1 / 2004

ТРАНСПОРТ УРАЛА

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

1 Ефимов Александр Васильевич — главный редактор, ректор УрГУПС.
2 Сай Василий Михайлович — зам. главного редактора, проректор по научной работе (УрГУПС).
3 Асадченко Виталий Романович — зам. главного редактора, д.т.н., профессор (УрГУПС).
4 Силуков Юрий Дмитриевич — д.т.н., профессор (УГЛТУ).
5 Багин Юрий Иванович — д.т.н., профессор (УГТУ-УПИ)
6 Урманов Рифат Нурович — д.т.н., профессор (УрГУПС)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

1 Аккерман Геннадий Львович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
2 Александров Александр Эрнстович — к.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
3 Антропов Владимир Алексеевич — д.э.н., УрГУПС (Екатеринбург)
4 Аржанников Борис Алексеевич — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
5 Афанасенко Анатолий Ильич — д.т.н., УГГА (Екатеринбург)
6 Бачурин Николай Сергеевич — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
7 Баутин Сергей Петрович — д.ф.-м.н., УрГУПС (Екатеринбург)
8 Галкин Александр Геннадьевич — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
9 Глушко Марат Иванович — д.т.н., УО ЦНИИ МПС (Екатеринбург)
11 Готлиб Борис Михайлович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
12 Грицык Валерий Иванович — д.т.н., РГУПС (Ростов-на-Дону)
13 Ковалев Рудольф Николаевич — д.т.н., УГЛТУ (Екатеринбург)
14 Козлов Петр Алексеевич — д.т.н. (Москва)
15 Коротаев Владимир Николаевич — д.т.н., ПГТУ (Пермь)
16 Коркунова Ольга Владимировна — к.ф.н., УрГУПС (Екатеринбург)
17 Кузнецов Константин Борисович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
18 Лапшин Василий Федорович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
19 Наговицын Виктор Степанович — к.т.н. (Москва)
20 Павлюков Александр Эдуардович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
21 Паршин Анатолий Васильевич — к.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
22 Пикалин Юрий Анатольевич — д.э.н. (Свердловская железная дорога)
23 Попов Валерий Евгеньевич — д.т.н., НПП «Спектр» (Екатеринбург)
24 Рачек Светлана Витальевна — д.э.н., УрГУПС (Екатеринбург)
25 Резник Леонид Григорьевич — д.т.н., ТГНГУ (Тюмень)
26 Самуйлов Валерий Михайлович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
27 Сергеев Борис Сергеевич — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
28 Скоробогатов Семен Макеевич — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
29 Смольянинов Александр Васильевич — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
30 Ставров Адольф Павлович — д.т.н, ЮУГТУ (Челябинск)
31 Тимофеева Галина Адольфовна — д.ф.-м.н., УрГУПС (Екатеринбург)
32 Умняшкин Владимир Алексеевич — д.т.н., УДГУ (Ижевск)
33 Федотова Татьяна Николаевна — к.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)
34 Ялышев Юрий Иванович — д.ф.-м.н., УрГУПС (Екатеринбург)
35 Яровой Юрий Иванович — д.т.н., УрГУПС (Екатеринбург)

В НОМЕРЕ:

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТРАНСПОРТА

Ковалев Р.Н., Андреев В.Е. / **СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА УРАЛА** 2

Сай В.М., Шутюк С.В. / **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ КОМПАНИИ «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ» С РЕГИОНАМИ** 11

АВТОМОБИЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ

Умняшкин В.А., Филькин Н.М. / **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЕЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК** 17

Петров В.Ю., Коротаев В.Н., Якимов М.Р. / **СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ КРУПНЫХ ГОРОДОВ** 22

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ

Павлюков А.Э. / **ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ** 27

Баутин С.П., Жироухов Е.И., Рощупкин А.В. / **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ТОРМОЗНОЙ МАГИСТРАЛИ ПОЕЗДА ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ** 34

Румянцев С.А. / **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИХСЯ ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ** 40

Асадченко В.Р. / **ХАРАКТЕРИСТИКА СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕС С РЕЛЬСАМИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ** 48

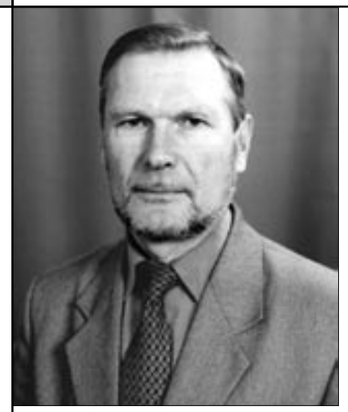
Ефимов А.В., Галкин А.Г. / **РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА** 53

Скоробогатов С.М. / **УСКОРЕННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ МАССИВНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ** 60

«Транспорт Урала». Научно- технический журнал.
620039, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66. Тел. (343) 245-31-88, e-mail: VSay@nis.usurt.ru
Учредитель: Уральский государственный университет путей сообщения.

Ковалев Р.Н., Андреев В.Е.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА УРАЛА



Ковалев Рудольф Николаевич,
д.т.н., профессор, УГЛТУ



Андреев Виктор Евгеньевич,
руководитель Свердловского отделения Российской транспортной инспекции

Особенности социально-экономического потенциала Уральского федерального округа (далее по тексту — УрФО) предопределили нынешнее состояние его транспортного комплекса. Субъекты РФ, входящие в УрФО, относятся к числу главных промышленных регионов России. Транспортный комплекс в округе — важнейшая составная часть производственной и социальной инфраструктуры.

Массовые грузовые и пассажирские перевозки железнодорожным транспортом общего пользования осуществляются филиалами ОАО «Российские железные дороги»: Свердловской и Южно-Уральской железными дорогами, частично — Горьковской на магистральном пути протяженностью более 9,0 тысяч километров. Кроме того, 1310 предприятий имеют подъездные железнодорожные пути не общего пользования протяженностью 10,6 тысячи километров.

Основной объем авиаперевозок на внутрироссийских и международных линиях обслуживается 63 аэропортами, из них 7 — федерального значения, на которых базируется 61 эксплуатант воздушного транспорта, имеющий 750 единиц воздушной техники.

Более трети всех перевозок грузов в округе осуществляется автомобильным транспортом. Эти перевозки выполняют более 40,0 тысяч владельцев автотранспорта различных форм собственности, в том числе 20,7 тысячи индивидуальных предпринимателей. Общий парк автомобилей постоянно растет. По состоянию на 01.01.03 юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям принадлежало 286,6 тысячи грузовых автомобилей, 45,3 тысячи автобусов и 76,5 тысячи легковых автомобилей. Автомобильный транспорт общего пользования, выполняющий регулярные маршрутные перевозки пассажиров, представлен перевозчиками различных форм собственности. Ежесуточно автобусами перевозится 4,5 миллиона пассажиров.

Городской электрический транспорт функционирует в 11 городах округа. Ежегодно городским электротранспортом перевозится более 870,0 миллионов пассажиров, или третья часть от общего количества перевезенных пассажиров во внутригородском сообщении.

Для многих населенных пунктов в УрФО единственным связующим звеном с «Большой землей» является внутренний водный транспорт. Общая протяженность судоходных речных коммуникаций округа составляет 11,4 тысячи километров, по которым ежегодно перевозится порядка 1,9 миллиона тонн грузов и 600,0 тысяч пассажиров.

