности, при низких температурах. **Практическая значимость:** Метод исследования интегральной во времени электропроводности твердеющего цемента можно использовать для отработки технологии изготовления цементов при низких температурах.

Гидратация цемента, удельная электропроводность, гель, ионная электропроводность, прыжковая электронная электропроводность.

***Yevgeniy K. Galanov**, D. Eng., professor, galanov-evgenijj@rambler.ru; **Valentina Ya. Solovyeva**, D. Sci. (Chemistry), professor, (Petersburg State Transport University) A STUDY INTO ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF M400 CEMENT IN THE PROCESS OF HYDRATION AND CRYSTALLISATION

Objective: To study the influence of concentration and mobility of ions and polarons on the process of hydratation and crystallisation of cement. **Methods:** One of the recognised efficient methods for control of cement hydration and crystallisation is a study into electrical conductivity of these materials in a wide range of temperatures and in the frequency range of between 10 and 10^6 Hz. **Results:** Electrical conductivity of M400 cements was studied in the process of hydration and crystallisation at the temperatures of –20 to +20 °C at the frequency of 20 Hz. It was demonstrated that in the process of hardening of cement with the water to cement ratio of 0.4 conductivity type changes from water-ionic to gel-ionic to electronic jump. It was established that cement hydration is an important characteristic which determines its hardness. It was shown that hydration process can be controlled by measuring electric conductivity integrated in time. Achievement of highest electrical conductivity value of hardening cement in the time frame of between six and 20 hrs from the moment cement mixture was produced is understood as the result of electrolysis of water molecules in the nano-sized crystal field of cement. It was demonstrated that introducing a range of additives significantly increases the concentration of ions in cement gel and speeds up hydration process, including in low temperatures. **Practical importance:** Method of study of time-integrated electrical conductivity of hardening cement can be used for fine-tuning technologies of producing cements at low temperatures.

Cement hydration, specific conductivity, gel, ionic conductivity, jump electronic conductivity.

Цемент марки М400 относится к глинозёмным цементам, в состав которых входят оксиды CaO, Al_2O_3, SiO_2 и др. [5, 7]. При твердении цементного раствора можно выделить несколько фаз: водный раствор цемента, образование геля, кристаллизация. Образование геля сопровождается гидратацией оксидов; этот процесс определяется подвижностью ионов OH–, Ca_2+, …, которую можно исследовать, в частности, определяя электропроводность.

Твердеющий цемент можно отнести к молекулярным кристаллам, удельная электропроводность которых определяется соотношением [4, 6]:

$$\sigma = \sum \mu_i n_i,$$

где i – тип носителя заряда; n_i и μ_i – концентрация и подвижность носителей, соответственно. В водном растворе и геле носителями заряда являются ионы (в водном растворе эти ионы можно считать свободными носителями заряда).

При кристаллизации вклад в величину электропроводности вносит электронная проводимость – прыжковая проводимость.

Исследование потенциального рельефа

В качестве образцов использовали растворы цемента М400. Водно-цементное отношение образцов в/ц = 0,4.

Электропроводность измеряли на частоте f = 20 Гц (на этой низкой частоте влиянием ёмкости образцов на результаты измерений можно пренебречь, так как ёмкостное сопротивление на 4–5 порядков больше активного сопротивления). Измерения проводили при температурах термостатирования образцов +20 °С, 0, –10 и –15 °С. Для уточнения механизма проводимости (ионного, электронного) исследовали электропроводность при постоянном токе.

Образцы цементных растворов приготавливали и выдерживали в течение 15 мин при температуре +20 °С, затем помещали в термостаты с соответствующими температурами (–15 °С – образец 1а, –10 °С – 1б, 0 °С – 1в, +20 °С – 1г.

Исследование электропроводности образцов 1г при их реперном охлаждении до –15 °С в разное время от момента приготовления образца позволило определить состав фаз: водоцементный раствор, гель, кристалл.

При понижении температуры образцов 1г до –15 °С через 15 мин с момента приготовления их электропроводность уменьшалась на 2–3 порядка (рис. 1), что обусловлено кристаллизацией воды (водно-ионного раствора цемента). При охлаждении образцов 1 г до –15 °С после 2–3 и более ч с момента приготовления их электропроводность, определяемая подвижностью ионов в геле, уменьшалась не более чем в 3–5 раз (рис. 1).

На рис. 1 представлена электропроводность образца 1г при температуре +20 °С (здесь же даны реперные точки электропроводности в отдельные моменты твердения образца, измеренной при температуре –15 °С), а также вклад в общую электропроводность различных механизмов проводимости: ионной проводимости раствора вода – цемент, ионной проводимости геля, электронной (прыжковой) проводимости кристаллической решётки.

Процесс гидратации характеризуется образованием геля, в котором ионы (прежде всего,

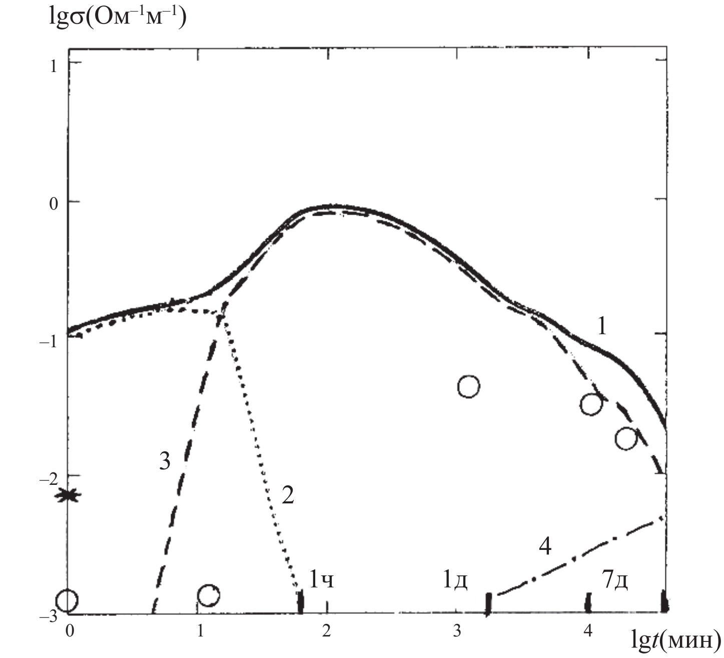


Рис. 1. Электропроводность:
1) удельная электропроводность σ цемента М400 (в/ц = 0,4) при температуре термостатирования 20 °С; 2) ионная электропроводность водно-ионного раствора; 3) ионная электропроводность цементного геля; 4) электронная электропроводность кристаллического цемента; t – время с момента приготовления цементного раствора; O – электропроводность цемента при температуре –15 °С; * – электропроводность воды

ОН– и Ca_2+) перемещаются в потенциальном рельефе гелевой решётки, преодолевая потенциальные барьеры решётки. Подвижность этих ионов определяется соотношением

$$\mu = c \cdot D = c \cdot \exp \times$$
$$\times \{-2/h \cdot \sqrt{} (2m\,(\Delta U - kT)) \cdot \Delta x\},$$

где c = const; D – вероятность (средняя) перехода через потенциальный барьер; m – масса иона ОН–; ΔU – высота потенциального барьера (средняя); kT – энергия иона; Δx – ширина потенциального барьера (взята на уровне атомных расстояний Δx = 10 – 10 м); h – постоянная Планка.

По данным измерений электропроводности образцов 1г, находящихся в гелевом состоянии, при температурах –15, 0 и +20 °С определена величина потенциального барьера $\Delta U_{ср}$ = 0,04 эв.

При температуре +20 °С вероятность (средняя) перехода через потенциальный барьер составляет D = 0,4 · 10 – 5. Эта малая вероятность определяет диффузию ионов в решётке геля, оказывает решающее влияние на величину электропроводности и вносит свой вклад в скорость кристаллизации цемента (которая происходит в пространственных пределах образца от нанометра до микрона).

Гидратация активно происходит вплоть до достижения максимальной гелевой электропроводности. Достижение максимума гелевой электропроводности (рис. 1) означает, что скорость кристаллизации начинает превышать скорость гидратации. Последующая кристаллизация может иметь различные фазы, при которых меняются симметрия кристаллической решётки и электронная электропроводность.

В процессе затвердевания образца, когда он представляет собой гель, наблюдается максимальная ионная электропроводность σ_{max}. Этот параметр может служить качественной оценкой фазового состава образца (по процентному содержанию геля при кристаллизации образца)

$$K = \sigma/\sigma_{max}.$$

Как видно из рис. 1, после 28 дней гидратации и кристаллизации образцов 1г (термостатирование при +20 °С) содержание геля составляет K = 3 % от общей массы образца.

После 28 дней от момента изготовления образца 1 г его удельная электропроводность электронного типа равна $\sigma_{эл} \approx 0{,}003$ Ом – 1 м – 1. Исследования электропроводности этого образца (в кристаллической фазе) при температуре –15 и +20 °С показали, что механизм электронной электропроводности определяется энергией активации ΔE [2], равной $\Delta E = 0{,}2$ эв.

Температурная зависимость электропроводности

Электропроводность образцов цемента М400 (в/ц = 0,4) в процессе затвердевания исследована также при температуре термостатирования 0 °С (образец 1в), –10 °С (1б), и –15 °С (1а) через 15 мин с момента приготовления (при температуре +20 °С) цементного раствора (рис. 2).

Температура термостатирования влияет на процесс гидратации и содержание геля в образце. В образце 1а, термостатированном при –15 °С, через 28 дней содержание геля составляет К = 80–70 %; при –10 °С – 10 %; при 0 °С – ≈ 20 %.

При термостатировании при температуре –15 °С образцы 1а через 28 дней содержат не только гель и кристаллический цемент, но и водно-цементный раствор. Электропроводность этих образцов при температурах –15 и +20 °С различается более чем на два порядка (см. рис. 1, 2), что указывает на наличие в них водно-цементного раствора. В образцах 1б, 1в и 1г, термостатированных при температурах –10, 0 и +20 °С, проводимость после 28 дней затвердевания изменяется только в 3–5 раз; через 28 дней эти образцы представляют собой кристаллический цемент, содержащий гель.

Гидратация при низких температурах термостатирования в значительной мере зависит от начала (с момента приготовления раствора) термостатирования (на рис. 1 видно: если образец находится при температуре +20 °С в течение первых 2–3 ч, то достигаются максимальная электропроводность и, следовательно, концентрация ионов ОН–, Ca_2+). С увеличением этого интервала с 15 мин до 2 ч электропроводность, характеризующая процесс гидратации, увеличивается в 4–5 раз. Повышение концентрации ионов до начала низкотемпературного термостатирования способствует ускорению процесса гидратации.

Для подтверждения этой зависимости в качестве водного раствора использовался раствор медного купороса ($CaSO_4 5\ H_2O$). Исходная концентрация водного раствора медного купороса должна быть оптимальной. При его концентрации $n \geq 0{,}4$ % максимальная электропроводность цементного раствора (в процессе твердения) превышает электропроводность исходного водного раствора цемента не более чем в 1,5 раза, что указывает на малую концентрацию ионов ОН– и Ca_2+. Эти образцы быстро кристаллизуются в течение 1–2 дней (за это время электропроводность образцов уменьшается на два порядка). Малая концентрация ионов ОН– и Ca_2+ в геле, а также быстрая кристаллизация цементного раствора означают малую степень гидратации цементного камня. При концентрациях водного раствора медного купороса $n \leq 0{,}25$ % влияние ионов Cu+2 и SO–24 на гидратацию и кристаллизацию цементного раствора незначительно по сравнению с образцами, изготовленными на основе водного раствора.

Наиболее эффективными для процесса гидратации и ускорения кристаллизации цемента следует считать узкий диапазон концентраций $n = 0{,}3 \pm 0{,}02$ % водного раствора медного купороса (рис. 3, 4). При использовании этого раствора электропроводность геля повышается в 4–6 раз по сравнению с образцом 1г

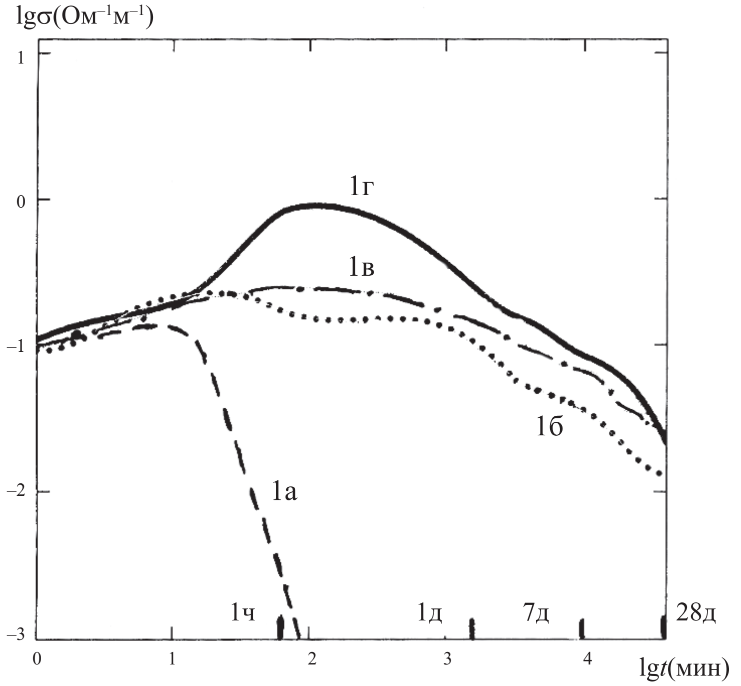


Рис. 2. Удельная электропроводность σ цемента М400 (в/ц = 0,4)
при температурах термостатирования, °С:
1г – +20; 1в – 0; 1б – –10; 1а – –15

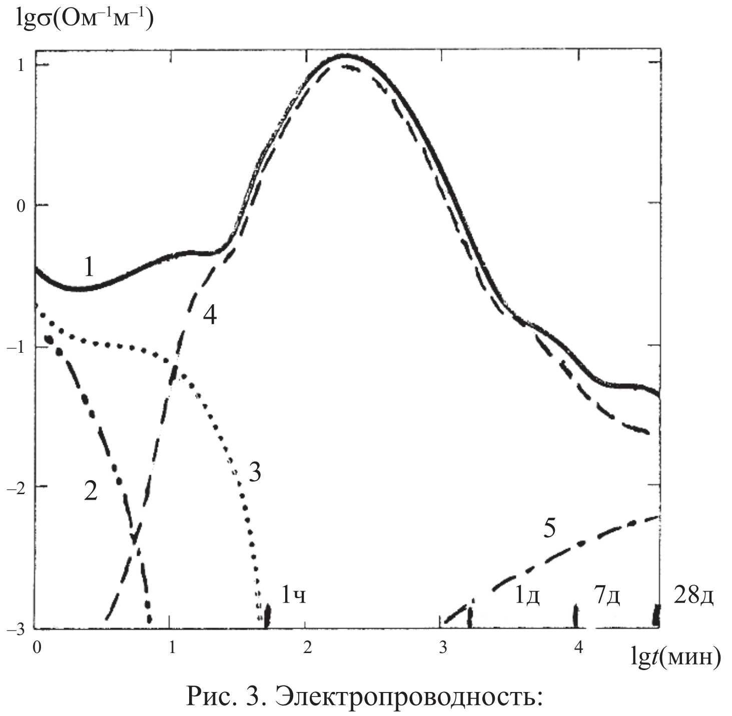


Рис. 3. Электропроводность:
1) удельная электропроводность σ цемента М400 (в/ц = 0,4) при температуре термостатирования +20 °С; водный раствор (H_2O + 0,3 % $CuSO_4 \cdot 5H_2O$);
2) электропроводность водно-ионного раствора (H_2O + 0,3 % ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)) цемента;
3) электропроводность водно-ионного раствора (H_2O + OH–, Ca_2+) цемента;
4) ионная электропроводность цементного геля; 5) электронная электропроводность кристаллического цемента

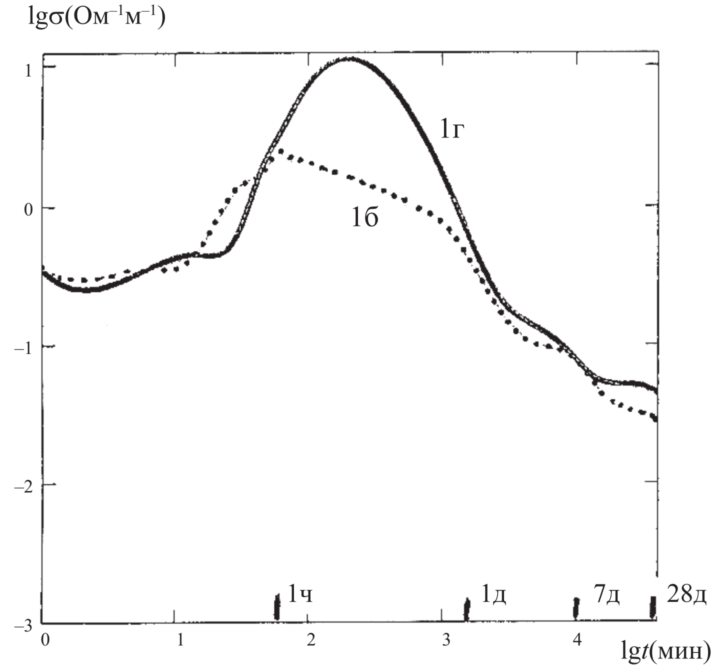


Рис. 4. Удельная электропроводность σ цемента М400 (в/ц = 0,4; водный раствор (H_2O + 0,3 % ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$)) при температурах термостатирования, °С: 1г – t = +20; 1б – t = –10

(см. рис. 1, 3), следовательно, во столько же раз повышается концентрация ионов ОН– и Ca_2+, участвующих в процессе гидратации. После 7 дней затвердевания процентное содержание геля в цементном камне не превышает К = 2 %.

Процесс гидратации определяется концентрацией и подвижностью ионов в цементном растворе (и геле), поэтому можно считать, что для видов цемента одинакового состава количество гидратированных молекул определяется интегралом

$$N = c \cdot \int_0^t \sigma \cdot dt, \quad (1)$$

где c – константа, определяемая составом цемента; σ – удельная электропроводность; t – время затвердевания. Формулу (1) можно использовать для определения влияния присадок на степень гидратации цементного камня.

Сравнивая интегральную во времени электропроводность (1) цементного камня, полученного с помощью раствора, содержащего 0,3 % медного купороса (см. рис. 3), и водного раствора (см. рис. 1) при одинаковой температуре термостатирования +20 °С, можно заключить, что количество гидратированных молекул, образовавшихся за 4 дня в первом случае, равно количеству гидратированных молекул, образовавшихся за 28 дней во втором случае.

Как правило, гидратация цемента в процессе его затвердевания связывается с наличием ионов Ca_2+ и ОН– [5, 7]. Однако наличием только этих ионов нельзя объяснить максимальную электропроводность цемента, которая наблюдается в течение 2–10 ч (с момента приготовления цементного раствора), т. е. когда раствор превращается в цементный камень. Измерения электропроводности перенасыщенного водного раствора (H_2O + CaO + Ca_2 + + ОН –) показывают, что его удельная электропроводность не превышает σ = 0,15 Ом – 1 м – 1 (t = 20 °С), что на порядок меньше удельной электропроводности цементного раствора (см. рис. 2 1г, рис. 3 1г) в течение двух дней. Высокую электропроводность цементного геля следует объяснить следующим механизмом. Попадая в кристаллические структуры твердеющего цемента, структурные кластеры свободной воды $(H_2O)n$ распадаются на отдельные молекулы [1, 3]. Высокую электропроводность цементного раствора и цементного геля следует объяснить наличием в твердеющем цементе ионов H+ и H_3+O, образующихся в результате электролиза молекул воды в кристаллическом поле глинозёмных зёрен цемента и далее – в кристаллическом поле твердеющего цемента.

Выводы

Таким образом, исследования электропроводности образцов цемента при переменном и постоянном токе в температурном диапазоне –15…+20 °С позволяют определить фазовый состав образцов (водно-цементный раствор, гель, кристалл) и скорость гидратации цемента.

Библиографический список

1. Лаврова Г. В. Нанокомпозитные протонные проводники с мезопористыми оксидными добавками как перспективные мембраны для топливных элементов / Г. В. Лаврова, В. Г. Пономарёва, И. В. Пономаренко и др. // Электрохимия. – 2014. – Т. 50, № 7. – С. 676–686.

2. Марч Н. Коллективные эффекты в твёрдых телах и жидкостях / Н. Марч, М. Паринелло. – М. : Мир, 1986. – 320 с.

3. Новаковская Ю. В. Природа водородной связи и сопряжение в водородно-связанных системах // Журнал физ. химии. – 2012. – Т. 86, № 9. – С. 1493–1508.

4. Поуп М. Электронные процессы в органических кристаллах. В 2 т. / М. Поуп, Ч. Свенберг ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985.

5. Ратинов В. Б. Добавки в бетон / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. – М. : Стройиздат, 1989. – 188 с.

6. Чеботин В. Н. Электрохимия твёрдых электролитов / В. Н. Чеботин, М. В. Перфильев ; под ред. В. Н. Чеботина. – М. : Химия, 1978. – 312 с.

7. Шейкин А. Е. Цементный бетон высокой морозостойкости / А. Е. Шейкин, Л. М. Добшиц. – Л. : Стройиздат, 1989. – 128 с.

References

1. Lavrova G. V., Ponomareva V. G., Ponomarenko I. V., Kirik N. F. & Uvarov S. D. *Elektrokhimiya – Electrochemistry*, 2014, vol. 50, no. 7, p. 676-686.

2. March N. & Parinello M. Kollektivnyye effekty v tverdykh telakh i zhidkostyakh [Collective Effects in Solid Bodies and Liquids]. Moscow, Mir, 1986. 320 p.

3. Novakovskaya Yu. V. *Zhurnal fizicheskoy khimii – Physical Chemistry J.*, 2012, vol. 86, no. 9, pp. 1493-1508.

4. Poup M. & Svenberg Ch. Elektronnyye protsessy v organicheskikh kristallakh [Electronic Processes in Organic Crystals]. Two vols. Moscow, Mir, 1985.

5. Ratinov V. B. & Rozenberg T. I. Dobavki v beton [Concrete Additives]. Moscow, Stroyizdat, 1989. 188 p.

6. Chebotin V. N. & Perfilyev M. V. Elektrokhimiya tverdykh elektrolitov [Solid-State Electrochemistry], ed. V. N. Chebotin. Moscow, Khimiya, 1978. 312 p.

7. Sheykin A. Ye. & Dobshits L. M. Tsementnyy beton vysokoy morozostoykosti [Highly Frost-Resistant Cement Concrete]. Leningrad, Stroyizdat, 1989. 128 p.

*ГАЛАНОВ Евгений Константинович – доктор техн. наук, профессор, galanov-evgenijj@rambler.ru; СОЛОВЬЁВА Валентина Яковлевна – доктор хим. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 62-272.2

А. В. Гусев, А. М. Орлова, Е. А. Рудакова

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВИНТОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ СЖАТИИ

Дата поступления: 05.08.2015
Решение о публикации: 15.10.2015

Цель: Увеличение высоты пружин в свободном состоянии может привести к потере их устойчивости при сжатии, поэтому целью работы является анализ методов оценки устойчивости пружины при сжатии на примере пружины с увеличенным статическим прогибом: по Нормам, аналитически и методом конечных элементов. **Методы:** В статье приведены метод оценки устойчивости пружин по Нормам, аналитически и метод конечных элементов. **Результаты:** В результате исследования выяснено, что аналитический метод расчета пружин на устойчивость дает менее жесткие требования по условию устойчивости, чем Нормы, а метод конечных элементов при расчете пружины на устойчивость позволил определить формы потери устойчивости пружины и соответствующие им величины нагрузок. Для всех рассмотренных случаев закрепления получены силы, которые приводят пружину к изгибной и радиальной формам потери устойчивости. Данные силы превосходят значение нагрузки F_{max}, приводящей к смыканию рабочих витков пружины, на величину от 15 до 46%, что подтверждает наличие у пружины достаточного запаса устойчивости. **Практическая значимость:** По результатам анализа методов расчета пружины на устойчивость предлагается использовать комплексный подход к расчету пружины на устойчивость, включающий проверку устойчивости пружины по Нормам, аналитический метод расчета и метод конечных элементов в том случае, если геометрические параметры пружины влияют на превышение нормированного значения отношения высоты ненагруженной пружины к ее среднему диаметру.

Устойчивость пружины, статический прогиб пружины, аналитический метод, оценка устойчивости, метод конечных элементов, формы потери устойчивости.

***Artem V. Gusev**, postgraduate student, agusev@tt-center.ru (Petersburg State Transport University); **Anna M. Orlova**, D. Eng., professor, deputy director general in charge of scientific and technical development, aorlova@uniwagon.com (Research and Production Corporation “United Wagon Company”); **Yekaterina A. Rudakova**, Cand. Sci. (Eng.), dynamic analysis department head, lead researcher, erudakova@tt-center.ru (Transport Technologies Centre (VNIITsTT) ANALYSIS OF METHODS OF CALCULATION FOR COIL SPRINGS BUCKLING UNDER COMPRESSION

Objective: Increasing the height of springs in a free condition can lead them to lose stability when compressed, thus the paper’s purpose is to analyse the methods of evaluation of spring stability under compression on the example of spring with increased static deflection. **Methods:** The paper presents methods for evaluating the spring’s stability by norms, analytically and by finite elements method. **Results:** The study established that analytical calculation method for spring stability results in less strict requirements for stability condition compared to norms, and finite elements method in calculation of spring stability allowed to determine forms of stability loss and corresponding load rates. For all considered cases of fixation forces that lead a spring to bending and radial forms of stability loss were established. These forces exceed the F_{max} load volume which leads to closing of working coil by between

15 and 46 per cent, which confirms that the spring has sufficient stability margin. **Practical importance:** By results of analysis of methods of calculation of spring stability, complex approach is recommended for calculation of spring stability, including spring stability check by norms, analytical calculation method and finite elements method in case spring's geometrical parameters lead to exceeding the normal value of the unloaded spring height to its average diameter ratio.

Spring stability, spring static deflection, analytuical method, stability evaluation, finite elements method, forms of loss of stabiity.

В соответствии с «Нормами для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» (далее – Нормы) [5], одним из способов снижения динамических нагрузок на путь и вагон является увеличение статического прогиба подвешивания. При этом в соответствии с требованиями ГОСТ 9246-2013 [3] должен быть достаточный коэффициент запаса прогиба подвешивания. Из-за этих обстоятельств неизбежно увеличивается высота пружин рессорного подвешивания, тогда как их диаметр ограничен базой тележки.

Увеличение высоты пружин в свободном состоянии может привести к потере их устойчивости при сжатии. В связи с этим актуальным становится совершенствование методов расчета устойчивости пружин при сжатии. В статье приведены обзор и анализ известных методов, сравнение результатов на примере пружины с увеличенным статическим прогибом.

Метод оценки устойчивости пружин по Нормам

На вновь проектируемые и модернизируемые несамоходные вагоны колеи 1520 мм в СССР распространялись Нормы от 1971 и 1983 гг. [6, 7]. В них сказано, что для обеспечения устойчивости пружин круглого сечения, работающих на сжатие, отношение высоты ненагруженной пружины H_0 к ее среднему диаметру D должно быть:

- при шарнирном закреплении опорных витков $\frac{H_0}{D} \le 1,75$;
- при жестком закреплении опорных витков $\frac{H_0}{D} \le 3,5$.

В Нормах 1996 г., актуальных на данный момент, дополнительно к условию устойчивости указана формула для определения критического значения отношения $\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{крит}}$:

$$\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{крит}} = \sqrt{\eta \frac{2-\frac{1}{1+\mu}}{1+\frac{1}{1+\mu}}},$$

где η – коэффициент, зависящий от характера закрепления опорных витков пружины; μ – коэффициент Пуассона.

Также в Нормах 1996 г. отмечено, что с учетом технологических неточностей изготовления и сложного характера эксплуатационной нагруженности пружин рессорного подвешивания вагонов при проектировании следует предусматривать достаточный запас устойчивости пружин, после которого только указаны условия $H_0/D \le 1,75$ и $\le 3,5$.

Так как увеличение высоты пружины может привести к превышению рекомендуемого Нормами значения H_0/D, предлагается сравнить условие устойчивости в Нормах с другими известными методами расчета устойчивости винтовых пружин сжатия.

Аналитический метод расчета устойчивости пружин сжатия

Почти все работы, посвященные устойчивости пружин сжатия, основаны на идее введения эквивалентного бруса [2].

В результате исследований 1910 и 1924 гг. Хурльбринк и Граммель получили квадратное уравнение для критического значения нагрузки и установили, что в отличие от действительного прямого бруса брус, эквивалентный пружине, может терять устойчивость только при определенных соотношениях первоначальной высоты пружины и ее среднего диаметра.

На основной недостаток названных работ указали Биецено и Кох в 1925 г.: при определении критической нагрузки не учитывалось влияние поперечной силы, которое в пружине гораздо более существенно, чем в прямом брусе сплошного сечения. Они учли поперечную силу и получили кубическое уравнение для критического значения нагрузки, установив, что пружина может терять устойчивость при любых соотношениях высоты пружины и ее среднего диаметра.

В 1938 г. инженер С. Д. Пономарев обобщил результаты расчета пружин на устойчивость, полученные предшествующими исследователями [8].

Другой подход к определению критического значения нагрузки на пружины сжатия предложил Н. А. Чернышев [9]. Пружина не заменялась эквивалентным прямым брусом, а рассматривалась как брус двоякой кривизны с винтовой геометрической осью. В качестве первого приближения Н. А. Чернышев получил квадратное уравнение для определения критического значения нагрузки и некоторое предельное значение отношения высоты пружины к ее среднему диаметру, ниже которого потеря устойчивости невозможна. Таким образом, с качественной стороны результаты его исследований соответствуют результатам Хурльбринка и Граммеля, но благодаря учету влияния поперечной силы полученные им численные результаты значительно отличаются от результатов его предшественников.

В 1950 г. В. М. Макушин рассчитал устойчивость витой пружины методом эквивалентного бруса с использованием динамического приема, при котором критические нагрузки на сжатый брус определяются путем рассмотрения его малых поперечных колебаний [4].

В общем случае динамический прием нахождения критического значения нагрузки заключается в том, что рассчитывается частота малых колебаний и определяется то значение нагрузки, при котором эта частота обращается в ноль, т. е. период колебаний становится бесконечно большим.

В работе [4] выражение для отношения критической осадки $\lambda_{\text{крит}}$ к высоте недеформированной пружины H_0 имеет вид

$$\frac{\lambda_{\text{крит}}}{H_0} = \frac{1}{2 - C/B_b} \times$$
$$\times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\eta_1} \cdot \frac{2 - C/B_b}{1 + C/B_n} \left(\frac{D}{H_0} \right)^2} \right], \qquad (1)$$

где $B_n = E \cdot I_n$ – жесткость изгиба проволоки относительно главной центральной оси, перпендикулярной к оси пружины, I_n – момент инерции относительно главной центральной оси n; $B_b = E \cdot I_b$ – жесткость изгиба проволоки относительно главной центральной оси, параллельной оси пружины, I_b – момент инерции относительно главной центральной оси b; $C = G \cdot I_p$ – жесткость кручения проволоки, I_p – полярный момент инерции; D – средний диаметр пружины; $1/\eta_1$ – параметр закрепления торцевых витков пружины.

Значения коэффициента $1/\eta_1$, полученные при условии, что в качестве аппроксимирующих функций выбраны фундаментальные функции собственных поперечных колебаний балок с теми же краевыми условиями, как и рассматриваемые пружины, приведены в табл. 1.

Формулу (1) можно представить в виде

$$\frac{\lambda_{\text{крит}}}{H_0} = \xi_1 \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\eta_1} \xi_2 \left(\frac{D}{H_0} \right)^2} \right],$$

где коэффициенты

$$\xi_1 = \frac{1}{2 - C/B_b} \text{ и } \xi_2 = \frac{2 - C/B_b}{1 + C/B_n},$$

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициента $1/\eta_1$ для разных вариантов закрепления пружины

Вариант закрепления пружины	Параметр закрепления $1/\eta_1$
Нижний торец заделан, верхний свободен	$\pi^2/4 \approx 2{,}46$
Оба торцевых витка шарнирно оперты	$\pi^2 \approx 9{,}87$
Нижний виток заделан, верхний шарнирно оперт	20,19
Оба торцевых витка заделаны	$4\pi^2 \approx 39{,}44$

т. е. зависят только от соотношений между жесткостью изгибов B_n и B_b и кручения C проволоки пружины.

Значение $\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}}$, при котором $\lambda_{\text{крит}}$ из действительной величины становится мнимой, называется предельным значением. По формуле Н. А. Чернышева,

$$\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{1}{\eta_1}\cdot\frac{2 - C/B_b}{1 + C/B_n}}. \qquad (2)$$

Для пружин из проволоки круглого сечения $B_n = B_b = B = E \cdot I_b$ и отношение $\frac{B}{C} = \frac{E \cdot I_b}{G \cdot I_p} = 1 + \mu$, откуда $C = \frac{B}{1+\mu}$. После преобразований формула (2) принимает вид

$$\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{1}{\eta_1}\cdot\frac{2 - \frac{1}{1+\mu}}{1 + \frac{1}{1+\mu}}}$$

и становится идентичной выражению, указанному в Нормах.

При $\frac{H_0}{D} > \left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}}$ пружина может потерять устойчивость, а при $\frac{H_0}{D} \le \left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}}$ потеря устойчивости невозможна. Это обстоятельство принципиально отличает поведение сжатой пружины от поведения сжатого стержня.

Предельное отношение $\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}}$ для разных случаев закрепления пружины приведено в табл. 2.

Таким образом, метод расчета винтовых пружин сжатия на устойчивость В. М. Макушина [4] предъявляет менее жесткие требования к соотношению высоты и среднего диаметра пружины по сравнению с Нормами.

Расчет устойчивости пружин с использованием метода конечных элементов

В качестве альтернативы аналитическим методам для уточненного расчета устойчиво-

ТАБЛИЦА 2. Предельное отношение $\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}}$ для разных случаев закрепления пружины

Вариант закрепления	Предельное отношение $\left(\frac{H_0}{D}\right)_{\text{пр}}$
Нижний торец заделан, верхний свободен	1,31
Оба торцевых витка шарнирно оперты	2,62
Нижний виток заделан, верхний шарнирно оперт	3,75
Оба торцевых витка заделаны	5,24

сти конструкции при сжатии применяют численный метод конечных элементов (МКЭ).

Потеря устойчивой формы равновесия конструкции возможна как при упругих деформациях, так и при превышении напряжений предела упругости материала. При этом для любого значения критической нагрузки характерна своя неустойчивая форма, количество которых равно количеству степеней свободы системы.