В течение 2003 года в УрФО сохранялись стабильно высокие темпы роста промышленного производства. Физический объем производства промышленной продукции на 10,1% превысил результат аналогичного периода 2002 года. Экономический рост поддерживался сохранением положительной динамики производства практически во всех отраслях, но в первую очередь был обеспечен результатами работы топливной промышленности (рост на 10,5%), машиностроения (на 7,0%), черной (на 12,0%) и цветной металлургии (на 14,0%), электроэнергетики (на 9,0%). Естественно, что развитие промышленного производства положительно сказалось на всех сферах жизнедеятельности округа, в том числе и на развитии транспортного комплекса. По итогам работы за 10 месяцев 2003 года в целом по округу к соответствующему периоду 2002 года объемы перевозок грузов всеми видами транспорта возросли на 4,3%, или на 45,0 миллионов тонн, грузооборот — на 8,7%, или на 70,6 миллиарда тонно-километров. Рост объемов перевозок грузов достигнут на всех видах транспорта, за исключением внутреннего водного (таблица 1).

Таблица 1 — Объемы перевозок грузов и пассажиров в Уральском федеральном округе за январь – сентябрь 2003 года

Показатель	Отчетный период	Всего по УрФО	В том числе по субъектам РФ, входящим в состав УрФО					
			Курганская обл.	Свердловская обл.	Тюменская обл.	Челябинская обл.	ХМАО	ЯНАО
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перевезено грузов, всего, млн. т	2002	1053,55	12,34	241,19	522,62	174,50	80,10	22,80
	2003	1098,40	11,82	244,481	546,47	162,90	105,2	27,60
	% к АПП	104,3	95,2	101,4	104,6	93,3	131,3	121,1
В том числе: железнодорожным транспортом общего пользования	2002	158,200	1,330	90,220	7,250	59,400	-	-
	2003	166,452	1,434	92,300	9,118	63,600	-	-
	% к АПП	105,2	107,8	102,3	125,8	107,1	-	-
автомобильным транспортом, всего	2002	352,47	11,01	93,60	29,86	115,10	80,10	22,80
	2003	359,38	10,38	90,00	26,90	99,30	105,20	27,60
	% к АПП	102,0	94,3	96,1	90,1	86,3	131,3	121,1
В том числе: предприятиями автотранспорта всех отраслей экономики	2002	38,41	1,81	13,95	4,95	5,90	9,90	1,90
	2003	43,99	1,60	13,60	4,40	9,18	11,50	3,70
	% к АПП	114,5	88,8	97,5	88,9	155,7	116,2	194,7
предприятиями, отнесенными к подотрасли автомобильный транспорт	2002	36,57	1,67	13,95	4,95	4,20	9,90	1,90
	2003	38,58	1,48	13,60	4,40	3,90	11,50	3,70
	% к АПП	105,5	88,6	97,5	88,9	92,9	116,2	194,7
воздушным транспортом	2002	0,085	-	0,072	0,013	-	-	-
	2003	0,091	-	0,081	0,010	-	-	-
	% к АПП	107,1	-	112,5	76,9	-	-	-
внутренним водным транспортом	2002	2,500	-	-	2,500	-	-	-
	2003	1,845	-	-	1,845	-	-	-
	% к АПП	73,8	-	-	73,8	-	-	-
трубопроводным транспортом	2002	540,300	-	57,300	483,000	-	-	-
	2003	570,700	-	62,100	508,600	-	-	-
	% к АПП	105,6	-	108,4	105,3	-	-	-
Грузооборот, всего, млн. тн-км,	2002	813346,0	27740,0	118342,0	624414,0	42850,0	-	-
	2003	883969,0	33121,0	132176,0	671172,0	47500,0	-	-
	% к АПП	108,7	119,4	111,7	107,5	110,9	-	-

Таблица 1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
В том числе: железно-дорожным транспортом общего пользования	2002	203899,0	27469,0	90850,0	44840,0	40740,0	-	-
	2003	229973,0	32873,0	102300,0	49500,0	45300,0	-	-
	% к АПП	112,8	119,7	112,6	110,4	111,2	-	-
автомо-бильным транспортом, всего	2002	4631,0	271,0	1570,0	680,0	2110,0	-	-
	2003	4851,0	248,0	1653,0	750,0	2200,0	-	-
	% к АПП	104,8	91,5	105,3	110,3	104,3	-	-
В том числе: предпри-ятиями автотранс-порта всех отраслей экономики	2002	790,0	120,0	270,0	190,0	210,0	-	-
	2003	790,0	90,0	260,0	200,0	240,0	-	-
	% к АПП	100,0	75,0	96,3	105,3	114,3	-	-
предприяти-ями, отне-сенными к подотрасли автомо-бильный транспорт	2002	690,0	120,0	270,0	190,0	110,0	-	-
	2003	650,0	90,0	260,0	200,0	100,0	-	-
	% к АПП	94,2	75,0	96,3	105,3	110,0	-	-
воздушным транспортом	2002	46,0	-	22,0	24,0	-	-	-
	2003	45,0	-	23,0	22,0	-	-	-
	% к АПП	97,8	-	104,5	91,7	-	-	-
внутренним водным транспортом	2002	1570,0	-	-	1570,0	-	-	-
	2003	1500,0	-	-	1500,0	-	-	-
	% к АПП	95,5	-	-	95,5	-	-	-
трубо-проводным транспортом	2002	603200,0	-	25900,0	577300,0	-	-	-
	2003	647600,0	-	28200,0	619400,0	-	-	-
	% к АПП	107,4	-	108,9	107,3	-	-	-
Перевезено пассажиров, всего, млн. пас.	2002	1433,727	142,327	644,750	185,120	339,530	98,50	23,500
	2003	1460,385	131,900	657,665	199,120	302,900	145,300	23,500
	% к АПП	101,9	92,7	102,0	107,6	89,2	147,5	100,0
В том числе: железно-дорожным транспортом общего поль-зования	2002	115,480	5,120	85,630	5,600	19,130	-	-
	2003	113,550	5,500	85,630	5,620	16,800	-	-
	% к АПП	98,3	107,4	100,0	100,4	87,8	-	-
автомобиль-ным транс-портом	2002	1315,300	137,200	558,500	177,200	320,400	98,500	23,500
	2003	1343,790	126,390	571,300	191,200	286,100	145,300	23,500
	% к АПП	102,2	92,1	102,3	107,9	89,3	147,5	100,0