Определение потери устойчивости пружины с применением МКЭ производится в пределах ее упругой деформации и носит силовой характер, т. е. находят критическую силу, при которой пружина будет иметь определенную форму неустойчивого состояния.

Задача линейной устойчивости МКЭ решается посредством добавления дифференциальной матрицы жесткости к линейной матрице жесткости. С физической точки зрения дифференциальная жесткость характеризует линейную аппроксимацию эффекта изменения жесткости упругой системы с ростом напряжений: ослабление линейной матрицы жесткости при увеличении сжимающих напряжений и упрочнение при увеличении растягивающих напряжений [1].

Для определения критических значений (точек бифуркаций кривой равновесных состояний) используют энергетический метод, суть которого состоит в отслеживании изменения полной потенциальной энергии системы при переходе из одной формы равновесия в другую.

Решение задачи линейной устойчивости сводится к нахождению собственных значений характеристического уравнения:

$$\{[K_a] + \lambda[K_d]\} = \{0\},$$

где $[K_a]$ – линейная матрица жесткости; $[K_d]$ – дифференциальная матрица жесткости; λ – собственное значение, соответствующее критической нагрузке потери устойчивости.

Собственное значение λ является мерой пропорциональности между приложенной к пружине нагрузкой и нагрузкой, при которой возникает данная форма неустойчивости.

Среди полученных критических значений нагрузки большое значение имеет только первое, по которому в первую очередь конструкция теряет устойчивость.

Была проанализирована устойчивость внутренней подклиновой пружины для грузовой тележки с осевой нагрузкой 27 тс. Ее параметры:

Наружный диаметр, D_1, $96^{+0,5}_{-1,0}$ мм

Средний диаметр, D, $82^{+0,61}_{-1,00}$ мм

Диаметр прутка, d, $14_{-0,11}$ мм

Полное число витков, n_1, $12,9 \pm 0,25$

Число рабочих витков, n_p, $11,40 \pm 0,25$

Высота в свободном состоянии, H_0, $312 \pm \pm 2$ мм.

Как правило, на средний диаметр пружины D не назначают допуски, но для определения возможных коэффициентов устойчивости пружины $k_{уст}$, соответствующих отношению высоты ненагруженной пружины H_0 к ее среднему диаметру D, они были определены с учетом допусков на наружный диаметр и диаметр прутка пружины.

Коэффициенты устойчивости пружины по Нормам с учетом допусков на ее геометрические размеры приведены в табл. 3.

В расчетах МКЭ рассматривали пружину с геометрическими параметрами, приводящими к номинальному значению $k_{уст} = 3,8$ и мак-

ТАБЛИЦА 3. Коэффициенты устойчивости пружины

№ расчетного случая	Высота в свободном состоянии, H_0, мм	Средний диаметр пружины, D, мм	$k_{уст} = H_0/D$
1 (минимальный)	310	82,61	3,75
2 (номинальный)	312	82,00	3,80
3 (максимальный)	314	81,00	3,88

симальному $k_{уст} = 3,88$, которые превышают значения, заданные Нормами.

При определении устойчивости пружины в качестве силового воздействия принимали нагрузку на пружину, приводящую к смыканию рабочих витков пружины $F_{max} = 8,46$ кН.

Возникновение у пружины форм неустойчивого состояния при силе, превышающей F_{max}, подтверждает, что геометрические параметры и условия эксплуатации пружины не приведут к потере устойчивости пружины.

Чтобы смоделировать поведение пружины в процессе ее эксплуатации в рессорном подвешивании грузовой тележки, при расчете ее на устойчивость МКЭ рассматривали три варианта граничных условий (рис. 1).

Вариант «а» граничных условий пружины на рис. 1 описывает поведение пружины в процессе ее взаимодействия с боковой рамой (снизу жесткая заделка) и фрикционным клином (сверху шарнирное опирание). Смещение верхней опорной поверхности пружины допускается до 20 мм вдоль осей x и y. Этот случай характерен для движения вагона на прямых участках пути.

Вариант «б» граничных условий пружины на рис. 1 характерен для движения вагона в кривых и на сортировочных горках, когда к пружине, имеющей шарнирное опирание со стороны фрикционного клина, прикладывается момент $M = 65$ Н·м, эквивалентный углу наклона верхней опорной части пружины в 7,5°. Смещение верхней опорной поверхности пружины допускается до 20 мм вдоль оси x, а угол наклона – 7,5° относительно оси y.

Из варианта «в» на рис. 1 следует, что на пружину накладывается ограничение в виде заделки с двух сторон с разрешением на перемещение вдоль оси z для опорного витка в области фрикционного клина. Данный случай возможен при движении вагона на прямых участках пути.

При расчете пружины на устойчивость [10] наносили пространственную твердотельную конечно-элементную сетку (рис. 2). На опорные витки была нанесена 3D-тетраэдральная сетка с 10 узловыми и пирамидальными конечными элементами; на рабочие витки – 3D-гексаэдральная сетка с 8 узловыми элементами. Для равномерного приложения нагрузки к опорному витку и обеспечения условий закрепления на пружину нанесли 1D-соединение в области одного из опорных витков с одномерным интерполяционным элементом RBE3,

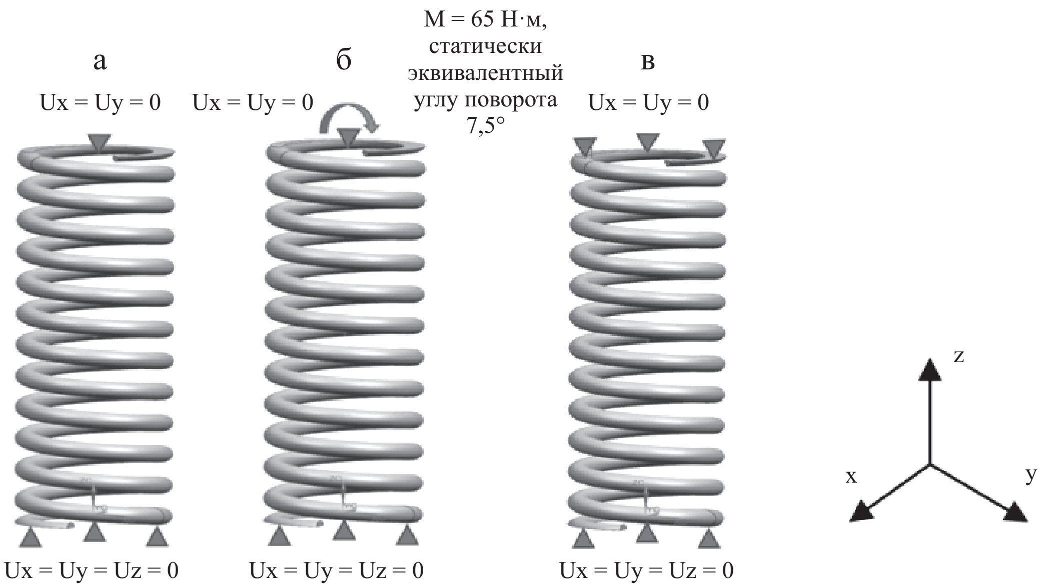


Рис. 1. Условия закрепления пружины:
а) шарнирное опирание с одной стороны; б) шарнирное опирание и момент с одной стороны; в) заделка с двух сторон

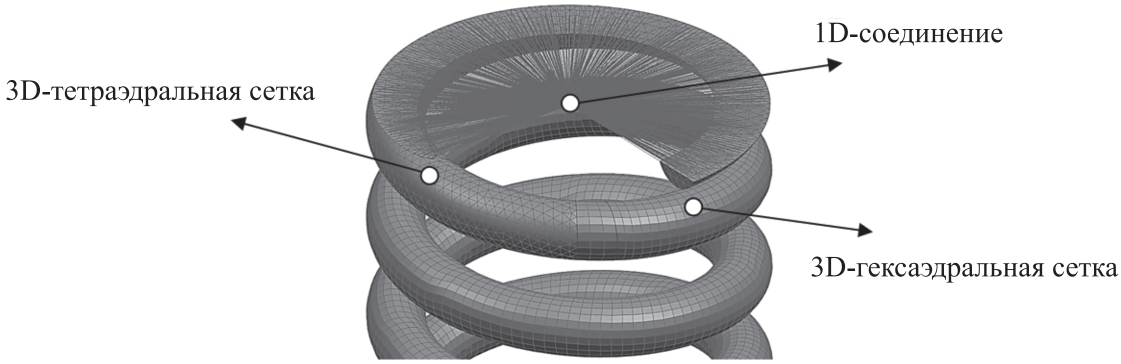


Рис. 2. Нанесение конечно-элементной сетки на пружину

который определяет перемещение мастер-узла как среднее взвешенное от перемещений других узлов.

При расчете пружины на устойчивость для каждого из трех случаев закрепления были получены изгибные и радиальные формы потери устойчивости и соответствующие им собственные значения λ (рис. 3).

Результаты расчета внутренней подклиновой пружины на устойчивость методом конечных элементов для разных способов закрепления приведены в табл. 4.

Для всех рассмотренных способов закрепления получены силы, которые приводят пружину к изгибной и радиальной формам потери устойчивости. Данные силы превосходят значение F_{max} на величину от 15 до 46 %, что подтверждает наличие у пружины достаточного запаса устойчивости.

Заключение

В статье проанализированы методы оценки устойчивости пружины при сжатии – по Нормам, аналитический и метод конечных элементов.

Анализ аналитического метода расчета пружин на устойчивость показал, что данный

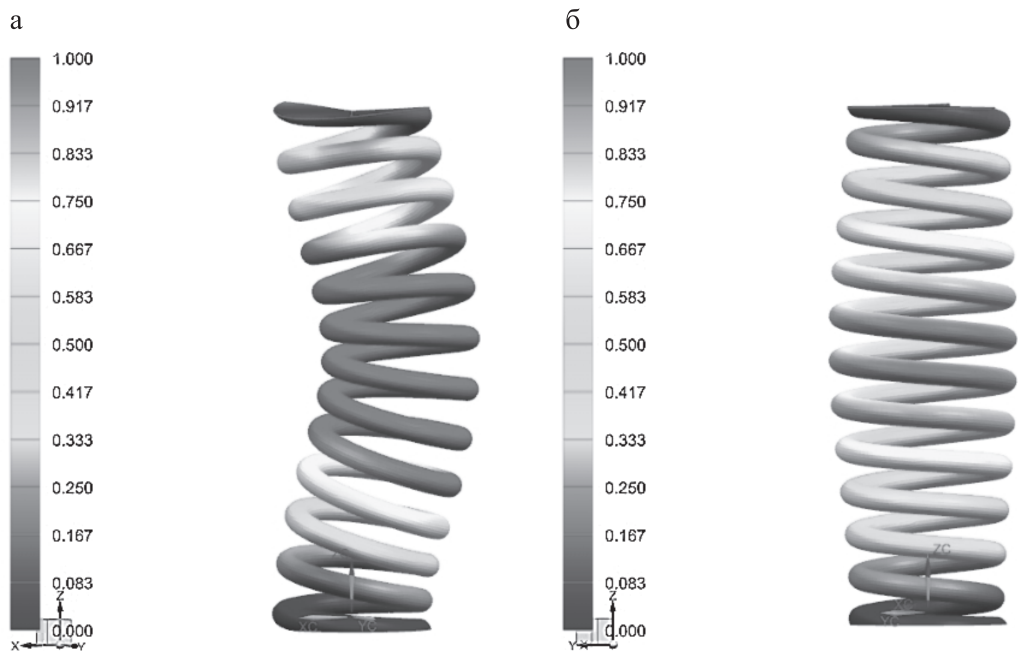


Рис. 3. Формы потери устойчивости:
а) изгибная; б) радиальная

ТАБЛИЦА 4. Результаты расчета внутренней подклиновой пружины на устойчивость методом конечных элементов при силе сжатия F_{max} = 8,46 кН

Граничные условия	Формы потери устойчивости		Геометрические параметры пружины	
			Номинальные размеры	Размеры с учетом допусков, приводящие к максимальному $k_{уст}$
Заделка с двух сторон	Изгибная	λ	1,47	1,41
		F, кН	12,41	11,92
	Радиальная	λ	1,35	1,32
		F, кН	11,43	11,12
Шарнирное опирание	Изгибная	λ	1,23	1,18
		F, кН	10,43	10,01
	Радиальная	λ	1,39	1,35
		F, кН	11,73	11,43
Шарнирное опирание и момент	Изгибная	λ	1,21	1,16
		F, кН	10,19	9,79
	Радиальная	λ	1,36	1,33
		F, кН	11,50	11,21

метод предъявляет менее жесткие требования к соотношению высоты ненагруженной пружины H_0 и ее среднего диаметра D по сравнению с Нормами.

При анализе устойчивости внутренней подклиновой пружины для грузовой тележки с осевой нагрузкой 27 тс методом конечных элементов можно оценить устойчивость пружины с помощью форм потери устойчивости и соответствующих им величин нагрузок.

Полученные величины сил превосходят значение нагрузки на пружину F_{max}, приводящей к смыканию рабочих витков, что подтверждает наличие у пружины запаса устойчивости.

По результатам анализа методов расчета пружины на устойчивость предлагается использовать комплексный подход к этому расчету. В Нормах заложен существенный запас допустимой величины отношения высоты пружины в ненагруженном состоянии к ее среднему диаметру, поэтому при расчетах пружины на устойчивость следует руководствоваться, в первую очередь, требованиями Норм. Если вновь спроектированная пружина не удовлетворяет данным требованиям, т. е. значение $\frac{H_0}{D}$ превышает допустимое, то рекомендуется использовать представленный в работе вариант оценки устойчивости пружины МКЭ с определением форм потери устойчивости пружины и соответствующих им силовых факторов.

Библиографический список

1. Данилов Ю. Практическое использование NX / Ю. Данилов, И. Артамонов. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 322 с.

2. Голев Р. В. Устойчивость пространственных упругих стержней с постоянными по длине кривизнами и кручением при статическом нагружении : дисс. … канд. техн. наук / Р. В. Голев. – Пермь, 1971.

3. ГОСТ 9246-2013. Тележки двухосные трехэлементные грузовых вагонов железных дорог колеи 1520. Общие технические условия.

4. Макушин В. М. Поперечные колебания и устойчивость цилиндрических витых пружин / В. М. Макушин // Динамика и прочность пружин : сб. ст. / под ред. С. В. Серенсена, С. Д. Пономарева. – М., 1950. – С. 354.

5. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ – ВНИИЖТ. – М., 1996.

6. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ВНИИВ – ВНИИЖТ. – М., 1983.

7. Нормы для расчета на прочность и проектирования механической части новых и модернизированных вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ВНИИЖТ. – М., 1971.

8. Пономарев С. Д. Расчет и конструкция витых пружин / С. Д. Пономарев. – М. : ОНТИ, 1938. – 352 с.

9. Чернышев Н. А. Устойчивость пружин сжатия / Н. А. Чернышев // Новые методы расчета пружин : сб. ст. – М. : МАШГИЗ, 1946. – С. 46–56.

10. Siemens PLM Software, NX Advanced Simulation, Version 8.5.

References

1. Danilov Yu. & Artamonov I. Prakticheskoye ispolzovaniye NX [Practical Application of NX]. Moscow, DMK Press, 2011. 322 p.

2. Golev R. V. Ustoychivost prostranstvennykh uprugikh sterzhney s postoyannymi po dline kriviznami i krucheniyem pri staticheskom nagruzhenii [Stability of Spatial Elastic Beams with Constant-Length Curves and Torsion under Static Load]. Perm, 1971.

3. GOST 9246-2013. Telezhki dvukhosnyye trekhelementnyye gruzovykh vagonov zheleznykh dorog kolei 1520. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya. [Two-Axle Three-Element Bogies of 1,520 mm Gauge Railway Freight Carriages. General Technical Conditions.]

4. Makushin V. M. Poperechnyye kolebaniya i ustoychivost tsilindricheskikh vitykh pruzhin [Lateral Oscillations and Stability of Cylindrical Coil Springs]. *Dinamika i prochnost pruzhin* (*Spring Dynamics and Strength*), ed. S. V. Serensen & S. D. Ponomarev. Moscow, 1950. P. 354.

5. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for Calculation and Design of Transportation Ministry Carriages for 1,520 mm Gauge Railways (Non-Self-Propelled)]; GosNIIV – VNIIZhT. Moscow, 1996.

6. Normy dlya rascheta i proyektirovaniya novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for Calculation and Design of New and Modernised Transportation Ministry Carriages for 1,520 mm Gauge Railways (Non-Self-Propelled)]; GosNIIV – VNIIZhT. Moscow, 1983.

7. Normy dlya rascheta na prochnost i proyektirovaniya mekhanicheskoy chasti novykh i modernizirovannykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamokhodnykh) [Norms for Strength Calculation and Mechanical Engineering of New and Modernised Transportation Ministry Carriages for 1,520 mm Gauge Railways (Non-Self-Propelled)]; VNIIZhT. Moscow, 1971.

8. Ponomarev S. D. Raschet i konstruktsiya vitykh pruzhin [Coil Springs Calculation and Design]. Moscow, ONTI, 1938. 352 p.

9. Chernyshev N. A. Ustoychivost pruzhin szhatiya [Pressure Spring Stability]. *Novyye metody rascheta pruzhin* (*New Methods for Spring Calculations*). Moscow, MAShGIZ, 1946. Pp. 46-56.

10. Siemens PLM Software, NX Advanced Simulation, Version 8.5.

*ГУСЕВ Артем Владимирович – аспирант, agusev@tt-center.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); ОРЛОВА Анна Михайловна – д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научно-техническому развитию, aorlova@uniwagon.com (ПАО «НПК ОВК»); РУДАКОВА Екатерина Александровна – канд. техн. наук, руководитель отдела динамических расчетов – ведущий научный сотрудник, erudakova@tt-center.ru (ООО «ВНИЦТТ»).

УДК 004.057.3

Ф. И. Кушназаров, В. В. Яковлев, О. А. Турдиев

СРАВНЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОТОКОЛОВ ДОСТУПА К ОБЛАЧНЫМ РЕСУРСАМ

Дата поступления: 23.11.2015
Решение о публикации: 28.12.2015

Цель: Дать сравнительную оценку производительности протоколов доступа к облачным ресурсам REST и SOAP, выявить эффективность протокола относительно выборки, запросов и других параметров. **Методы:** Протоколы сравнивали с помощью математических методов, результаты проверяли в Java-классах. Использовали простые запросы в HTTP методами GET и POST. **Результаты:** Подробно описаны протоколы доступа REST и SOAP к облачным ресурсам – принцип работы, формат сообщения, используемые приложения. Приведены результаты сравнения этих протоколов, выявлена производительность каждого протокола в одиночных и множественных запросах, по результатам производительности запросов определена эффективность протоколов доступа к облачным ресурсам. Также определены факторы, влияющие на производительность протоколов доступа к облачным ресурсам (помехозащищенность соединения, скорость передачи данных). **Практическая значимость:** Результаты анализа позволяют определить производительность протоколов, а также их эффективность в зависимости от области применения.

Протоколы, производительность, эффективность, компьютерные сети, облачные технологии, доступ, REST, SOAP.

Farrukh I. Kushnazarov, postgraduate student, k.farruh@bk.ru; **Valentin V. Yakovlev**, D. Eng., professor, jakovlev@pgups.ru; ***Odilzhan A. Turdiyev**, master, odiljan.turdiev@mail.ru (Petersburg State Transport University) COMPARISON OF PERFORMANCE OF CLOUD RESOURCES' ACCESS PROTOCOLS

Objective: To provide a comparative evaluation of performance of REST and SOAP access protocols for cloud resources, to determine protocol efficiency concerning access, requests and other parameters. **Methods:** Protocols were compared with the use of mathematical methods, results were checked in Java classes. Simple requests in HTTP by GET and POST methods were used. **Results:** REST and SOAP protocols for cloud resources access were described in detail – operating principle, message format, applications used. Results of comparison of these protocols provided, productivity of each protocol in single and multiple requests established, by results of request productivity cloud resource access protocols' efficiency was established. Factors that influence productivity of cloud access protocols were also established (communication interference protection, data flow speed). **Practical importance:** Analysis results allow to evaluate protocols' productivity, as well as their efficiency depending from application field.

Protocols, performance, efficiency, computer networks, cloud computing access, REST, SOAP.

Архитектура REST

Одной из проблем облачных вычислений является выбор протоколов доступа: FTP (обычно используется для доступа к облачным хранилищам), WebDAV (расширение протокола HTTP), REST и SOAP. У каждого из них есть своя область применения, достоинства и недостатки. В данной статье с теоретической точки зрения рассмотрены технологии REST и SOAP.

REST (Representational State Transfer – передача репрезентативного состояния) – это не стандарт и не спецификация, а архитектурный стиль, выстроенный на существующих хорошо известных стандартах, таких как HTTP, URI и XML. В REST-сервисах акцент сделан на доступ к ресурсам, а не на исполнение удаленных сервисов. В общем случае REST является очень простым интерфейсом управления информацией без использования каких-то дополнительных внутренних прослоек.

Термин REST ввел в 2000 г. Рой Филдинг, один из разработчиков протокола HTTP [5, 6], в качестве названия группы принципов построения веб-приложений. Филдинг описал концепцию построения распределённого приложения, при которой каждый запрос (REST-запрос) клиента к серверу содержит в себе исчерпывающую информацию о желаемом ответе сервера, и сервер не обязан сохранять информацию о состоянии клиента («клиентской сессии») [3].

Управление информацией сервиса целиком и полностью основывается на протоколе передачи данных. Наиболее распространен протокол HTTP, но в целом REST охватывает более широкую область, нежели HTTP: его можно применять и в других сетях с другими протоколами. REST описывает принципы взаимодействия клиента и сервера, основанные на понятиях «ресурса» и «глагола». В случае HTTP ресурс определяется своим URI, а глагол – это HTTP-метод.

Как уже сказано, REST определяет архитектуру «клиент – сервер», в которой клиенты получают доступ к ресурсам сервера посредством представления, экспортируемого сервером. Клиенты обращаются через единый интерфейс не прямо к ресурсам, а к их представлению. Как и многие другие типы архитектуры «клиент – сервер», REST реализуется как многоуровневая архитектура, что позволяет использовать различные возможности, предоставляемые нижними уровнями (например, выравнивание нагрузки HTTP и т. п.).

REST-сервисы достаточно просто реализовывать, поскольку они базируются на хорошо известных протоколах и не требуют от разработчика изучения разных WS-спецификаций. Самый простой REST-сервис можно создать за несколько минут: статичный XML-файл, возвращаемый веб-сервисом, это технически и есть REST-сервис, так как XML-данные запрашивались через HTTP. По виду пришедшего запроса сразу можно определить, что он делает, не разбираясь в форматах (в отличие от SOAP, XML-RPC). Данные передаются без применения дополнительных слоев, поэтому REST считается менее ресурсоемким: нет необходимости разбирать запрос, чтобы понять, что именно он должен сделать, не надо переводить данные из одного формата в другой.

Типы запросов REST

Так как разработка сервисов обычно ведется с использованием HTTP, следует использовать методы этого протокола для определения действия над ресурсом. Общеприняты следующие стандарты:

- **GET/URL/**(Index) – получение списка всех объектов. Как правило, это упрощенный список, т. е. содержащий только поля идентификатора и названия объекта, без остальных данных;
- **GET/URL/{id}** (View) – получение полной информации об объекте;
- **POST/URL/**(Create) – создание нового объекта. Данные передаются в теле запроса без применения кодирования;
- **PUT/URL/{id}** (Edit) – изменение данных с идентификатором {id}, возможно, замена данных;
- **DELETE/URL/{id}** (Delete) – удаление данных с идентификатором {id}.

Протокол SOAP

SOAP (Simple Object Access Protocol – простой протокол доступа к объектам), расширение протокола XML-RPC [2], который, в свою очередь, является одним из стандартов вызова удаленных процедур, использующий XML для кодирования сообщения и HTTP в качестве транспортного механизма.

XML-RPC. Краткие сведения

XML-RPC (Extensible Markup Language Remote Procedure Call – XML-вызов удалённых процедур) – протокол вызова удаленных процедур, который, как и любой другой интерфейс RPC, определяет набор стандартных типов данных и команд, используемых для доступа к функциональности программы, находящейся удаленно. Формат XML позволяет унифицировать передачу данных между приложениями, а использование в качестве транспорта HTTP снимает ограничения, налагаемые как на конфигурацию сети, так и на маршрут следования пакетов. Вызовы XML-RPC представляют собой простой тип данных text/xml и свободно проходят сквозь шлюзы везде, где допускается ретрансляция http-трафика [1].

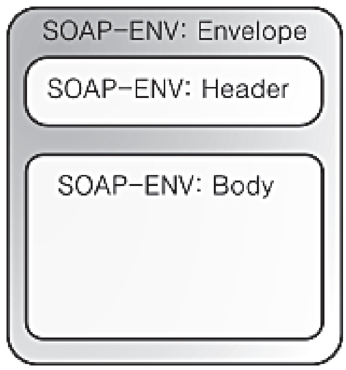
Как следует из названия данного протокола, в его основе лежит главная идея RPC – сделать вызов удаленной процедуры выглядящим по возможности так же, как вызов локальной процедуры. По-другому это можно сформулировать следующим образом: вызывающей процедуре не требуется знать, что вызываемая процедура находится на другой машине, и наоборот. Это достигается с помощью процедур-заглушек (от англ. stub – заглушка). Клиентское приложение, запрашивающее вызов удаленной процедуры, на самом деле вызывает процедуру-заглушку, список параметров которой в точности соответствует вызываемой процедуре. Затем заглушка преобразует параметры в соответствующий пакет, предназначенный для передачи по сети серверу. На стороне сервера имеется такая же заглушка, которая выполняет обратную процедуру: сетевой пакет преобразуется в список параметров, вызывается и выполняется требуемая локальная процедура, результат ее выполнения передается в процедуру-заглушку, которая формирует пакет для передачи в сеть. В конце концов, на стороне клиента этот пакет преобразуется в итоговый результат.

В XML-RPC для передачи используются девять типов данных: семь простых и два сложных. К простым относятся целые и вещественные числа, дата и время, логический тип и строки с кодировкой ASCII или base64. Сложные типы представлены структурами и массивами, причем массивы могут быть многомерными. Также поддерживается обработка ошибок: так, если при обработке запроса произошла ошибка, то в ответе будет элемент <fault>, в который будет вложена структура, содержащая числовой код ошибки и ее содержание.

Данный протокол является достаточно простым и идеально подходит для построения сервисов, поддерживающих передачу данных и не нуждающихся в сложных командах. Для систем же, работающих со сложной логикой и для передачи больших комплексных структур данных, XML-RPC является не лучшим вариантом. Именно поэтому компания Microsoft решила расширить функциональность этого протокола, что привело к появлению нового стандарта – SOAP.

Формат сообщений

SOAP-конверт содержит либо запрос на осуществление некоторого действия, либо



Структура SOAP-сообщения

ответ – результат выполнения этого действия. Конверт и его содержимое закодировано языком XML. Структура SOAP-сообщения приведена на рисунке, где конверт (Envelope), заголовок (Header) и тело (Body) являются основными частями SOAP-сообщения.

Описание работы приложения

В ходе работы были написаны два клиент-серверных приложения «Таблица факториалов» по технологиям REST и SOAP. Данные приложения выполняют аналогичные функции (добавление, просмотр, поиск, удаление), но реализованы они по-разному. Клиент обращается к серверу, на котором происходят все необходимые вычисления, затем серверные части приложений разворачиваются в облаке Microsoft.

Для написания приложений было использовано такое ПО, как JDK 1.7, Windows AzureSDK, IDEEclipse 4.4.1, плагин Windows AzureToolkitforEclipse, сервер ApacheTomcat 7.0.47, IDENetBeans 7.3.1 (для клиентской части), а также APIJAX-RS и JAX-WS. Также необходим действующий аккаунт Windows Azure.

REST-приложение

Приложение по технологии REST написано с помощью фреймворка Jersey. В дескрипторе развертывания web.xml в качестве класса сервлета указан стандартный класс из библиотеки Jersey, также указан пакет, в котором Jersey будет искать классы веб-сервиса, и URL-путь к веб-сервису.

Так как REST основан на HTTP, при передаче ответа от сервера к клиенту используются стандартные коды HTTP.

SOAP-приложение

В отличие от REST, SOAP не может использовать при ответе коды ошибок HTTP. Вместо этого в SOAP-сообщении существует элемент Fault, предоставляющий информацию о проблеме [7]. Помимо стандартных ошибок, предусмотренных спецификацией, можно создавать и возвращать собственные объекты Fault.

Серверная часть приложения состоит из трех классов и одного интерфейса:

- класса-сущности Fact, обычного класса с двумя полями: числом и его факториалом;
- класса-модели Factory, в котором описаны методы для работы с объектами типа Fact;
- интерфейса FactService, в котором объявлены методы взаимодействия между клиентом и сервером;
- класса FactImpl, реализующего методы, объявленные в FactService.

Сравнение производительности RESTи SOAP

Производительность сравнивали путем измерения времени аналогичных запросов SOAP и REST. Время запросов измеряли с помощью методов класса java.util.Date. Методы, для которых сравнивалась производительность,– HTTP-методы GET и POST для REST-приложения и методы GetAllFacts () и AddFacts (List<Fact>fact) для SOAP-приложения. Таким образом проверяли запросы для добавления и получения объектов.

Производительность рассчитывали следующим образом: неоднократно измеряли время одних и тех же запросов и вычисляли среднеарифметическое значение этих запросов по формуле

$$\overline{x} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots x_N}{N},$$

где x_i – однократное время выполнения действий; N – объем выборки.

Затем высчитывали среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2},$$

где $\bar{x}$ – среднеарифметическое значение и временную эффективность:

$$\delta = 100 - \frac{t_R + \sigma_R}{t_S + \sigma_S} \cdot 100,$$

где t_R и t_S – время выполнения REST- и SOAP-запросов, соответственно; σ_R и σ_S – среднеквадратичное отклонение REST- и SOAP-сервисов, соответственно.

Результаты измерений представлены в табл. 1–3.

Также было вычислено количество байт, передаваемых при ответе от сервера к клиенту. Вычисления производили в программе SOAPUI, их результаты представлены в табл. 4.

По итогам измерений можно сделать вывод, что REST-сервис имеет преимущество в производительности над аналогичным SOAP-сервисом. Это выражается как в меньшем времени запросов к серверу от клиента, так и в размере передаваемых сообщений. При этом следует отметить, что если бы REST-сервис передавал сообщения не в формате XML,

ТАБЛИЦА 1. Результаты одиночного запроса

Тип запроса	Добавление запроса, мс	Получение запроса, мс
REST	468 ± 38,4	680 ± 57,7
SOAP	481 ± 42,6	703 ± 68,1

ТАБЛИЦА 2. Эффективность REST по сравнению с SOAP

Операция	Производительность, %
Одиночное добавление	3,28
Одиночное получение	4,33
Множественное добавление	7,29
Множественное получение	9,17

ТАБЛИЦА 3. Результаты множественного запроса

Тип запроса	Количество запросов	Добавление запроса, мс	Получение запроса, мс
REST	50	1084 ± 97,1	1380 ± 111,8
	100	1294 ± 104,7	1881 ± 167,6
	250	1852 ± 126,6	2974 ± 255,8
	500	2301 ± 197,4	4598 ± 343,2
	1000	3045 ± 292,9	7337 ± 696,4
SOAP	50	1174 ± 106,8	1512 ± 132,7
	100	1378 ± 117,2	1974 ± 183,4
	250	1997 ± 145,1	3442 ± 290,7
	500	2568 ± 212,5	5174 ± 378,4
	1000	3289 ± 313,7	8217 ± 710,5

ТАБЛИЦА 4. Размер передаваемых сообщений

Тип запроса	Количество запроса	REST, байт	SOAP, байт	Разница, байт
Получение запроса	1	122	269	147
	50	5065	5310	245
	100	13 971	14 316	345
	250	84 307	84 952	645
	500	379 994	381 139	1145
	1000	139 591	1 398 076	2145

а в формате JSON или HTML, то разница в размере была бы гораздо больше.

В процентном соотношении преимущество в производительности REST над SOAP, как видно из табл. 3, составляет 7,29 % для записи и 9,17 % для чтения. Учитывая, что разработанные приложения достаточно просты с точки зрения вычислений и не требуют больших производительных затрат, можно сделать вывод, что эффективность REST будет только возрастать в более ресурсоемких приложениях. Например, в таких, где происходит соединение с базой данных.

На эффективность работы приложения помимо количества передаваемых объектов и выбранного протокола также большое влияние оказывают такие факторы, как помехозащищенность соединения и скорость передачи данных [4]. Из-за этого скорость выполнения запросов к облаку может различаться при работе в разных сетях.

Заключение

В данной работе изучены такие технологии доступа к облачным сервисам, как SOAP и REST, проведено их сравнение с теоретической точки зрения, а также написаны приложения с идентичной функциональностью, позволяющие оценить производительность данных протоколов.

Анализ результатов показал, что REST эффективней SOAP за счет простоты и возможности выбора формата передачи данных.

Библиографический список

1. Лозовюк А. XML-RPC, вызов удаленных процедур с помощью XML / А. Лозовюк. – URL : http://citforum.ru/internet/xml/xml_rpc.

2. Лошин П. Протокол SOAP / П. Лошин // ComputerWorld Россия. – 2000. – № 35.

3. Хабрахабр. RESTandSOAP. Ч. 1. Почувствуйте разницу. – URL : http://habrahabr.ru/post/131343 (дата обращения 27.10.2011).

4. Яковлев В. В. Оценка влияния помех на производительность протоколов канального уровня / В. В. Яковлев, Ф. И. Кушназаров // Изв. ПГУПС. – 2015. – Вып. 1 (42). – С. 133–138.

5. Roy Fielding about HTTP, REST, WebDAV, JSR 170, and Waka. – URL : http://jonudell.net/udell/2006-08-25-a-conversation-with-roy-fielding-about-http-rest-webdav-jsr-170-and-waka.html (дата обращения 25.08.2006).

6. Roy Fielding on Versioning, Hypermedia, and REST. – URL : http://www.infoq.com/articles/roy-fielding-on-versioning.

7. W3.org. Официальный сайт Консорциума Всемирной Паутины. Спецификация SOAP версия 1.2. – URL : http://www.w3.org/2002/07/soap-translation/russian/part0.html.

References

1. Lozovyuk A. XML-RPC, vyzov udalennykh protsedur s pomoshchyu XML [XML-RPC, Remote Procedure Call by XML], available at: citforum.ru/internet/xml/xml_rpc.

2. Loshin P. *ComputerWorld Rossiya – ComputerWorld Russia*, 2000, no. 35.

3. Khabrakhabr. RESTandSOAP. Ch. 1. Pochustvuyte raznitsu [RESTandSOAP. Pt. 1. Feel the Difference], available at: habrahabr.ru/post/131343.