Таблица 1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
воздушным транспор-том	2002	2,367	0,007	0,620	1,740	-	-	-
	2003	2,445	0,010	0,735	1,700	-	-	-
	% к АПП	103,3	142,9	118,5	97,7	-	-	-
внутренним водным транспор-том	2002	0,580	-	-	0,580	-	-	-
	2003	0,600	-	-	0,600	-	-	-
	% к АПП	103,4	-	-	103,4	-	-	-
Пассажи-рооборот, всего, млн. пас.-км	2002	33857,3	2173,3	15950,0	8984,0	5120,0	1450,0	180,0
	2003	34326,0	2194,0	16745,0	8951,0	4560,0	1700,0	176,0
	% к АПП	101,4	101,0	105,0	99,6	89,1	117,2	97,8
В том числе: железно-дорожным транспор-том общего пользова-ния	2002	18190,0	1280,0	10200,0	4400,0	2310,0	-	-
	2003	18335,0	1375,0	10500,0	4400,0	2060,0	-	-
	% к АПП	100,8	107,4	102,9	100,0	89,2	-	-
автомо-бильным транспор-том	2002	1096,0	880,0	4240,0	1400,0	2810,0	1450,0	180,0
	2003	11146,0	800,0	4430,0	1540,0	2500,0	1700,0	176,0
	% к АПП	101,7	90,9	104,5	110,0	89,0	117,2	97,8
воздушным транспор-том	2002	4673,3	13,3	1510,0	3150,0	-	-	-
	2003	4804,0	19,0	1815,0	2970,0	-	-	-
	% к АПП	105,3	142,9	120,2	94,3	-	-	-
внутренним водным транспор-том	2002	34,0	-	-	34,0	-	-	-
	2003	41,0	-	-	41,0	-	-	-
	% к АПП	120,6	-	-	120,6	-	-	-

Структура объемов перевозок грузов по видам транспорта и территориям УрФО имеет, как видно из табл. 1, ярко выраженную специфику. В 2003 году доли областей в общем объеме перевозок грузов выглядят следующим образом: Тюменская (включая Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа) — 61,8%, Свердловская — 22,3%, Челябинская — 14,8%, Курганская — 1,1%. По видам транспорта доминирующую роль играют трубопроводный транспорт — 52,0% от общего объема перевозок грузов и автомобильный — 32,6%. В структуре грузооборота трубопроводный транспорт выполняет 73,3% от общего объема, железнодорожный — 26,0%, на долю автомобильного транспорта приходится 0,5%. На эти пропорции наиболее значительное влияние оказывает грузооборот трубопроводного транспорта Тюменской области (70,1% от общего грузооборота УрФО). Подобная ситуация в транспортной сфере находится под определяющим влиянием структуры материального производства, в частности, обусловлена возрастающей долей топливно-сырьевых отраслей. Так же, как и в прежние годы, слабым звеном в транспортном комплексе УрФО остается Курганская область. Несмотря на некоторый рост объемных показателей на железнодорожном и воздушном транспорте, в целом транспортный комплекс этой области значительно отстает в своем развитии по сравнению с остальными субъектами РФ округа.

Наряду с частными проблемами отдельных видов транспорта, по-прежнему актуальной остается главная на протяжении многих лет проблема достижения рационального соотношения между видами транспорта, взаимосвязанной динамики в их развитии и использовании. То есть, проблемы, возникающие на стыках взаимодействия автомобильного, воздушного, железнодорожного, водного транспорта и дорожного хозяйства. Именно здесь имеют место в настоящее время наибольшие потери и диспропорции. В силу институциональных и организационных различий, а также ведомственной и территориальной разобщенности между видами и субъектами транспортной

деятельности грузовладельцы не всегда могут свободно избирать наиболее рациональные транспортные схемы. Намечается тенденция к непропорциональному развитию инфраструктуры видов транспорта, что ведет к утрате системного эффекта на рынке транспортных услуг как для производителей, так и для перевозчиков.

В целом для округа актуальной проблемой остается развитие инфраструктуры всех видов транспорта: контейнерных площадок, складских и перегрузочных мощностей, подъезных путей как для обеспечения интермодальных перевозок, так и для рационализации выбора транспортных схем, снижающей транспортные издержки по грузопотокам региона. Подробнее остановимся на проблемах внутреннего и международного автомобильного транспорта.

Для экономики УрФО характерен значительный удельный вес (более 50,0%) отраслей, ориентированных на использование автомобильного транспорта. Основная масса этих грузов (87,8%) перевозится автомобильным транспортом предприятий и организаций различных отраслей экономики. Профессиональные автомобилисты выполняют не более 10–12% перевозок грузов.

В 2003 году несколько улучшилось использование грузовых автомобилей как у профессиональных перевозчиков, так и у остальных юридических лиц, осуществляющих перевозки грузов. Выработка за 10 месяцев 2003 года на 1 среднесписочный грузовой автомобиль у профессионалов возросла на 200 тонн, у прочих перевозчиков — на 170 тонн, за счет чего у тех и у других достигнут весь прирост по объемам перевезенных грузов. Также за счет роста выработки на 1 среднесписочный автобус юридических лиц на 3,5 тысячи пассажиров достигнут весь прирост по объемам перевезенных пассажиров.

Распределение по формам собственности субъектов, исполняющих перевозочную автотранспортную деятельность по найму на основании полученных лицензий, приведено в таблице 2. Из этих данных видно, что в УрФО продолжается процесс разгосударствления субъектов, исполняющих автотранспортную деятельность. Если в 2002 г. удельный вес государственных и муниципальных перевозчиков, осуществляющих перевозки грузов и пассажиров по найму, составлял по количеству субъектов 14,9%, по количеству подвижного состава — 19,1%, то в 2003 году их доля составила соответственно 12,2% и 17,6%.

Преобладание на рынке автотранспортных услуг субъектов негосударственных форм собственности делает невозможным управление автотранспортной деятельностью посредством административных рычагов и настоятельно требует установления норм и правил исполнения этой деятельности путем принятия соответствующих законов на уровне Российской Федерации и субъектов РФ.

Анализируя информацию, полученную при лицензировании, следует отметить, что государственная стратегия, направленная на развитие субъектов малого и среднего бизнеса, достаточно быстрыми темпами реализуется на автомобильном транспорте в Уральском федеральном округе, о чем свидетельствуют данные таблицы 3.

Сегодня с полным основанием можно говорить о постепенном, но непрерывном вытеснении крупных автотранспортных предприятий — профессиональных перевозчиков индивидуальными предпринимателями и малыми предприятиями из всех секторов перевозочной автотранспортной деятельности. Как видно из табл. 3, удельный вес малых предприятий и индивидуальных предпринимателей увеличился в 2003 году по сравнению с 2002 годом на перевозках грузов по количеству субъектов с 76,1% до 79,7%, по подвижному составу — с 33,9% до 37,0% при соответствующем уменьшении удельного веса юридических лиц всех отраслей экономики, в том числе относящихся к подотрасли автомобильный транспорт. Особенно быстрыми темпами перераспределяется в пользу индивидуальных предпринимателей и малых предприятий сектор пассажирских перевозок. На перевозках пассажиров автобусами доля субъектов малого бизнеса увеличилась в отчетном году с 69,7 до 79,6%, то есть каждые восемь из десяти перевозящих пассажиров автобусов — индивидуальные предприниматели или малые предприятия. Такая же динамика складывается по количеству автобусов, удельный вес которых у малых предпринимателей увеличился с 24,7 до 36,1%. Практически не участвуют юридические лица в коммерческих перевозках пассажиров легковыми автомобилями. Этот сектор рынка автотранспортных услуг почти полностью занят субъектами малого бизнеса.

Подобную структурную перестройку отрасли автомобильный транспорт с усиливающимися тенденциями в сторону малых производителей и деградацией крупных специализированных автотранспортных предприятий трудно признать целесообразной. На наш взгляд, эти процессы происходят в силу сложившейся неравноправной конкуренции между различными субъектами в рамках одной и той же деятельности. Индивидуальные предприниматели, как правило не имеющие собственной производственной базы, систем контроля за работой автомобилей и в значительной части не подлежащие лицензированию, составляют неравноправную конкуренцию профессионалам.

В условиях отсутствия динамичного развития основных отраслей экономики, когда еще не сформированы стабильные грузопотоки, не определились основные грузоотправители и грузополучатели, когда большинство предприятий имеют собственные автомобили, а профессиональные автомобилисты перебиваются разовыми заказами, большое значение для выживания имеет уровень тарифов на перевозку. Естественно, что индивидуалы, имея возможность применять демпинговые цены, постепенно вытесняют профессиональных перевозчиков. Кроме того, отсутствие у индивидуальных предпринимателей постоянных издержек на содержание производственной базы увеличивает оборачиваемость денежных средств и позволяет более быстрыми темпами производить замену старых автомобилей на новые, более производительные. Профессиональные

Таблица 2 — Количество субъектов, исполняющих перевозочную автотранспортную деятельность по найму на основании полученных лицензий в Уральском федеральном округе по состоянию на 01.01.04

Показатель	Отчетный период	Всего по УрФО	В т.ч. по субъектам РФ, входящим в состав УрФО					
			Курганская обл.	Свердловская обл.	Тюменская обл.	Челябинская обл.	ХМАО	ЯНАО
Кол-во субъектов, осуществляющих деятельность на основании лицензий, всего	01.01.03	22100	2199	6588	3197	2733	5096	2287
	01.01.04	23563	1830	7295	3562	2946	5303	2627
	%	106,6	83,2	110,7	111,4	107,8	104,1	114,9
В т.ч. по формам собственности: государственные предприятия федеральной собственности	01.01.03	138	36	18	15	36	31	2
	01.01.04	136	25	27	13	35	31	5
	%	98,6	69,4	150,0	86,7	97,2	100,0	250,0
государственные предприятия субъектов РФ	01.01.03	401	18	227	22	6	95	33
	01.01.04	255	15	171	17	6	35	11
	%	63,6	83,3	75,3	77,3	100,0	36,8	33,3
муниципальные предприятия	01.01.03	600	44	207	48	74	178	49
	01.01.04	505	36	181	49	75	131	33
	%	84,2	81,8	87,4	102,1	101,4	73,6	67,3
предприятия общественных объединений	01.01.03	87	17	31	6	20	10	3
	01.01.04	71	12	23	8	21	5	2
	%	81,6	70,6	74,2	133,3	105,0	50,0	66,7
частные предприятия	01.01.03	5247	445	1914	790	866	1140	92
	01.01.04	5553	354	1970	788	896	1336	209
	%	105,8	79,6	102,9	99,7	103,5	117,2	227,2
предприятия совместной российской и иностранной собственности	01.01.03	1149	142	201	124	120	355	207
	01.01.04	854	96	188	95	118	315	42
	%	74,3	67,6	93,5	76,6	98,3	88,7	20,3
предприниматели	01.01.03	14478	1497	3990	2192	1611	3287	1901
	01.01.04	16189	1292	4735	2592	1795	3450	2325
	%	111,8	86,3	118,7	118,2	111,4	105,0	122,3

же перевозчики такой возможности практически лишены. Имея на балансе значительные основные фонды, которые в настоящее время загружены максимум на 10–15% своей мощности, профессионалы отвлекают до 40% денежных средств на покрытие постоянных расходов (арендную плату за землю, коммунальные услуги, расходы на охрану и т.д.), из-за чего уменьшается масса оборотных и внеоборотных активов предприятия и, следовательно, теряется возможность инвестировать развитие производства. При среднегодовом увеличении общего парка грузовых автомобилей в УрФО на 1,7–2% количество грузовых автомобилей у профессиональных перевозчиков сокращается в среднем на 10–15% ежегодно.

Неравенство условий на регулярных перевозках пассажиров автобусами создается наличием льготных категорий пассажиров. Обязанность исполнять законы в части бесплатного провоза льготных пассажиров фактически распространяется только на профессионалов. Альтернативные перевозчики большинство маршрутов выполняют в режиме маршрутных такси, т.е. только за плату, в том числе на междугородных и пригородных перевозках.

Таблица 3 — Структура субъектов, исполняющих автотранспортную деятельность в Уральском федеральном округе по состоянию на 01.01.04

Виды перевозочной деятельности	Отчетный период	Всего	В том числе			
			относящихся к подотрасли автомобильный транспорт	малые предприятия	предприятия различных отраслей экономики	индивидуальные предприниматели
Количество субъектов						
Перевозки грузов	01.01.03	16810	549	3264	3457	9540
	уд. вес,%	100,0	3,3	19,3	20,6	56,8
	01.01.04	15954	474	3523	2766	9191
	уд. вес,%	100,0	3,0	22,1	17,3	57,6
Перевозки пассажиров автобусами	01.01.03	4271	324	287	970	2690
	уд. вес,%	100,0	7,6	6,7	22,7	63,0
	01.01.04	5341	299	431	793	3818
	уд. вес,%	100,0	5,6	8,1	14,8	71,5
Перевозки пассажиров легковыми автомобилями	01.01.03	2618	71	60	231	2256
	уд. вес,%	100,0	2,7	2,3	8,8	86,2
	01.01.04	3696	82	133	149	3332
	уд. вес,%	100,0	2,2	3,6	4,0	90,2
Количество автотранспортных средств						
Перевозки грузов	01.01.03	82513	10234	15639	44326	12314
	уд. вес,%	100,0	12,4	19,0	53,7	14,9
	01.01.04	82859	10227	17022	41979	13631
	уд. вес,%	100,0	12,3	20,5	50,7	16,5
Перевозки пассажиров автобусами	01.01.03	25905	8775	1458	10717	4955
	уд. вес,%	100,0	33,9	5,6	41,4	19,1
	01.01.04	28471	8180	2061	10023	8207
	уд. вес,%	100,0	28,7	7,2	35,2	28,9
Перевозки пассажиров легковыми автомобилями	01.01.03	9885	512	661	2951	5761
	уд. вес,%	100,0	5,2	6,7	29,9	58,2
	01.01.04	13939	971	1139	3289	8540
	уд. вес,%	100,0	7,0	8,2	23,6	61,2

Не ставя под сомнение необходимость активного развития малого и среднего бизнеса, все же считаем, что к этим вопросам необходимо подходить дифференцированно, по отраслям экономики. В базовых отраслях: машиностроении, металлургии, энергетике, добывающей промышленности и других — малые предприятия, отвлекая на себя часть нерентабельных для крупного предприятия производств (изготовление крепежных изделий, заготовительное производство, любое обслуживающее производство), способствуют более эффективному развитию основного производства. На автомобильном транспорте в условиях экономической нестабильности, отсутствия отработанных механизмов государственной поддержки и правовых норм функционирования автомобильного транспорта, соответствующих рыночной экономике, индивидуальные предприниматели способствуют постепенному вытеснению профессиональных автомобилистов с рынка вообще.

Очевидно, что осуществлять серьезную государственную транспортную политику, опираясь даже на очень большое количество индивидуальных предпринимателей и малых перевозчиков, невозможно, так как мелкий производитель не в состоянии решать вопросы расширенного воспроизводства. Все-таки цивилизованной основой любой отрасли, в том числе и автотранспортной, являются высокотехнологичные специализированные предприятия, имеющие технически оснащенные производства по выполнению полного цикла технологического процесса по ремонту, диагностированию и техническому обслуживанию подвижного состава, профессионально подготовленных специалистов, знания правил технической и коммерческой эксплуатации, отработанные системы обеспечения безопасности дорожного движения и экологической безопасности.