4. Yakovlev V. V. & Kushnazarov F. I. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ*., 2015, Is. 1 (42), pp. 133-138.

5. Roy Fielding about HTTP, REST, WebDAV, JSR 170, and Waka, available at: jonudell.net/udell/2006-08-25-a-conversation-with-roy-fielding-about-http-rest-webdav-jsr-170-and-waka.html.

6. Roy Fielding on Versioning, Hypermedia, and REST, available at: infoq.com/articles/roy-fielding-on-versioning.

7. W3.org. Spetsifikatsiya SOAP versiya 1.2 [SOAP Specification Version 1.2], available at: w3.org/2002/07/soap-translation/russian/part0.html.

КУШНАЗАРОВ Фаррух Исакулович – аспирант, k.farruh@bk.ru; ЯКОВЛЕВ Валентин Васильевич – д-р техн. наук, профессор, jakovlev@pgups.ru; *ТУРДИЕВ Одилжан Акрамович – магистр, odiljan.turdiev@mail.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).

УДК 62-144.3+629.02

А.Н. Лялинов, А.Л. Пенкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ НАСАДКА–ГОМОГЕНИЗАТОРА

Дата поступления: 21.08.2015
Решение о публикации: 12.11.2015

Цель: Исследовать геометрические параметры насадка-гомогенизатора, установленного в сопле газовой форсунки двигателя внутреннего сгорания,– элемента, позволяющего точно направлять струи газового топлива для формирования необходимых зон турбулентного возмущения. Исследования проводились с целью повышения гомогенности газовоздушной смеси для её более полного сгорания, а также снижения количества вредных выбросов с отработавшими газами и улучшения топливной экономичности двигателей. **Методы:** В работе применялись теория двигателя внутреннего сгорания, теория матриц с использованием математического комплекса MATLAB, метод измерения длины свободного пробега частицы газовой смеси, имеющей определённое давление М. Борна и Е. Бормана, прикладная газовая динамика, векторный анализ и начало тензорного исчисления. Воспользовавшись методикой определения напряжённого состояния при движении газовой смеси в тонком слое, авторы при решении задачи создания гомогенной газовоздушной смеси используют понятия силы внутреннего трения, коэффициентов динамической и кинематической вязкости, градиента скорости частиц газовой смеси, длины свободного пробега λ (характеристики смеси). **Результаты:** Выявлено, что насадок-гомогенизатор на газовую форсунку не создаёт повышенного сопротивления движению воздуха во впускном коллекторе ДВС, позволяет формировать необходимые зоны турбулентного возмущения в камере сгорания ДВС, а изменение угла раскрытия эллипсоида позволяет реализовать возможность выбора параметров турбулентного возмущения впрыскиваемому газовому топливу. Рассмотрены раскрытие «разнесенного эллипсоида» – отражающей поверхности насадка, зависящее от величины угла α, определяющего величину этого раскрытия, а также длина всей дуги плоской кривой в подвижной системе координат. На основании расчёта приведены графики, определяющие длину кривой в зависимости от угла раскрытия насадка, графики зависимости внутренней поверхности гомогенизатора от различных углов его раскрытия α, зависимости внутреннего объёма насадка-гомогенизатора от α. **Практическая значимость:** Применение предлагаемой конструкции насадка-гомогенизатора позволяет повысить гомогенность газовоздушной смеси, тем самым улучшить эксплуатационные показатели транспортных газовых и газодизельных двигателей.

Насадок-гомогенизатор, разнесённый эллипсоид, угол раскрытия, коэффициент динамической вязкости, коэффициент кинематической вязкости, газовоздушная смесь, градиент скорости.

Anatoliy N. Lyalinov, D. Eng., professor (Petersburg State Transport University); ***Aleksey L. Penkin**, associate professor, apenkin1@gmail.com (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering) STUDY INTO INTERNAL PARAMETERS OF HOMOGENIZER FITTING

Objective: To study geometrical parameters of homogenizer fitting installed in the gas blast nozzle of internal combustion engine, which is an element allowing to precisely direct the gas fuel jets for forming required zones of turbulent excitation. The studies were conducted in order to increase homogeneity of gas-air mixture for its more complete combustion, as well as decreasing the amount of harmful emissions of combustion gas and improving engine’s fuel efficiency. **Methods:** Internal combustion engine theory, matrix theory with the use of MATLAB mathematical system, Max Born – Elisabeth Bormann method of measuring the length of free path of gas mixture particle which has set pressure, applied gas dynamics, vector analysis and basic tensor calculus were applied. By applying the method of establishing the strain condition when gas mixture is moving in thin level, the authors used the concepts of force of internal tension, coefficients of dynamic and kinematic coefficient of viscosity, velocity gradient of gas mixture particles, free path length λ (mixture characteristics) in solving the task of creating homogenous gas-air mixture. **Results:** It was established that homogenizer fitting for gas blast nozzle does not create increased resistance to air movement in the intake manifold of the internal combustion engine, allows to form required zones of turbulant excitation in the combustion chamber of the internal combustion engine, and amending the ellipsoid expansion angle allows to realise the opportunity for choosing the parameters of turbulent excitation to the gas fuel being injected. The expansion of spaced-apart ellipsoid is considered as reflecting surface of the fitting which depends on the size of α angle, which determines the size of this expansion, as well as the length of the entire flat curve arc in moving co-ordinates. Based on calculations, graphs which establish the length of the curve depending on the fitting expansion angle, graphs of dependencies of homogenizer's internal surface from various angles of its expansion α, dependencies of the homogenizer fitting's internal volume from α were provided. **Practical importance:** Application of the proposed homogenizer fitting design will allow to increase homogeneity of gas-air mixture and thus improve operational parameters of gas and gas-diesel transport engines.

Homogenizer fitting, spaced apart ellipsoid, expansion angle, dynamic viscosity coefficient, kinematic viscosity coefficient, gas-air mixture, velocity gradient.

При создании перспективных газовых и газодизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) требуется повысить гомогенность газовоздушной смеси для её более полного сгорания, снижения количества вредных выбросов с отработавшими газами и увеличения топливной экономичности двигателей.

Имеющиеся гомогенизирующие устройства (патент RU № 94037898, патент JP 19810168522, свидетельство на полезную модель RU № 121307 [19]) имеют недостатки – повышение сопротивления движению воздуха во впускном коллекторе ДВС, невозможность точного направления струй газового топлива для формирования необходимых зон турбулентного возмущения.

Улучшить эксплуатационные показатели газовых и газодизельных ДВС за счет создания гомогенной газовоздушной смеси в цилиндрах ДВС можно путем придания впрыскиваемому в воздушный поток газовому топливу турбулентного возмущения в специальном устройстве – насадке-гомогенизаторе, устанавливаемом на газовую форсунку. Это устройство не создаёт сопротивления на впуске, придаёт турбулентное возмущение потоку газового топлива и как следствие – повышает гомогенность газовоздушной смеси. Газовую форсунку с насадком-гомогенизатором можно применять в ДВС с искровым зажиганием как при внешнем, так и при внутреннем смесеобразовании. В ДВС с воспламенением от сжатия устройство можно применять при работе двигателя по газодизельному циклу.

Насадок-гомогенизатор – установленный в сопле газовой форсунки элемент, направляющий струи газового топлива для формирования необходимых зон турбулентного возмущения, а изменение угла раскрытия эллипсоида насадка позволяет выбирать параметры турбулентного возмущения впрыскиваемого газового топлива [2, 20].

Рабочие параметры насадка-гомогенизатора в значительной степени зависят от его внутренней поверхности, объёма и наклона основной оси насадка к оси цилиндра ДВС [17, 19]. Его исполнение является прецизионной работой, поскольку объём этого устройства не превышает 10–20 мм^3. Параметры насадка будут уточнены после натурного эксперимента [3], для которого прежде необходимо теоретическое исследование внутренних параметров насадка.

Для расчета рабочих параметров насадка-гомогенизатора необходимо рассмотреть длину его плоской кривой в зависимости от наклона к оси абсцисс O_1X_1 (рис. 1).

Кроме того, необходимо знать всю внутреннюю поверхность и объём насадка. Эллипсоид, представляющий отражающую поверхность насадка, раскрывается венчиком в виде телесного угла относительно начала координатной оси O_1X_1. Как видно из рис. 1, к примеру, из точки K исходят лучи векторов усилий через фокальные точки F_1 и F_2 раскрытой на угол 2α насадка. Отметим также, что малая ось эллипса KO_2 является нормалью к оси O_1X_2, а в данном случае – и нормалью к касательной *a–a*.

В дальнейших наших исследованиях ось O_1X_1 будет определять основное направление насадка-гомогенизатора, перпендикулярное оси цилиндра ДВС.

Определение длины кривой продольного контура насадка-гомогенизатора

Рассмотрим половину канонической фигуры эллипса. Пусть полуразнесённый эллипсоид имеет горизонтальную ось O_1X_1 и вертикальную O_1Y_1. Первоначальное положение полуэллипса должно соответствовать подвижной системе координат $O_1X_2Y_2$. Чтобы получить неподвижную систему координат, нужно новую подвижную повернуть по часовой стрелке. Движение поворота полуэллипса по часовой стрелке определяется отрицательным углом $(-\alpha)$, угол будем принимать положительным, если он вращает подвижную систему координат против часовой. В новой плоской системе координат $O_1X_2Y_2$ кривая окаймляет верхнюю зону разнесённого полуэллипса. Этот поворот осуществляется матричным уравнением [6, 9, 10, 12, 14]

$$X_1 = AX_2,$$

где $$X_1 = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}; \qquad (1)$$

$$X_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix}.$$

Матрица A является матрицей поворота 2×2; она получается путём проектирования подвижной на неподвижную систему координат с учётом знака угла $(-\alpha)$ [5, 7, 9, 10, 13–16]:

$$X_1 = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix}. \qquad (2)$$

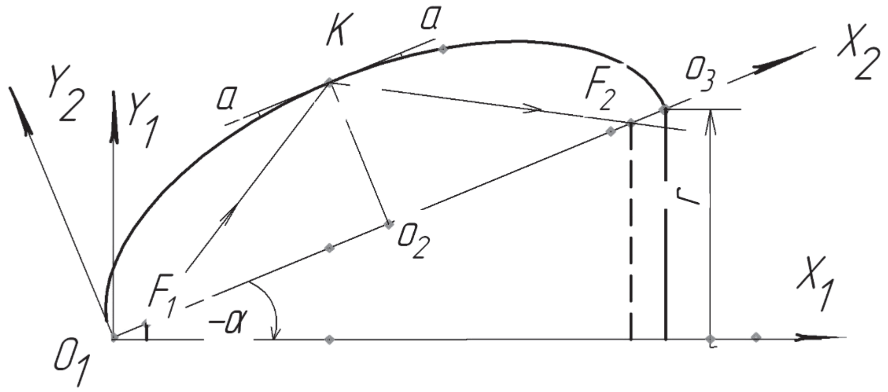


Рис. 1. Определение параметров поворота полуэллипса:
$X_1O_1Y_1$ – неподвижная система координат; $X_2O_1Y_2$ – подвижная система координат

Выражение (2) есть матрица-столбец в плоской (неподвижной) системе координат $O_1X_1Y_1$. Эта матрица является результатом перемножения двух матриц (1).

Функциональное представление формул x_2, y_2 в системе координат $O_1X_2Y_2$ имеет вид

$$x_2 = a(1+\sqrt{1-\frac{y_2^2}{b^2}});$$

$$y_2 = b\sqrt{1-\frac{(x_2-a)^2}{a^2}} \dots \quad (3)$$

В соответствии с правилом перемножения матриц, используя правила Фалька, получим следующие значения элементов матрицы-столбца X_1:

$$x_1 = a\left(1+\sqrt{1-\frac{y_2^2}{b^2}}\right)\times$$

$$\times\cos\alpha - b\sqrt{1-\frac{(x_2-a)^2}{a^2}}\sin\alpha; \quad (4)$$

$$y_1 = a\left(1+\sqrt{1-\frac{y_2^2}{b^2}}\right)\times$$

$$\times\sin\alpha + \frac{b}{a}\sqrt{2ax_2-x_2^2}\cos\alpha. \quad (5)$$

Выражения (4) и (5) являются элементами матрицы-столбца X_1 выражения (2) и определяются формулами для кривой в старой системе координат.

Плоская кривая верхней зоны в плоскости разнесённого эллипсоида (рис. 1) относительно точки в системе координат $O_1X_2Y_2$ определяется формулой:

$$L=\int_0^{2a}\sqrt{1+y_2'^2}\,dx_2.$$

Здесь за начало интегрирования принято начало координат O_1, а за конечную точку – выражение

$$l_1 = 2a,$$

где $2a$ – длина большей оси эллипса в подвижной системе координат $O_1X_2Y_2$.

Продифференцировав выражение (3) по x_2 и возведя его в квадрат, получим

$$y_2'^2 = \frac{b^2(a-x_2)^2}{a^2(2a-x_2)x_2}.$$

Длина всей дуги плоской кривой L (рис. 1) в подвижной системе координат $O_1X_2Y_2$ определяется интегралом [4, 18]:

$$L = 2\int_0^{2a}\sqrt{1+\frac{b^2(a-x_2)^2}{a^2(2a-x_2)x_2}}dx_2. \quad (6)$$

В выражении (6) перед интегралом стоит двойка, так как здесь определяется длина всей кривой в сечении, проходящем через продольную ось O_1X_1 неподвижной системы координат насадка-гомогенизатора.

Воспользуемся математическим комплексом MATLAB. Интегрируя выражение (6) при различных параметрах наклона кривой раскрытого полуэллипса по оси O_1X_2, получим её длину при соответствующем раскрытии разнесённого эллипсоида.

На рис. 2 приведена зависимость длины кривой, находящейся на внутренней поверхности, проходящей через абсциссу O_1X_1, от длины малой полуоси эллипса при различном раскрытии насадка-гомогенизатора. Как видно из рис. 2, кривая определяется явно выраженной параболой. С увеличением длины малой полуоси эллипса её тангенс угла наклона к оси абсцисс увеличивается почти в 60 раз. За основу единицы измерения (рис. 2–4) принята длина большей полуоси эллипса $a = 1$ ед., а величина малой полуоси b – при её разных значениях $b_i = 0{,}15; 0{,}30; 0{,}45; 0{,}60$.

Принятое конструктивное исполнение насадка-гомогенизатора позволяет выбирать параметры турбулентного возмущения впрыскиваемому газовому топливу в разных режимах работы ДВС.

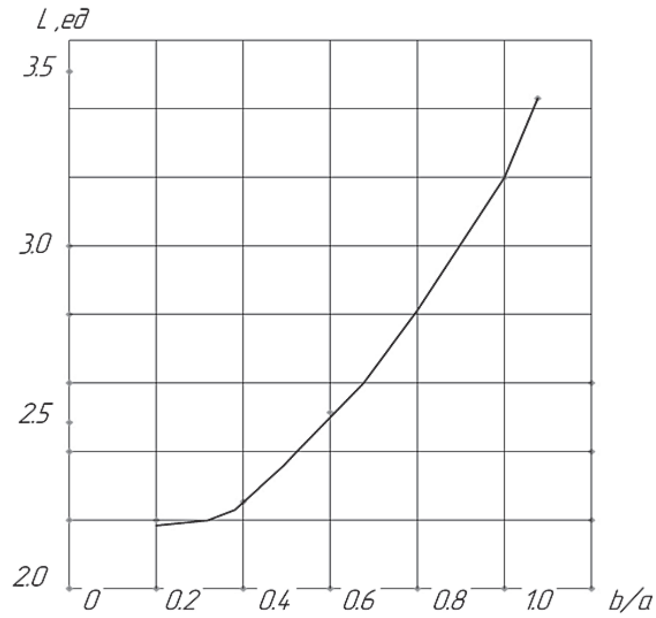


Рис. 2. Зависимость длины кривой, находящейся на внутренней поверхности гомогенизатора, проходящей через абсциссу O_1X_1, от длины малой полуоси эллипса в условных единицах

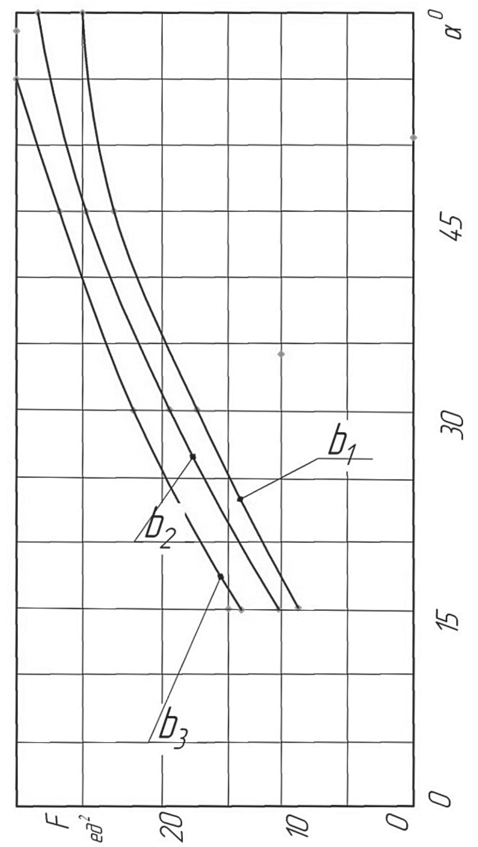


Рис. 3. Графики зависимости внутренней поверхности гомогенизатора от угла его раскрытия при $\alpha = 15, 30, 45°$; $b_1 = 0{,}15$; $b_2 = 0{,}5$; $b_3 = 0{,}45$

Определение внутренней поверхности насадка-гомогенизатора

Насадок-гомогенизатор является неканонической фигурой, полученной в результате вращения плоской кривой разнесённого эллипсоида относительно оси O_1X_1 системы координат $O_1X_1Y_1$.