Все более обостряются проблемы цивилизованного развития конкуренции в секторе регулярных перевозок пассажиров автобусами, особенно на городском пассажирском транспорте (ГПТ). Существенные проблемы совершенствования ГПТ связаны с противоречиями в действующем законодательстве, которое к тому же не в полной мере отражает изменения в вопросах как организации, так и правил перевозок. Они затрудняют введение конкурсной системы допуска операторов на городские маршруты, использование договорной основы их взаимоотношений с администрациями муниципальных образований, внедрение других, принятых в мировой практике методов организации работы ГПТ в условиях рыночных отношений.

Привлечение на маршруты субъектов частного бизнеса несколько повысило уровень транспортного обслуживания населения. Однако острота проблем ГПТ продолжает нарастать. Численность автобусов малой вместимости, чаще всего используемых альтернативными перевозчиками, в ряде городов превысила предел, допустимый с точки зрения пропускной способности уличной сети и обеспечения безопасности. Кроме того, для полного и качественного удовлетворения потребности населения в перевозках (особенно в часы пик) неоправданно использование на пассажироемких маршрутах автобусов малой вместимости — здесь целесообразнее применять большие специализированные автобусы.

Существующие правовые и экономические отношения между органами местного самоуправления как заказчиков перевозок, перевозчиками и пассажирами не соответствуют сложившейся и перспективной социально-экономической ситуации, ограничивают эффективное привлечение в сектор ГПТ частных инвестиций и развитие конкурентной среды. Отсутствует мотивация снижения затрат на перевозки пассажиров локальными монополистами ГПТ. Не отработаны методы объективной (нормативной) оценки потребности операционных расходов предприятий ГПТ для выполнения заказов на пассажирские перевозки. Ранее дотационность пассажирских перевозок ГПТ была связана с необходимостью поддержания социально приемлемого уровня тарифов на проезд и они были ниже себестоимости перевозок. В настоящее время ситуация меняется. В большинстве регионов себестоимость перевозки пассажира на городских маршрутах стала ниже тарифа. У альтернативных перевозчиков, не применяющих нормы по льготному проезду, рентабельность перевозок превышает все разумные пределы. Следовательно, можно сделать вывод, что тариф за проезд утратил свою социальную ориентацию и в большинстве регионов превышает реальные возможности основной массы населения по оплате транспортных расходов.

Экономический рост округа уже в ближайшей перспективе может сдерживаться отсутствием у ГПТ потенциальных возможностей по обеспечению роста подвижности населения, а значит, мобильности трудовых ресурсов. Становится очевидным, что необходимы значительные средства для вывода ГПТ из кризиса.

Без проведения комплексного реформирования ГПТ, охватывающего все уровни управления и все стороны его деятельности, не обойтись. В правовом аспекте реформирование ГПТ должно четко определить, что органы местного самоуправления имеют исключительное право на организацию транспортного обслуживания населения на маршрутной сети муниципального образования. Им также предоставляется право регулировать доступ на маршрутную сеть всех операторов общественного транспорта. К исключительным полномочиям органа местного самоуправления должно относиться: формирование маршрутной сети ГПТ; установление расписаний (графиков) и условий движения транспортных средств на маршрутах ГПТ; определение условий доступа операторов на маршрутную сеть. Орган местного самоуправления должен выступать в качестве заказчика услуг на перевозки по муниципальным маршрутам и осуществлять финансовую поддержку работы на этих маршрутах не только муниципальных автопредприятий, но и иных операторов. Отношения между органом местного самоуправления и операторами должны устанавливаться на основе муниципального заказа и договора. Перевозки сверх муниципального заказа по остальным маршрутам утвержденной сети организуются также на основе открытых конкурсных процедур, проводимых органом местного самоуправления, при этом победителю конкурса при заключении договора передается право осуществления обслуживания населения на маршруте (группе маршрутов) на срок, позволяющий при эффективной работе окупить вложенные инвестиции. У операторов должно быть право вносить на рассмотрение органу местного самоуправления обоснованные предложения о расширении маршрутной сети. Право участия в конкурсе должны получать любые операторы, имеющие лицензию. В правовом плане также должна быть определена компетентность различных уровней власти в вопросах тарификации на ГПТ.

Из сказанного можно сделать вывод, что для цивилизованного развития автотранспортной деятельности необходимо принятие законодательных актов, устанавливающих равные правила для всех операторов, нормы государственного регулирования тарифов на автомобильном транспорте.

Для округа, расположенного на границе Евроатлан-

тического и Азиатско-Тихоокеанского экономического пространства, на стыке хозяйственных интересов, формирующихся в результате крупных потоков товаров, сырья и людей, большое значение имеет уровень развития международных перевозок грузов и пассажиров автомобильным транспортом. Однако в УрФО складывается неудовлетворительная ситуация с международными перевозками.

В целом по округу впервые за последние годы в 2003 году несколько (на 108,8 тыс. тонн) увеличились экспортно-импортные перевозки автомобильным транспортом к уровню 2002 года. Удельный вес объемов автомобильных перевозок в международном сообщении в округе в общем объеме перевезенных в России грузов хотя и увеличился в отчетном году на 0,2%, но все равно остается очень низким — всего 1,9%. Производя более 16% внутреннего валового продукта Российской Федерации, УрФО имеет самый низкий в России удельный вес экспортно-импортных объемов перевезенных грузов автомобильным транспортом. В 2003 году уменьшили объемы перевозок грузов в международном сообщении Тюменская область на 9,0 тысяч тонн, или на 18,2%, и Ямало-Ненецкий автономный округ — на 0,4 тысячи тонн, или на 37,1%.

Также самым низким в России (12,9%) остается в УрФО участие российских перевозчиков в международных автомобильных перевозках, несмотря на то что особенностью рынка международных перевозок в округе является преобладание объемов перевозок в экспортном направлении. Если в целом по России удельный вес российских перевозчиков в общих объемах перевозок грузов ежегодно понемногу, но увеличивается (2001 г. — 32,3%, 2002 г. — 34,6%, 2003 г. — 36,0%), то у нас он снизился с 13,1% в 2001 году до 12,9% в 2003 году и немного (на 0,6%) увеличился к 2002 году. Снижение удельного веса российских перевозчиков в международных перевозках в сравнении с 2002 годом произошло в Курганской (с 5,8 до 3,3%) и Тюменской (с 8,2 до 7,7%)областях. В 2003 году основными конкурентами на рынке международных автомобильных перевозок грузов были перевозчики Казахстана, Беларуси, Украины, Латвии, Турции, Узбекистана.

Следует особо отметить высокий темп прироста перевозчиков третьих стран, который в УрФО в 2003 году составил 17,2%. Наиболее активно среди перевозчиков третьих стран работают автотранспортные предприятия Беларуси, получившие в 2002 году на рынке автомобильных перевозок российских грузов более 300,0 миллионов долларов. Приведенные данные свидетельствуют о том, что перевозчики третьих стран заняли и удерживают свою нишу на рынке международных автотранспортных услуг РФ, и особенно УрФО, успешно конкурируя с российскими перевозчиками и перевозчиками второй стороны. Этому в немалой степени способствует сложившаяся в России система выдачи разрешений на ввоз (вывоз) грузов в Российскую Федерацию, при которой в отношении перевозчиков ряда стран российские компетентные органы не проводят жесткой политики ограничения доступа на российский рынок.

Одной из причин, способствующих снижению конкурентоспособности российских автотранспортных компаний, является взимание дорожных сборов с российских перевозчиков на территории иностранных государств (в том числе и в Беларуси) при отсутствии таких сборов с иностранных перевозчиков на территории России. Таким образом, создаются неравные конкурентные условия, так как иностранцы имеют возможность применять более низкие тарифы за перевозку. Ежегодно российские перевозчики выплачивают на территории иностранных государств порядка 12,0 миллионов долларов США. В 1998 году Правительством РФ было принято постановление от 24.06.98 № 638 «О сборе за проезд с автотранспортных средств, зарегистрированных на территории иностранных государств, по автомобильным дорогам Российской Федерации», которое в настоящее время практически не действует.

Также неудовлетворительно складывается в УрФО ситуация с международными перевозками пассажиров. Несмотря на то что международные перевозки пассажиров должны выполняться на паритетных началах, российские автомобилисты не осваивают этот сектор транспортного рынка. Абсолютное большинство регулярных и нерегулярных рейсов выполняют иностранные перевозчики.

Следовательно, можно сделать вывод, что автомобилисты УрФО (в отличие от других федеральных округов) достаточно быстрыми темпами теряют и без того незначительные позиции в сфере международных перевозок.

Утрата позиций российских автомобилистов ощутимо сказывается на состоянии бюджетов субъектов Российской Федерации. Ориентировочно только в 2003 году суммарно бюджеты всех субъектов РФ в УрФО недополучили 1,2 миллиона долларов США, в том числе Курганская область — $ 80,0 тысяч, Свердловская — 710,0, Челябинская — 290,0 и Тюменская — $ 90,0 тысяч.

В целом эффективность работы российских автоперевозчиков на международном рынке транспортных услуг не соответствует их потенциальным возможностям, причиной чего является несовершенство политических, правовых, финансовых и других условий деятельности российского автомобильного транспорта. С целью защиты интересов российских автомобилистов на рынке международных перевозок в настоящее время было бы целесообразным:

— принять правовые акты и разработать механизмы как на уровне субъектов Российской Федерации, так и на федеральном уровне, позволяющие осуществлять планомерное обновление автотранспортных средств российским перевозчикам, выполняющим международные перевозки;

— принять необходимые меры для обеспечения выполнения постановления Правительства РФ от 24.06.98 № 638 «О сборе за проезд с автотранспортных средств, зарегистрированных на территории иностранных государств, по автомобильным дорогам Российской Федерации».

Сай В.М., Шутюк С.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ КОМПАНИИ «РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ» С РЕГИОНАМИ



Сай Василий Михайлович,
д.т.н., профессор кафедры «Путь и железнодорожное строительство», УрГУПС



Шутюк Сергей Владимирович,
к. п. н., начальник департамента ОАО «РЖД»

Проблема взаимоотношений железных дорог Министерства путей сообщения с российскими регионами возникла достаточно давно, включает в себя различные аспекты [1,2] и остается чрезвычайно актуальной и в настоящее время.

В связи с этим возникает задача разработки научно обоснованных концептуальных подходов и общей стратегии взаимоотношений компании «Российские железные дороги» с регионами на продолжительный период времени, с учетом оптимального сочетания интересов компании и регионов, а также территориальных экономических и социальных особенностей, сезонных колебаний пассажиропотоков и грузопотоков и других ограничений.

Цель настоящей статьи — выделить основные этапы создания такой системы, определить ее составляющие, а также выявить и зафиксировать факторы, которые необходимо учитывать при создании системы взаимодействия железнодорожного транспорта с регионами, и разработать пути формализации математического моделирования процессов их взаимодействия. Целесообразно также сформулировать ожидаемые результаты научных разработок в этой области.

Планируемая комплексная система, на наш взгляд, должна содержать:

— обоснованную организационную структуру взаимосвязей с регионами;

— выработанные практическим путем системы обратной связи и учета региональных интересов и их особенностей;

— концептуальное представление и разработанные методики моделирования и расчетов механизмов взаимодействия железнодорожного транспорта с регионами;

— математическую модель структурного взаимодействия с регионами, созданную на основании разработанных методик;

— программный продукт, позволяющий формировать и анализировать различные хозяйственные ситуации, проигрывать возможные производственные сценарии и выдавать практические рекомендации по принятию решений в сфере взаимоотношений железнодорожного транспорта с территориями.

Комплексная система взаимодействия ОАО «Российские железные дороги» с регионами должна иметь естественные возможности ее расширения и детализации.

Элементы рассматриваемой системы:

— организационная структура управления ОАО «Российские железные дороги»;

— инфраструктура компании «Российские железные дороги»;

— административно-управленческие структуры субъектов Российской Федерации и федеральных округов;

— инфраструктура субъектов Российской Федерации, хозяйствующие субъекты, финансовые организации и т.д.

Именно эти основные элементы должны стать составляющими создаваемых математических моделей и формализаций процессов взаимодействия, т.к. именно они и их взаимосвязи, по сути, образуют само понятие взаимодействия ОАО «Российские железные дороги» и регионов его непосредственными участниками и реализаторами.

Важнейшие составляющие создаваемой комплексной системы организации взаимодействия компании «Российские железные дороги» с регионами:

— адекватные математические модели элементов и подсистем железнодорожного транспорта, его структур управления, региональных административных и управленческих структур, инфраструктуры регионов и хозяйствующих субъектов территорий;

— совокупность методик и алгоритмов работы с данными математическими моделями;

— программная компьютерная реализация как самих моделей, так и разработанных методик и алгоритмов;

— оптимизационные модели формирования политики взаимодействия компании «Российские железные дороги» с регионами.

Конечный продукт проводимых научных исследований

и разработок — общая стратегия взаимодействия компании «Российские железные дороги» с регионами. Комплексная программная система организации взаимодействия железнодорожного транспорта с регионами должна выдавать обоснованные и реальные практические рекомендации по принятию стратегических решений в сфере работы с территориями России, а также осуществлять анализ возможных управленческих решений, давать рекомендации по техническому осуществлению указанного взаимодействия на уровне конкретного региона.

Использование таких методик и компьютерных программ позволит руководителям компании качественно решать задачи, возникающие в сфере взаимодействия железнодорожного транспорта с регионами, проигрывать развитие различных экономических и производственных ситуаций с целью выбора и принятия правильного управляющего решения.

В плане решаемых задач к моделям выдвигается ряд требований. Разрабатываемые модели должны:

— адекватно, полно и достаточно просто отражать моделируемые структуры, интересующие элементы и связи;

— быть основой для разработки системных методик и алгоритмов решения поставленных задач;

— стать основным рабочим объектом (рабочей средой) и одновременно базой данных для разработанных методик и алгоритмов;

— допускать возможность применения различных модельных гомоморфных преобразований, т.е. у исследователей (и впоследствии у пользователей) должны быть возможности изменения, расширения и детализации модели, включения и учета новых связей и факторов либо, наоборот, огрубления и увеличения масштаба, уменьшения степени детализации — сообразно с решаемыми задачами;

— быть обозримыми, наглядными, не содержащими гигантского числа элементов, доступными и верифицируемыми;

— быть реализуемыми на компьютере.