Возьмем производные по направлению переменной x_2 от выражений (4) и (5):

$$\frac{\partial x_1}{\partial x_2} = \cos\alpha + \frac{b}{a}\frac{(x_2 - a)}{\sqrt{2ax_2 - x_2^2}}\sin\alpha;$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_2} = \sin\alpha + \frac{b}{a}\frac{(x_2 - a)}{\sqrt{2ax_2 - x_2^2}}\cos\alpha.$$

Тогда

$$\frac{dy_1}{dx_1} = \frac{\dfrac{\partial y_1}{\partial x_2}}{\dfrac{\partial x_1}{\partial x_2}} \ldots$$

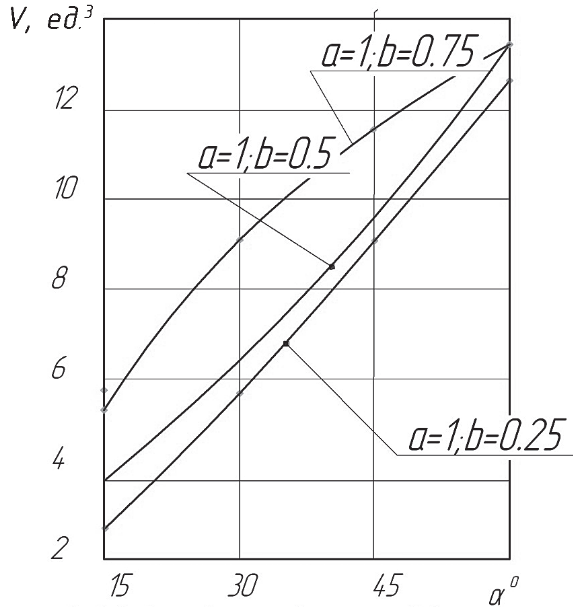


Рис. 4. Графики зависимости внутреннего объема гомогенизатора от угла его раскрыти

Площадь внутренней поверхности в значительной степени влияет на напряжённое состояние гомогенизатора. Эта площадь определяется формулой [4, 15, 16, 18]:

$$F = 2\pi \int_0^{2a} y_1 \sqrt{1 + (y_1^{'})^2} \cdot dx_2. \quad (7)$$

Верхний предел интегрирования в выражении (7) принят равным $2a\cos\alpha$. Этот параметр определяет крайнюю правую точку разнесённого эллипсоида в системе координат $O_1X_1Y_1$. Выражение y_1 (5) есть высота точки, находящейся на кривой, повёрнутой на угол α по часовой стрелке до центральной оси O_1X_1 (см. рис. 1).

Рассмотрим изменение внутренней поверхности насадка-гомогенизатора при различных параметрах угла α и малой полуоси эллипса b. На рис. 3 приведены кривые $b_1 = 0{,}25$; $b_2 = 0{,}50$; $b_3 = 0{,}75$ ед., определяющие зависимость угла раскрытия α от внутренней поверхности насадка-гомогенизатора.

С увеличением угла раскрытия его внутренняя поверхность увеличивается почти по прямолинейной зависимости (рис. 3). Как видно из соотношения ординат при одной и той же абсциссе, эта величина имеет возрастающую пропорциональную зависимость. Так, при $\alpha_1 = 15°$ величина $\frac{b_3}{b_1} = 1{,}52$; при $\alpha_2 = 30°$ $\frac{b_3}{b_1} = 1{,}56$; при $\alpha_2 = 60°$ $\frac{b_3}{b_1} = 1{,}33$. Как будет показано ниже, это положение кривой приводит к уменьшению нормальных напряжений в газовой струе при её соударении в любой точке внутренней поверхности насадка-гомогенизатора.

Расчёт внутреннего объёма насадка-гомогенизатора

Величина внутреннего объёма насадка-гомогенизатора определяется по формуле [4, 7, 15, 16]:

$$V = \pi \int_0^{2\alpha} y_1^2 dx_1, \quad (8)$$

где y_1 есть выражение (5).

В результате расчёта интеграла (8) с использованием математического комплекса MATLAB при различных параметрах α_i, b_i получены графические зависимости объёма насадка-гомогенизатора (рис. 4) от этих параметров.

Графики показывают, что наилучший угол раскрытия 45°. При кривизне больше $\alpha = 45°$ внутренний объём насадка-гомогенизатора имеет тенденцию к уменьшению и фокусные кольца, сближаясь друг с другом, уменьшают пространство для гомогенизации газовоздушной смеси.

Расчёт напряжённого состояния внутри насадка-гомогенизатора

Воспользуемся методикой определения напряжённого состояния [1, 3, 11, 23] при движении газовой смеси в тонком слое dx. Прямой метод измерения длины свободного пробега частицы газовой смеси, имеющей определённое давление, предложили М. Борн и Е. Борман [1, 3]. Для расчёта напряжённого состояния внутри насадка-гомогенизатора мы используем:

- $p = \frac{z}{J}$ – эффективное сечение, определяющее отношение среднего числа частиц z, выбывших из пучка в единицу времени при столкновениях, к интенсивности газовой смеси самого пучка J;
- $$dJ = -\frac{J}{\lambda} dx, \quad (9)$$

где $\frac{1}{\lambda}$ – вероятность рассеяния на единице длины, эту величину также называют коэффициентом рассеяния пучка; λ – длина свободного пробега частицы газовой смеси.

Интегрируя выражение (9), имеем

$$J = J_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}, \tag{10}$$

где J_0 – интенсивность пучка рассеяния, пересекающего плоскость a–b.

Из выражения (10) видно, что из-за рассеяния интенсивность пучка убывает по экспоненте.

Дадим формуле (10) другое толкование. Пусть N_0 – число частиц, прошедших через площадку a–b (рис. 5а), тогда число частиц газовой смеси, прошедших путь x без столкновения, можно представить выражением

$$N = N_0 e^{\frac{-x}{\lambda}}. \tag{11}$$

Средний путь совпадает с длиной свободного пробега λ молекулы между её двумя соударениями с другими молекулами.

На применении формул (10), (11) основан метод определения длины свободного пробега частиц газовой смеси. Длина свободного пробега λ является характеристикой газовой смеси.

Рассмотрим наличие внутреннего трения в газовой смеси [11, 22, 23].

Пусть имеются две параллельные пластинки FG и BC (рис. 5б), между которыми находится газовая смесь. Пластинка FG движется направо с вектор-скоростью u. Через слой газовой смеси толщиной L на нижнюю пластинку действует сила в направлении вектора u. Назовём её силой внутреннего трения газовой смеси. Заметим, что такое утверждение можно сделать только в том случае, если расстояние

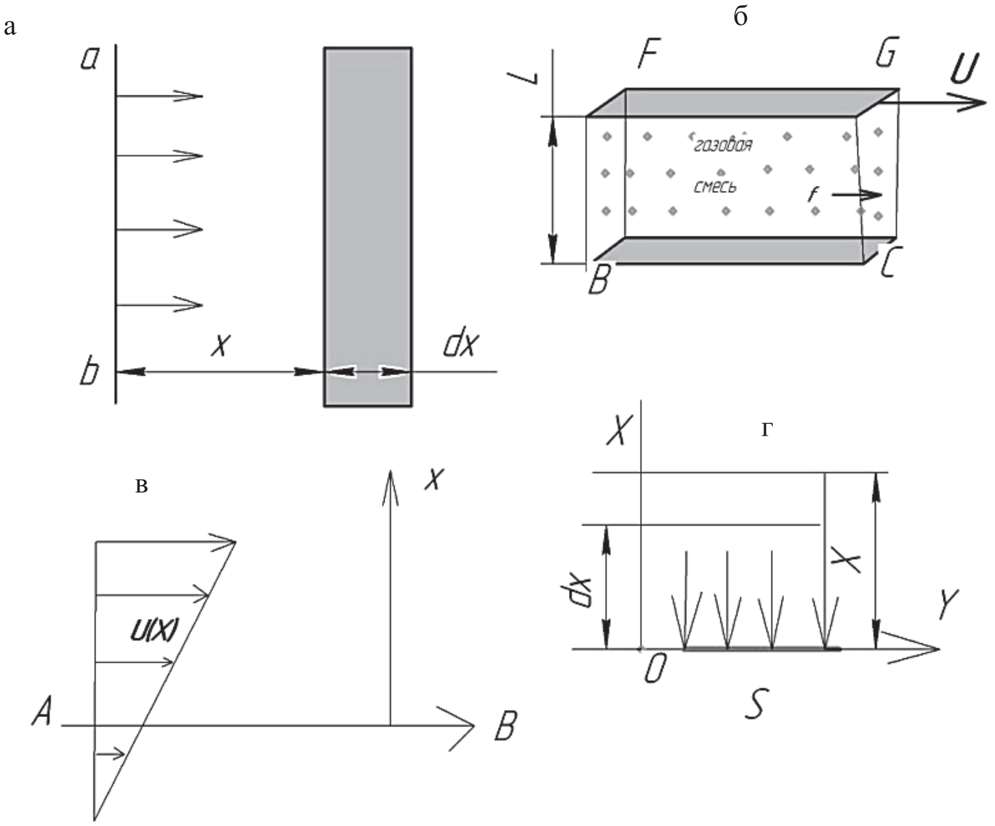


Рис. 5. Распределение молекул газовой смеси по длине свободного пробега и наличию в пучке внутреннего трения:
а) прохождение частицами газовой смеси площадки a–b; б) внутреннее трение в газовой смеси между параллельными пластинками FG и BC; в) возрастание вектора скорости u с увеличением оси ординат x; г) пересечение молекулами газовой смеси площадки S

L достаточно велико. Тогда можно говорить о внутреннем трении, возникающем в газовой смеси.

Очевидно, вектор u является переменной величиной и меняется в направлении, перпендикулярном слою (рис. 5в). Теперь мысленно разделим газовую смесь сечением АВ, параллельным слоям движущегося газа. Как видно из рис. 5в, вектор скорости u возрастает с увеличением оси ординат x.

Верхняя половина газовой смеси над сечением АВ (рис. 5в) будет действовать на нижнюю с силой, направленной вправо, а нижняя на верхнюю – с силой, направленной влево. Это и есть силы внутреннего трения [1, 3, 11, 23].

Дадим количественную оценку явлению внутреннего трения. Возьмём на горизонтальной плоскости площадку S (рис. 5г), которую пересекают сверху вниз в единицу времени молекулы газовой смеси, определяемые выражением [1, 3, 23]:

$$z = \frac{1}{6} n v,$$

где n – среднее число частиц (молекул) в единице объёма; v – скорость молекул, движущихся к стенке.

При столкновении частица газовой смеси получает количество движения $g(x)$. Двигаясь далее без столкновений, частица переносит этот момент количества движения через площадку всеми молекулами. Проявление этого переноса состоит в том, что вдоль плоскости S действует вязкое касательное напряжение

$$\tau_{xy} = \eta \frac{du}{dx},$$

где $\eta = \frac{1}{3} n m v \lambda$; $\frac{du}{dx}$ – градиент скорости частиц газовой смеси [1, 3, 15, 23]; η – коэффициент динамической вязкости (внутреннего трения), он показывает, что с увеличением скорости движения и свободного пробега смешанного газа коэффициент его вязкости возрастает.

Градиент скорости частиц газовой смеси показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою. Градиент также прямо пропорционален числу частиц и массе газовой смеси. По закону парности касательных напряжений [7, 10, 12–16, 21] можно записать:

$$\tau_{ij} \Rightarrow \begin{array}{l} \tau_{xy} = \tau_{yx} \\ \tau_{xz} = \tau_{zy} \; \ldots \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} \end{array}$$

Все рассуждения сделаны для частного случая, когда пучок газовой смеси направлялся перпендикулярно к плоскости.

В точке контакта газового пучка с внутренней поверхностью насадка-гомогенизатора (например, в точках A_1, A_2, A_4 (рис. 6)) он испытывает объёмное напряжённое состояние, определяемое тензором напряжений:

$$T_\sigma = \begin{Vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Vmatrix}. \tag{12}$$

Направим нормальное напряжение σ_X по оси O_2A_2 и касательные τ_{xy}, τ_{xz} – перпендикулярно ей.

Вектор $\sigma_c \cdot F$ направлен по нормали к касательной в точке A_2. Определим величину нормали A_2O_2. Отрезок нормали n в точке A_2, через которую проходит касательная, и отрезок поднормали S_n для этой же точки любой точки плоской кривой насадка-гомогенизатора аналитически определяются дифференциальными уравнениями:

$$n = A_2O_2 = \left| y_{10}\sqrt{1 + (y_{10}^{'})^2} \right|;$$

$$S_n = O_2O_4 = \left| y_{10} \cdot y_{10}^{'} \right|. \tag{13}$$

Вторая и третья строки тензора (12) определяют напряжённое состояние по осям Y_2, Z_2 ортогональной системы $X_2Y_2Z_2$. (Эта система координат не показана на рис. 6, кроме точки A_2).

Среднее нормальное напряжение по всей внутренней поверхности насадка-гомогенизатора определяется выражением [1, 3, 15–17, 19, 22]:

$$\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).$$

Напряжения σ_y и σ_z направлены, соответственно, по осям A_2Y_2 и A_2Z_2. Через любую точку A_i внутренней поверхности насадка-гомогенизатора проходит окружность, перпендикулярная оси O_1X_1 разнесённого эллипсоида, которая определяет конус усилий σ_i в виде телесного угла $O_2A_2A_2$.

Плоскость A_3A_3, перпендикулярная к оси O_1X_1 в проекции на плоскость $X_1O_1Y_1$, определяется прямой линией A_3A_3. Эта плоскость является, таким образом, «газоразделом» конусов сил, вершины которых направлены вправо, от таких же конусов, направленных влево (рис. 6). При раскрытии эллипсоида на другой больший или меньший угол 2α эти вершины конусов перемещаются, соответственно, вправо или влево.

Телесные углы конусов образуются нормалями (13), которые определяют поверхность силового конуса, а высота такого силового конуса есть поднормаль (13). Основание такого силового конуса есть круг с центром, через который по нормали проходит координатная ось O_1X_1. Установим боковую площадь силового конуса.

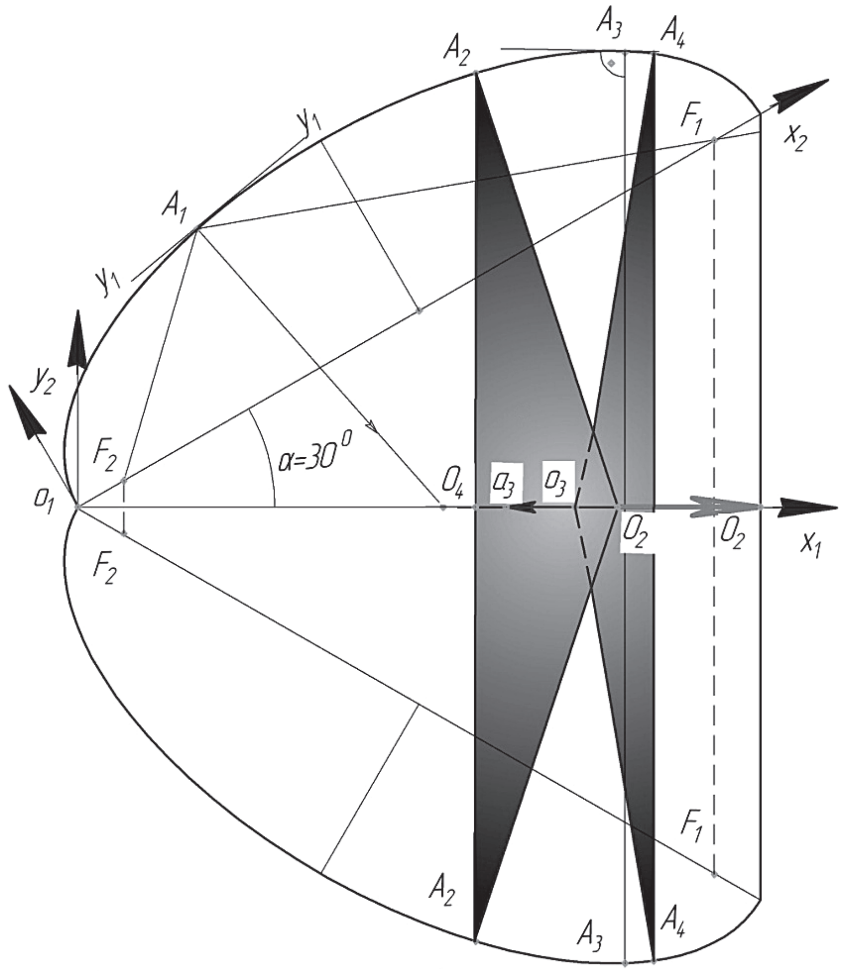


Рис. 6. Пояснения к исследованию напряженного состояния газовой смеси внутри насадка-гомогенизатора

Телесный угол при его развёртке в плоскость в радианной мере определяется выражением

$$\beta = \frac{2\pi \cdot y_{10}}{n}, \text{ рад.}$$

Тогда боковая поверхность силового конуса выражается формулой

$$\frac{\pi \cdot n^2}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot y_{10}}{n} = \pi \cdot n \cdot y_{10}.$$

Усилие, воспринимаемое силовыми конусами, расположенными слева от прямой A_3A_3, определяется формулой

$$\sum_{\text{лев.к}} P_i = \sigma_{\text{ср}} \cdot \pi \times$$
$$\times \int_0^{X_{1A_3}} y_{10}^2 \sqrt{1 + (y_{10}')^2}\, dx_1. \tag{14}$$

Усилие, воспринимаемое силовыми конусами справа от проекции A_3A_3 плоскости окружности, выражается также через интегральное выражение

$$\sum_{\text{прав.к}} P_i = -\sigma_{\text{ср}} \cdot \pi \times$$
$$\times \int_{X_{1A_3}}^{2a\cos\alpha} y_{10}^2 \sqrt{1 + (y_{10}')^2}\, dx_1. \tag{15}$$

Результирующая сила напора P газовой смеси из насадки-гомогенизатора в поршневое пространство будет складываться из двух векторов (14), (15):

$$\overline{P} = \sum_{\text{лев.к}} \overline{P_i} + \sum_{\text{прав.к}} \overline{P_i}.$$

Результирующее напряжение потока газовой смеси в насадке-гомогенизаторе определяется формулой

$$\sigma_{\text{потока}} = \frac{P}{4\pi a^2 \sin^2 \alpha}.$$

Выводы

Исследование позволяет сделать вывод, что предлагаемая конструкция насадка-гомогенизатора обеспечивает турбулентное возмущение впрыскиваемому газовому топливу, вследствие чего есть возможность повысить гомогенность газовоздушной смеси, тем самым улучшить эксплуатационные показатели транспортных двигателей. Расчёт напряжённого состояния внутри насадка-гомогенизатора показывает, что производимое им возмущение на порядок выше создаваемых в современных камерах сгорания неразделённого типа [8], благодаря чему перемешивание газовоздушной смеси имеет более высокий уровень. Определенное теоретическое значение силы напора газовой смеси и напряжения потока газовой смеси даёт важную аналитическую оценку процесса создания гомогенной газовоздушной смеси в камере сгорания ДВС.