На первоначальном этапе пользователь, имеющий перед собой математическую модель комплексной системы организации взаимодействия, системные методики и их программно-аппаратную реализацию, должен получить возможность провести численный эксперимент (или, при необходимости, серию экспериментов). Результатом таких экспериментов должен стать анализ процессов взаимодействия, с дальнейшими рекомендациями по принятию управленческих решений в отношении конкретного региона или конкретной территории (схемы взаимодействия, планирование работ, график выполнения мероприятий, распределения ресурсов и др.). В конце разработок — научно обоснованная концепция взаимодействия компании «Российские железные дороги» с регионами, методики разработки стратегии и программ взаимодействия с конкретными территориями страны.

Взаимоотношения между компанией «Российские железные дороги» и субъектами Российской Федерации необходимо рассматривать как взаимоотношения социально-экономических подсистем, которые образуют некоторую социально-экономическую систему — составную часть страны как системы, представляющую собой совокупность узлов (производственных, экономических, административно-управляющих) и разнообразных связей между ними.

Этим объясняется предлагаемый математический аппарат моделирования — сетевые модели. Аппарат дискретного сетевого анализа, теории вероятностей, теории графов, дискретной оптимизации. Представляется вполне естественным формализовать взаимодействующие структуры железнодорожного транспорта и региональные территориальные структуры как элементы некоторой сети, а сами процессы взаимодействия — в виде связей между этими элементами.

Эффективность применения сетевой математической модели для моделирования структуры взаимосвязей компании «Российские железные дороги» с регионами ожидаема в силу того, что сетевые модели традиционно эффективны и хорошо зарекомендовали себя при решении родственных задач: при разработке и моделировании систем управления, транспортных сетей, систем связи, при планировании, обеспечении ритмичности производственного процесса, распределении ресурсов и т. п. Это объясняется не только естественностью представления реальных процессов взаимодействия между элементами некоторой сети, но и разработанностью соответствующего математического аппарата, предназначенного для анализа и оптимизации сетей, наличием эффективных алгоритмов, реализованных на современной вычислительной технике.

Сетевой подход позволяет [3]:

1. Строить модель сложной системы как совокупности простых систем.

2. Определить формальные процедуры для составления качественных характеристик системы.

3. Указать механизм взаимодействия компонентов управляющей системы с целью ее описания в терминах основных характеристик.

4. Определить, какие данные необходимы для исследования системы.

5. Провести начальные исследования управляющей системы и составить предварительное расписание работы ее компонентов с целью последующей их возможной реорганизации.

6. Создать специфические сетевые алгоритмы, оказывающиеся наиболее эффективными при изучении больших систем за счет того, что при анализе сети часто удается ограничиться изучением лишь некоторой части рассматриваемой системы.

Важным фактором, играющим в пользу сетевой модели взаимодействия железнодорожного транспорта с регионами, является человеческий фактор. Для практиков сетевые модели более понятны и наглядны, чем какие-либо другие. Руководителю предприятия легче понять сетевую диаграмму, нежели список абстрактных формул и алгебраических преобразований. Скорейшее понимание, естественно, влечет разумное внедрение и правильное практическое применение.

Основная идея моделирования структур взаимодействия с регионами заключается во введении в рассмотрение и использование нового математического понятия «многослойне модели», т.е. модели, состоящие из нескольких функциональных плоскостей. Такие многослойные сетевые модели в дальнейшем будем кратко называть сэндвич-моделями.

Различные слои сэндвич-моделей — это плоскости, соответствующие различным функциональным составляющим экономического хозяйства региона и различным функциональным плоскостям железнодорожного транспорта. Таким образом, каждый слой сэндвич-модели в отдельности представляет собой целую сеть элементов и связей между ними, условно расположенную и изображенную на отдельной плоскости. При этом предполагается, что, кроме сетевых связей внутри каждой плоскости, между различными плоскостями сэндвич-модели также имеются связи (дуги), изображающие и формализующие взаимоотношения между различными самостоятельными сетевыми структурами (слоями).

Различные плоскости сетевой сэндвич-модели интерпретируются как самостоятельные сетевые модели различных моделируемых составляющих регионального хозяйства — административной, экономической, структурно-управленческой. Кроме того, различные плоскости сэндвич-модели могут нести на себе структуры различных организационных, функциональных и производственных составляющих железнодорожного транспорта — плоскость Министерства транспорта России и плоскость «РЖД», плоскость пассажирских перевозок и плоскость грузовых перевозок, плоскость предприятий инфраструктуры и т.п.

Связи между различными плоскостями сэндвич-модели отражают и формализуют процессы взаимодействия плоскостей железнодорожного транспорта с региональными экономическими и административно-управленческими плоскостями, то есть, по сути, различные аспекты взаимодействия железнодорожного транспорта с регионами.

Введение в рассмотрение и применение таких сэндвич-моделей обуславливается необходимостью отражать в используемых моделях сам факт существования, наложения и взаимодействия на единой территории различных хозяйствующих субъектов со своими развитыми сетевыми организационными структурами.

Сэндвич-модель представляет собой раскрашенную сеть $G=(N, A)$, с помеченными узлами и помеченными ребрами, состоящую из k слоев (или плоскостей). Здесь $N = N_1 \cup N_2 \cup ... \cup N_k$ — множество узлов (или вершин), разбитое на k подмножеств (слоев, плоскостей); A — множество дуг (или ребер), соединяющих узлы из множества N. Узлы сети $G=(N, A)$ будем обозначать p_{ij}, где i — номер плоскости, содержащей данный узел; j — номер узла. Таким образом, $p_{ij} \in N_i$. Ребро, соединяющее узлы p_{ij} и p_{kl}, договоримся обозначать символами $r_{(ij)(kl)}$ или $(ij)\rightarrow(kl)$.

На рисунке 1 в качестве примера приведена диаграмма трехслойной сэндвич-модели.

Представление модели в компьютерном виде осуществляется традиционным способом — в виде матриц смежности и матриц меток. Метками как узлов, так и ребер служат векторы, т.е. кортежи из числовых данных, характеристик и параметров помечаемого объекта. В дальнейшем будем называть такие кортежи вектор-метками или векторами параметров. Вектор-метки узлов p_{ij} и ребер $r_{(ij)(kl)}$ обозначим теми же самыми буквами со стрелочками $\vec{p}_{ij}$ и $\vec{r}_{(ij)(kl)}$.

Приведем краткое описание различных элементов сэндвич-моделей и смысловые интерпретации этих элементов.

Узлы сэндвич-модели p_{ij} на диаграмме — это различные предприятия, экономические единицы, административные единицы, населенные пункты, хозяйствующие субъекты, управленческие структуры, банки, организации и т.п. Вектор-метка $\vec{p}_{(ij)}(\alpha_1,\alpha_2,...)$ узла p_{ij} представляет собой набор параметров $(\alpha_1,\alpha_2,...)$, характеризующих данный узел. Это различные числовые характеристики рассматриваемого узла — его тип, географическое расположение, мощность, приоритет, финансовые активы, устойчивость, коэффициенты выполнения контрактов и т.п. Конкретный выбор таких параметров обуславливается поставленными перед исследователем задачами. Количество параметров [размерность вектора $\vec{p}_{(ij)}(\alpha_1,\alpha_2,...)$] заранее не оговаривается и может быть по мере необходимости изменено в зависимости от целей исследования.