Библиографический список

1. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика : учеб. руководство для втузов / Г. Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука ; Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1991. – 600 с.

2. Алабужев П. М. Теория подобия и размерностей. Моделирование / П. М. Алабужев, В. Б. Геронимус, Л. Н. Минкевич, Б. А. Шеховцов. – М. : Высш. шк., 1968. – 206 с.

3. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика : учеб. пособие для вузов / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – 2-е изд. – М. : Стройиздат, 1975. – 326 с.

4. Бараненков Г. С. Задачи и упражнения по математическому анализу для ВТУЗов / Г. С. Бараненков, Б. П. Демидович, В. А. Ефименко и др. ; под общ. ред. Б. П. Демидович. – 6-е изд., стереотип. – М. : Наука, 1968. – 472 с.

5. Беллман Р. Введение в теорию матриц / Р. Беллман. – М. : Наука, 1976. – 367 с.

6. БСЭ. Т. 5. – 3-е изд. – М. : Сов. энциклопедия, 1971. – 604 с.

7. Борисенко А. И. Векторный анализ и начало тензорного исчисления / А. И. Борисенко, И. Е. Та-

рапов. – Харьков : Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1959. – 238 с.

8. Бурячко В. Р. Автомобильные двигатели : учеб. / В. Р. Бурячко, А. В. Гук. – СПб. : НПИКЦ, 2005. – 292 с.

9. Венецкий И. Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – М., 1974. – 280 с.

10. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – 5-е изд. – М. : Физматлит, 2004. – 560 с.

11. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей / И. Ф. Голубев. – М. : Физматлит, 1959. – 377 с.

12. Ефимов Н. В. Квадратичные формы и матрицы / Н. В. Ефимов. – М. : Наука, 1967. – 161 с.

13. Курош А. Г. Курс высшей алгебры / А. Г. Курош. – М. : Наука, 1968. – 431 с.

14. Ланкастер П. Теория матриц / П. Ланкастер. – М. : Наука, 1973. – 280 с.

15. Лурье А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М. : ГИФМЛ, 1961. – 824 с.

16. Лурье А. И. Теория упругости / А. И. Лурье. – М. : Наука, 1970. – 939 с.

17. Лялинов А. Н. Исследование насадка-гомогенизатора на газовую форсунку двигателя внутреннего сгорания / А. Н. Лялинов, А. Л. Пенкин, А. А. Капустин // Изв. ПГУПС. – 2013. – Вып. 2. – С. 126–132.

18. Матвеев Н. М. Методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений / Н. М. Матвеев. – Минск : Вышэйш. шк., 1974. – 766 с.

19. Насадок-гомогенизатор на газовую форсунку : пат. на полезную модель 121307 РФ : МПК F02M29/06(2006.01) / А. Н. Лялинов, А. Л. Пенкин, С. А. Евтюков, А. А. Капустин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2012117260 / 28; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29. – 1 с.

20. Насадок-гомогенизатор на газовую форсунку : пат. на полезную модель 135732 РФ : МПК F02M29/06(2006.01) / А. Л. Пенкин, А. Н. Лялинов, А. А. Капустин, В. С. Самусь; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет». – № 2013131488/03; заявл. 09.07.2013; опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35. – 7 с.

21. Патрашев А. Н. Прикладная гидромеханика / А. Н. Патрашев, Л. А. Кивако, С. И. Гожий. – М. : Воениздат, 1970. – 683 с.

22. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1975. – 565 с.

23. Фриш С. Э. Курс общей физики. Т. 1. Физические основы механики, молекулярная физика, колебания и волны / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – М. : ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 467 с.

References

1. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied Gas Dynamics], course guide. Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1991. 600 p.

2. Alabuzhev P. M., Geronimus V. B., Minkevich L. N. & Shekhovtsov B. A. Teoriya podobiya i razmernostey. Modelirovaniye [Similarity and Dimensions Theory. Simulation]. Moscow, Vysshaya shkola, 1968. 206 p.

3. Altshul A. D. & Kiselev P. G. Gidravlika i aerodinamika [Hydraulics and Aerodynamics], course guide. Moscow, Stroyizdat, 1975. 26 p.

4. Baranenkov G. S., Demidovich B. P., Yefimenko V. A., Kogan S. M., Lunts G. L., Porshneva Ye. F., Sycheva Ye. P., Frolov S. V., Shostak R.Ya. & Yanpolskiy A. R. Zadachi i uprazhneniya po matematicheskomu analizu dlya VTUZov [Mathematical Analysis Problems and Exercises for Higher Technical Schools], ed. B. P. Demidovich. Moscow, Nauka, 1968. 472 p.

5. Bellman R. Vvedeniye v teoriyu matrits [Introduction to the Matrix Theory]. Moscow, Nauka, 1976. 367 p.

6. Bolshaya Sovetskaya Entsiklopediya [Great Soviet Encyclopaedia]. Vol. 5. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1971. 604 p.

7. Borisenko A. I. & Tarapov I.Ye. Vektornyy analiz i nachalo tenzornogo ischisleniya [Vector Analysis and Basic Tensor Calculus]. Kharkiv, Izdatelstvo Kharkovskogo gosudarstvennogo universiteta, 1959. 238 p.

8. Buryachko V. R. & Guk A. V. Avtomobilnyye dvigateli [Motor Car Engines], course guide. St. Petersburg, NPIKTs, 2005. 292 p.

9. Venetskiy I. G. & Venetskaya V. I. Osnovnyye matematiko-statisticheskiye ponyatiya i formuly v ekonomicheskom analize [Basic Mathematical and Statistical Terms and Formulae in Economic Analysis]. Moscow, 1974. 280 p.

10. Gantmakher F. R. Teoriya matrits [Matrix Theory]. Moscow, Fizmatlit, 2004. 560 p.

11. Golubev I. F. Vyazkost gazov i gazovykh smesey [Gas and Gas Mixture Viscosity]. Moscow, Fizmatlit, 1959. 377 p.

12. Yefimov N. V. Kvadratichnyye formy i matritsy [Quadratic Forms and Matrixes]. Moscow, Nauka, 1967. 61 p.

13. Kurosh A. G. Kurs vysshey algebry [Higher Algebra Course]. Moscow, Nauka, 1968. 431 p.

14. Lankaster P. Teoriya matrits [Matrix Theory]. Moscow, Nauka, 1973. 280 p.

15. Lurye A. I. Analiticheskaya mekhanika [Analytical Mechanics]. Moscow, GIFML, 1961. 824 p.

16. Lurye A. I. Teoriya uprugosti [Elasticity Theory]. Moscow, Nauka, 1970. 939 p.

17. Lyalinov A. N., Penkin A. L. & Kapustin A. A. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2013. Is. 2, pp. 126-132.

18. Matveyev N. M. Metody integrirovaniya obyknovennykh differentsialnylh uravneniy [Integration Methods for Ordinary Differential Equations]. Minsk, Vysheyshaya shkola, 1974. 766 p.

19. Russian Federation Patent 121307: MPKF02 M29/06(2006.01). Nasadok-gomogenizator na gazovuyu forsunku [Gas Burner Homogenizer Fitting]. Publ. 20.10.2012. Bull. no. 29. 1 p.

20. Russian Federation Patent 135732: MPK F02M29/06 (2006.01). Nasadok-gomogenizator na gazovuyu forsunku [Gas Burner Homogenizer Fitting]. Publ. 20.12.2013. Bull. no. 35. 7 p.

21. Patrashev A. N., Kivako L. A. & Gozhiy S. I. Prikladnaya gidromekhanika [Applied Hydromechanics]. Moscow, Voyenizdat, 1970. 683 p.

22. Sivukhin D. V. Obshchiy kurs fiziki [General Physics Course]. Vol. 2. Moscow, Nauka, 1975. 565 p.

23. Frish S. E. & Timoreva A. V. Kurs obshchey fiziki [General Physics Course]. Vol. 1. Moscow, FIZMATGIZ, 1962. 467 p.

ЛЯЛИНОВ Анатолий Николаевич – доктор техн. наук, профессор (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I); *ПЕНКИН Алексей Леонидович – доцент, apenkin1@gmail.com (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

УДК 624.074.5

И. С. Талантов

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПЕКТРАЛЬНО–ЧИСЛЕННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ НА ВНЕЗАПНОЕ УДАЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРИМЕРЕ СТАЛЬНОГО СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ. ЧАСТЬ 2

Дата поступления: 28.08.2015
Решение о публикации: 20.10.2015

Цель: Исследовать возможность применения спектрального анализа, лишенного недостатков численного интегрирования, в расчетах на прогрессирующее обрушение на этапе линейного деформирования систем. Предложить алгоритм, сочетающий в себе достоинства аналитического и численного решений дифференциального уравнения движения. **Методы:** Применялось решение задачи на собственные значения, использовались нормальные координаты при снижении размерности задачи, явное численное интегрирование по методу Адамса. **Результаты:** Предложен комбинированный динамический метод расчета стержневых систем с выключающимися элементами, основанный на разложении по формам колебаний до момента достижения пластических деформаций и численном решении при переходе в физическую нелинейность. В первой (теоретической) части изложены общая методика расчета и принятые в рамках задачи допущения. Описан потенциал линейного динамического расчета в форме задачи на собственные значения при анализе поведения реальных металлических структур, подверженных внезапному выключению элементов. Изложена основная идея и допущения предложенного подхода. Описаны расчетные предпосылки при анализе живучести покрытия павильона № 5а ОАО «ЛЕНЭКСПО». **Практическая значимость:** Описанный метод служит альтернативой и верификацией широко применяемым численным методам, используемым при проектировании особо ответственных зданий, позволяя сократить объем необходимых вычислений и получить аналитическое решение на этапе линейного деформирования.

Динамика сооружений, прогрессирующее обрушение, спектральный анализ, численное интегрирование, живучесть металлоконструкций.

Ivan S. Talantov, postgraduate student, i.talantov@yandex.ru (Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering) MULTIMODAL SPECTRUM-NUMERICAL APPROACH TO PROBLEM OF SUDDEN ELEMENT DELETION ON THE EXAMPLE OF STEEL SPACE GRID STRUCTURES. PART 2

Objective: To study the possibility of applying spectrum analysis, devoid of drawbacks of numerical integration, in progressive collapse calculations during linear deformations stage. To suggest an algorithm combining advantages of analytical and numerical calculations of differential equation of motion. **Methods:** Free vibrations problem, usage of generalised co-ordinates for reducing system degree of freedom amount, explicit numerical integration by the Adams method. **Results:** A combined dynamic design method for bar system with failing elements, based on mode decomposition until plastic deformations appear, and numerical integration after reaching physical nonlinearity is considered in the article. In the first theoretical part base calculations method and assumptions are described. Potential of linear dynamic calculation in form of free vibrations problem in analysis of real steel space grid structures affected by sudden element failure is described. Basic idea and assumptions of suggested approach are described. Calculation factors in robustness analysis of steel space grid coating of Lenexpo 5a pavilion are described. **Practical importance:** Described method is an alternative and a verification for the widely used numerical methods in unique and particularly important structures design. It reduces the amount of necessary calculations, and permits getting analytical solution during linear deformation stage.

Structure dynamics, progressive collapse, spectrum analysis, numerical integration, robustness of steel structures.

Для примера использования разработанного алгоритма и метода, описанного в первой части статьи [4], проведены расчеты реальной конструкции – структурного металлического покрытия павильона № 5а ОАО «ЛЕНЭКСПО» (рис. 1). Схема узловых нагрузок на покрытие сведена в таблицу.

Материал – сталь Ст20 по ГОСТ 1050-74 (Предел текучести R_y = 25,0 kH/см^2). Сечения профилей: трубы электросварные прямошовные по ГОСТ 10704-75. Условные обозначения профилей указаны на рис. 2.

На рис. 3–5 представлены, соответственно, схема верхнего пояса, решетки и нижнего пояса структурного покрытия.

Расчетные предпосылки. Сопряжение элементов – идеально шарнирное, минимальный период, учитываемый в расчете собствен-

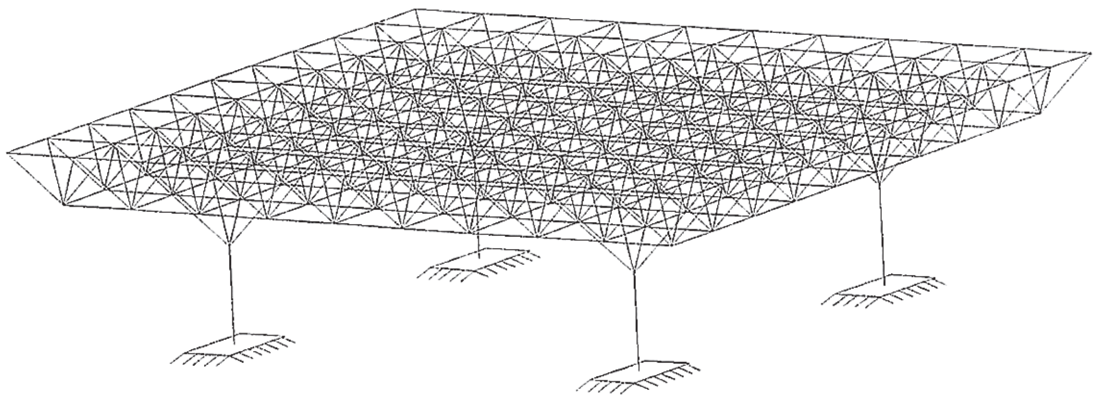


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы

Узловые нагрузки на покрытие

Тип нагрузки	Узел	Нормативное значение, кН	Расчетное значение, кН
Постоянная	Центральный	7,47	9,90
	Боковой	3,74	4,95
	Угловой	1,87	2,48
Снеговая	Центральный	9,00	14,40
	Боковой	4,50	7,20
	Угловой	2,25	3,60
Световой фонарь*	–	3,88	4,27

Примечание. * нагрузка постоянная и приложена к восьми узлам в центре структуры.

ной формы, выбирается наименьшим из двух значений:

• соответствующий частоте 33 Гц [1];

• равный удвоенному времени распространения упругих волн между двумя наиболее удаленными друг от друга точками конструкции:

$$T_{\lim} = \frac{4 \cdot L_{\max}}{V_0},$$

где $T_{\lim}$ – минимальный период собственной формы, учитываемой в расчете; $L_{\max}$ – расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга узлами конструкции; V_0 – скорость распространения звука в материале.

Потеря устойчивости/разрушение элемента происходят мгновенно. Обрыв первого элемента происходит в состоянии статического положения равновесия полной системы. Массами в узлах нижнего пояса пренебрегаем. Общее количество узлов – 225, независимых узловых перемещений – 675, динамических степеней свободы – 363, элементов в полной системе – 816 (стойки учтены в виде податливых связей в месте сопряжения

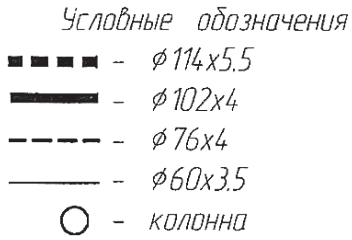


Рис. 2. Условные обозначения профилей для рис. 3–5

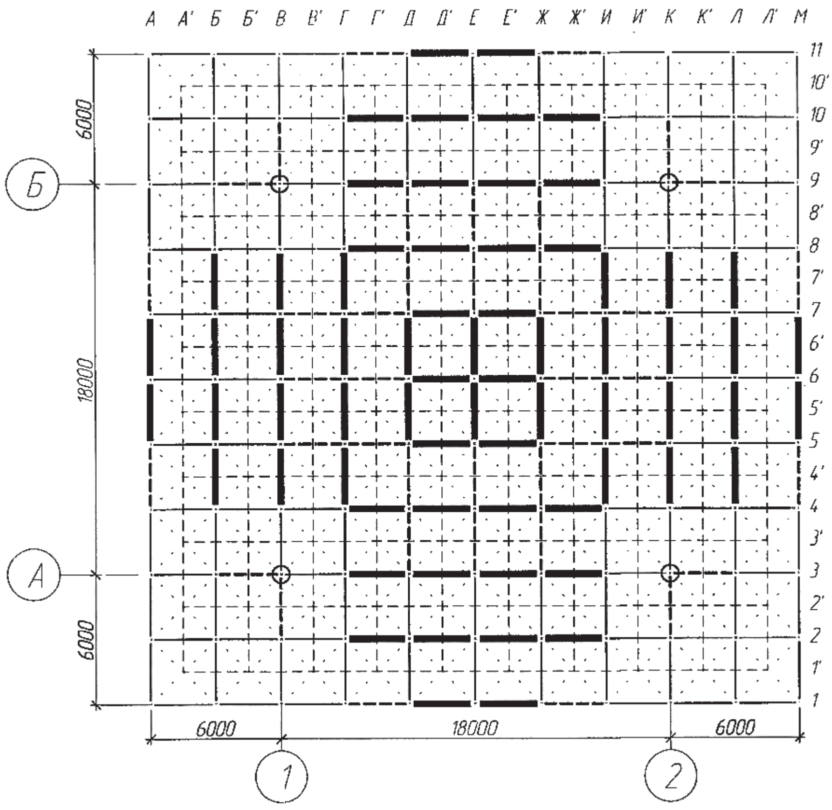


Рис. 3. Схема элементов верхнего пояса

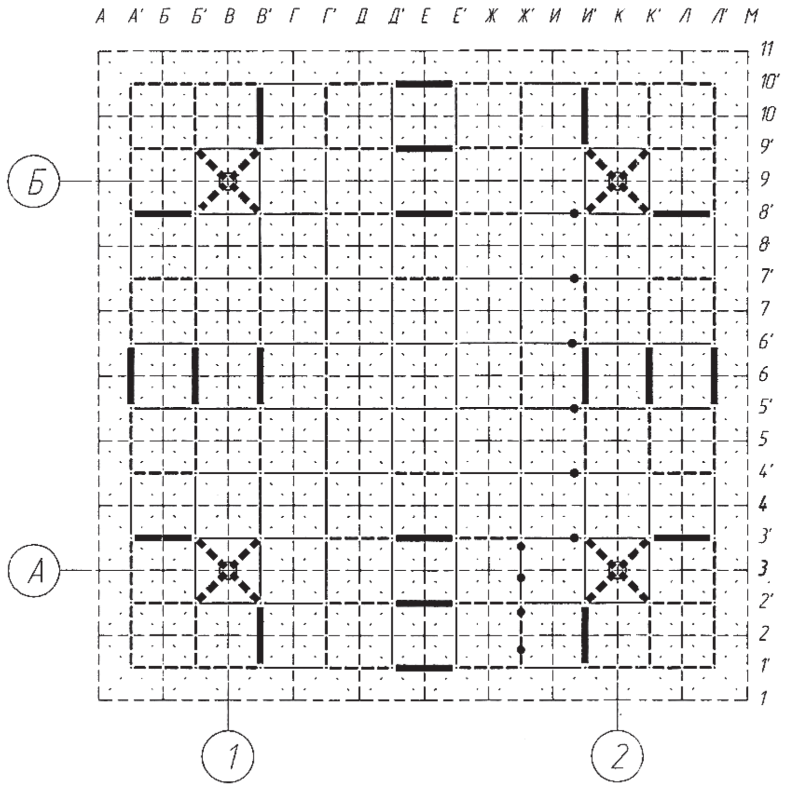


Рис. 4. Схема элементов решетки

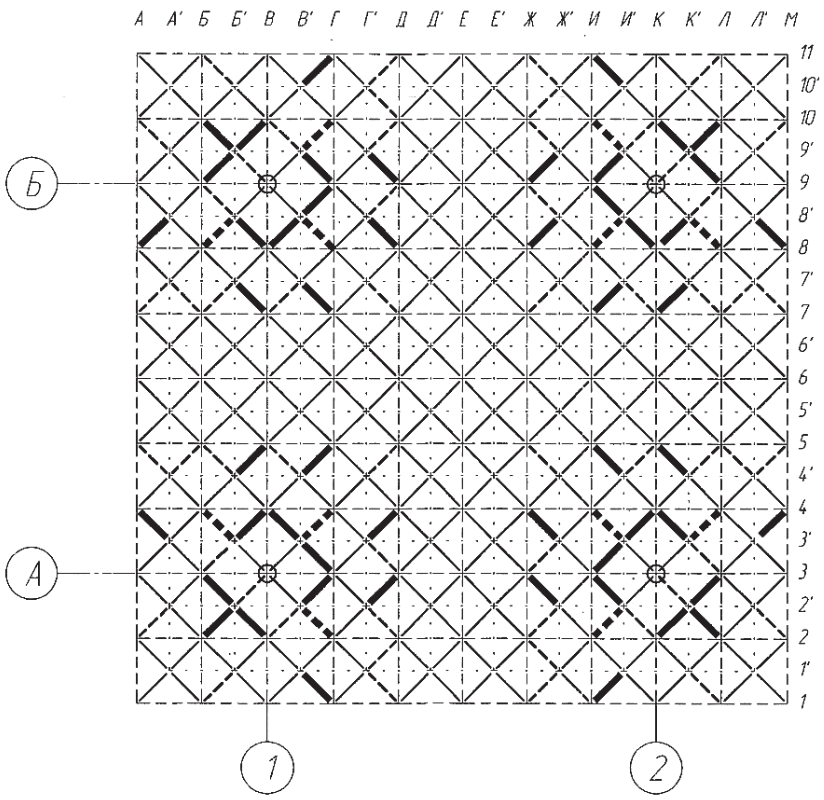
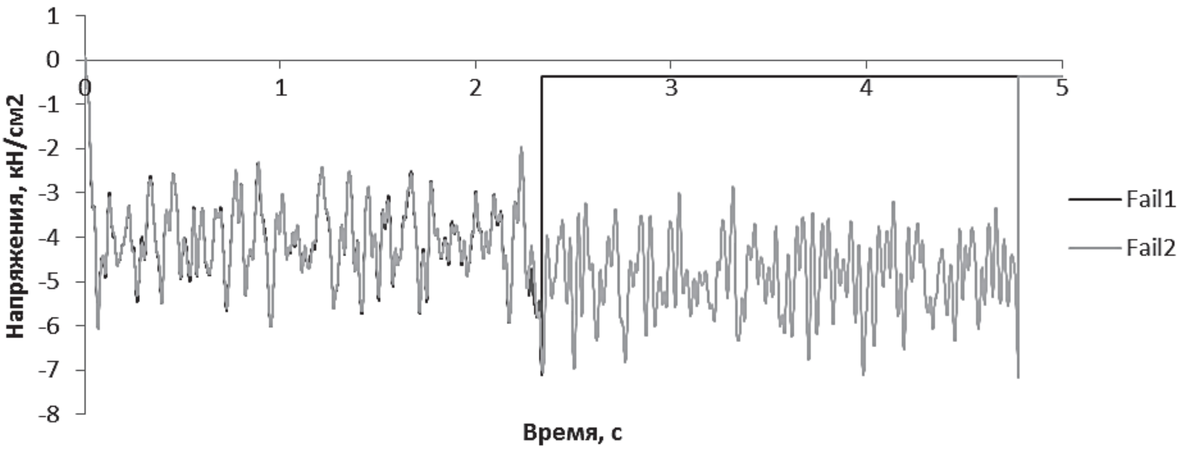
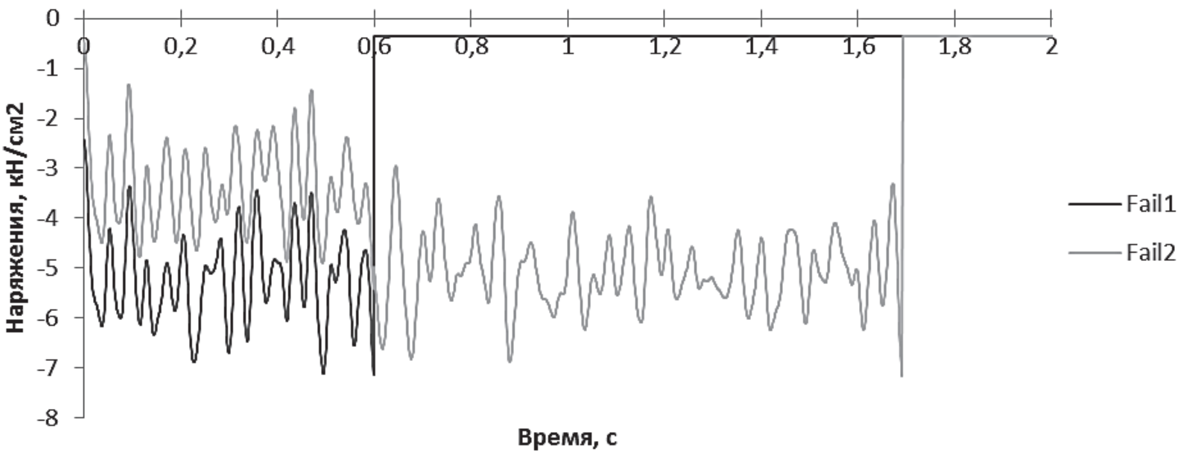


Рис. 5. Схема нижнего пояса

а



б



в

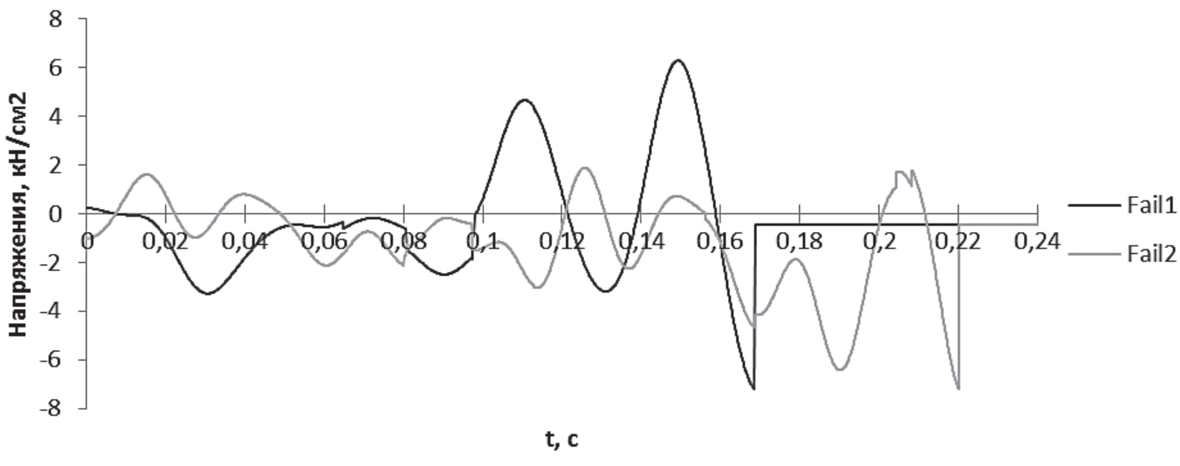


Рис. 6. Напряжения в характерных элементах:
а) сценарий 1; б) сценарий 2; в) сценарий 3

с капителями). Расчет ведется в среде MathCad Prime 2.0 по оригинальному алгоритму. Коэффициент уменьшения жесткости ζ принят в долях от величины, полученной экспериментально.

Рассмотрены три расчетных сценария:

1) удаление наиболее растянутого элемента сечением Тр. 102 × 4 (координаты концов 5'/И'–6'/И'), коэффициент уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента $\zeta = 0{,}05$. Величина масс соответствует полной расчетной нагрузке. Число учитываемых форм – 339;

2) удаление наиболее сжатого элемента сечением Тр. 102 × 4 (координаты концов 5/К–6/К), коэффициент уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента $\zeta = 0{,}05$. Величина масс соответствует полной расчетной нагрузке. Число учитываемых форм – 339;

3) удаление сечением Тр. 114 × 5,5, коэффициент уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента $\zeta = 0{,}0625$. Величина масс соответствует пониженной нагрузке, применяемой в расчетах на сейсмостойкость [3]. Число учитываемых форм 296.

В статье не приведены результаты расчетов по сценариям, предполагающим отказ одной из стоек, как приводящим к почти мгновенному лавинообразному разрушению конструкции. Отметим, что последовательный квазистатический расчет (с учетом приложения удвоенной реакции во вновь удаленном элементе) для каждого сценария приводит к разрушению всей конструкции.

На графиках (рис. 6) изображено изменение напряжений в двух элементах (Fail1 и Fail2), отказ которых наступает в последнюю очередь перед прекращением обрушения (сценарии 1 и 2, соответственно, рис. 6а, б) и наступлением геометрической изменяемости (сценарий 3, рис. 6в).

Первые два сценария приведены для наглядной демонстрации живучести металлической структуры даже при приложении полных расчетных нагрузок, при этом предполагается, что потерявший устойчивость элемент полностью перестает воспринимать нагрузку. Сценарий 3 – как пример расчета, приводящего к потере геометрической неизменяемости системы.

Результаты расчета по каждому сценарию:

сценарий 1 – потеря устойчивости восьми элементов;

сценарий 2 – потеря устойчивости двух элементов;

сценарий 3 – последовательная потеря устойчивости 12 элементов.

Ни в одном из оставшихся элементов по всем трем сценариям напряжения растяжения не достигают предела текучести.

Выводы

На основе подхода, описанного в первой части статьи, и расчетных предпосылок рассчитано структурное металлическое покрытие павильона № 5а ОАО «ЛЕНЭКСПО». В результате выяснилось, что структура в целом способна удовлетворять условиям прочности и устойчивости при локальных повреждениях ряда элементов за исключением капителей и опорных стоек.

Для всех трех приведенных расчетных сценариев не потребовалось перехода к трудоемкому прямому численному интегрированию. Как следствие, аналитическое решение, основанное на разложении по собственным формам, рационально при анализе поведения металлических пространственных покрытий..

Библиографический список

1. Бирбраер А. Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А. Н. Бирбраер. – СПб. : Наука, 1998. – 255 с.

2. Литвинский Г. Г. Экспериментальные исследования потери устойчивости несущих элемен-

тов крепи из коробчатого профиля / Г.Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. – 2013. – № 40. – С. 8–13.

3. СП 14.13330.2011. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81 / ФГУП «НИЦ „Строительство“». Введ. 2011-05-20. – М. : Стандартинформ, 2011.

4. Талантов И.С. Комбинированный спектрально-численный подход к решению задачи на внезапное удаление элементов на примере стального структурного покрытия. Часть 1 / И.С. Талантов // Изв. ПГУПС. – 2015. – № 3. – С. 201–206.

References

1. Birbrayer A.N. Raschet konstruktsiy na seysmostoykost [Calculation of Construction Elements' Seismic Stability]. St. Petersburg, Nauka, 1998. 255 p.

2. Litvinskiy G.G. *Sbornik nauchnykh trudov DonGTU – Proc. Donbas State Technical Univ.*, 2013, no. 40, pp. 8-13.

3. SP 14.13330.2011. Stroitelstvo v seysmicheskikh rayonakh [Construction in Seismic Regions]. Intr. 2011-05-20. Moscow, Standartinform, 2011.

4. Talantov I.S. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2015, Is. 3, pp. 201-206.

Автор выражает благодарность ЗАО «Эркон» и лично Г.И. Белому за предоставленные исходные данные для расчета.

ТАЛАНТОВ Иван Сергеевич – аспирант, i.talantov@yandex.ru (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет).

В статье К. К. Кима, Е. С. Мушкова, И. А. Нестерцова, И. С. Полунина, Д. А. Саенко «Неразрушающая диагностика степени ржавости железной арматуры опоры контактной сети», опубликованной в № 3 за 2015 г., рис. 1 следует читать так:

а

б

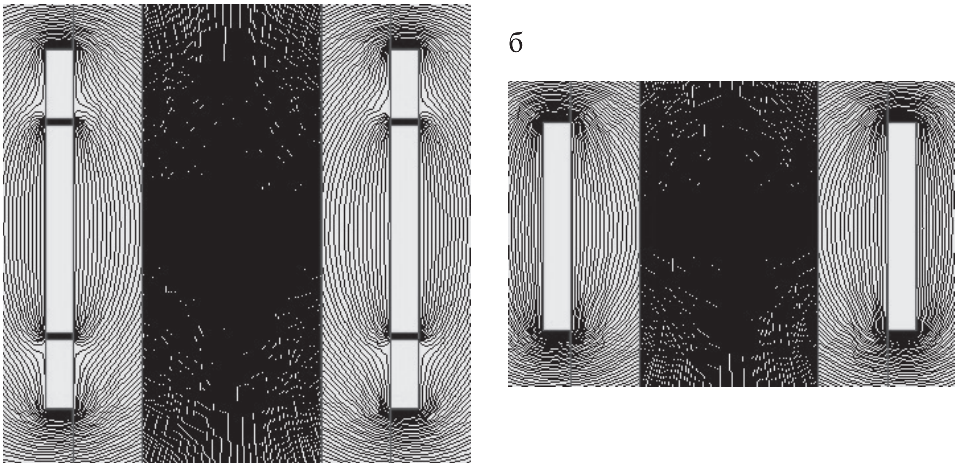


Рис. 1. Картина электростатического поля:
а) с дополнительными пластинами; б) без дополнительных пластин

СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ИЗВЕСТИЯ ПГУПС» ЗА 2015 ГОД