Ребра рассматриваемой сэндвич-модели могут быть нескольких типов: железнодорожный путь между узлами, информационная связь (в том числе директивное подчинение), контрактная (договорная) связь между предприятиями, иные производственные, финансовые и административные связи между рассматриваемыми субъектами. Тип ребра в модели обозначается его цветом и входит в качестве одного из параметров в вектор-метку данного ребра. Это означает, что в предлагаемой сэндвич-модели может быть отражено все многообразие связей и все аспекты взаимодействия между различными хозяйствующими и административными субъектами.

Ребра $r_{(ij)(kl)}$ между узлами, лежащими на одной плоскости N_k, — это внутрисетевые связи одной из рассматриваемых сетей (железнодорожного транспорта, административного управления и т.д.). Это могут быть директивно-распорядительные связи, договорные отношения, финансовые и ресурсные потоки, информационные связи и т.д. Вектор-метки $\vec{r}_{(ij)(kl)}(\beta_1,\beta_2,...)$ таких ребер содержат численные характеристики и показатели $(\beta_1,\beta_2,...)$ такого сорта связей — их тип, стоимости перевозок, длины путей между узлами, величины ресурсных или финансовых потоков, количественные показатели контрактов и договорных обязательств между узлами, сроки и объемы поставок и т.п.

Ребра $r_{(ij)(kl)}$ между узлами p_{ij} и p_{kl}, лежащими в разных плоскостях N_i и N_k, — связи между узлами различных сетей, отражающие и формализующие взаимодействие различных рассматриваемых структур. Ребра между узлами различных плоскостей могут символизировать законодательные и нормативные отношения между рассматриваемыми субъектами, информационные связи между ними,

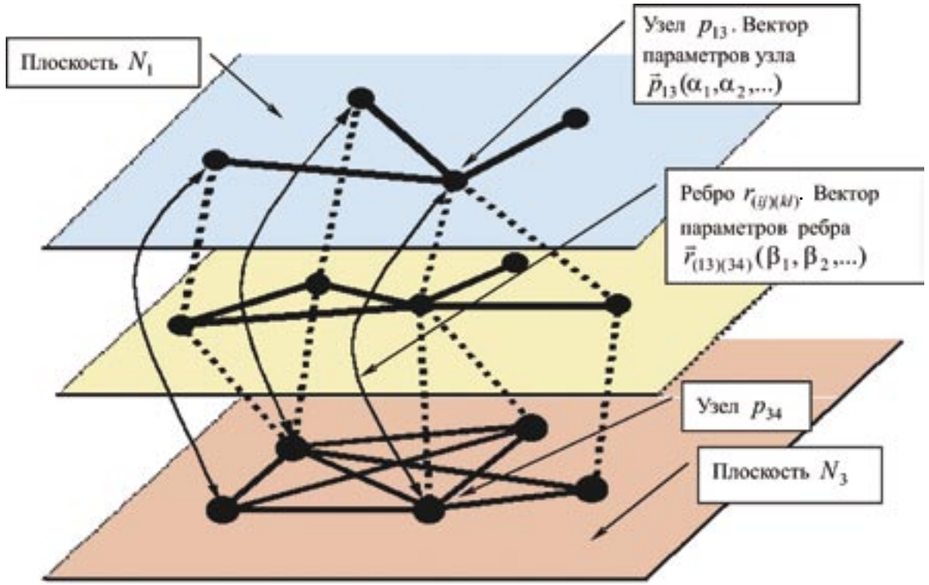


Рисунок 1 — Диаграмма трехслойной сэндвич-модели

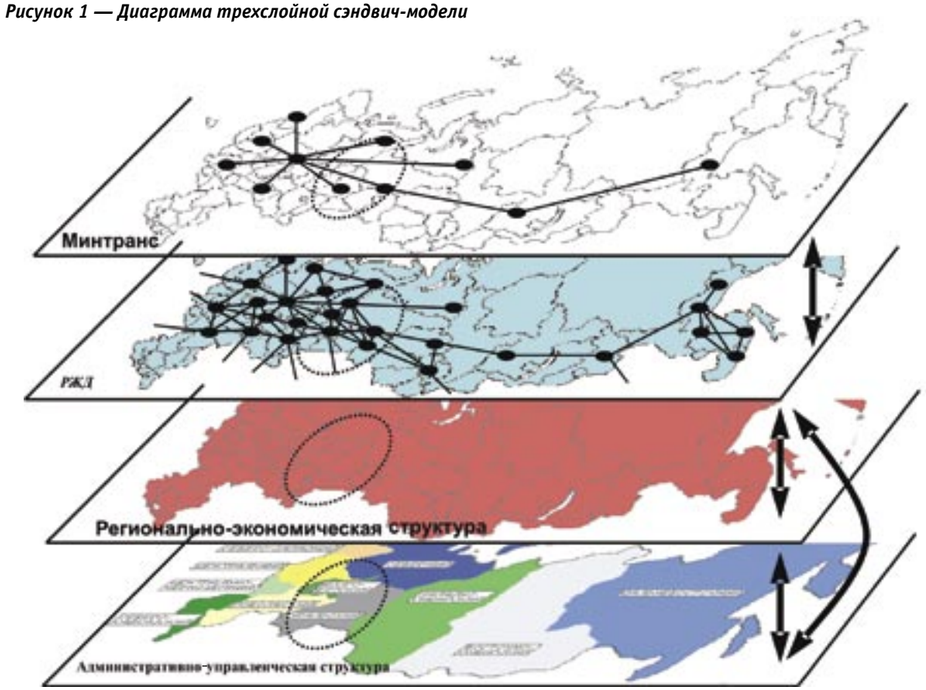


Рисунок 2 — Общая сэндвич-модель

договорные отношения, финансовые и ресурсные потоки и т.д. — словом, все те аспекты взаимодействия между различными плоскостями экономики регионов и структур железнодорожного транспорта, которые подлежат моделированию и изучению. Вектор-метки $\vec{r}_{(ij)(kl)}(\beta_1,\beta_2,...)$ таких ребер содержат численные характеристики $(\beta_1,\beta_2,...)$ и показатели взаимодействия между элементами различных плоскостей — величины финансовых и ресурсных потоков, суммы кредитов и задолженностей, претензии сторон, параметры договорных связей, информационных связей и т.п.

На рисунке 2 приведен один из возможных вариантов общей сэндвич-модели. Для определенности в предложенной сэндвич-модели первоначально, исходя из формулировки общей задачи, выделены четыре плоскости.

— Плоскость, отражающая административно-управленческую структуру. В этой плоскости узлами сети могут являться управленческие единицы, территориальные образования. Сеть напрямую соответствует административно-территориальному делению России. Ребра в этой сети могут отражать по крайней мере два типа связей: директивно-распорядительные и нормативно-законодательные, согласно уровням власти, и координационные связи, отражающие взаимодействие на одном управленческом уровне. В зависимости от постановки задач данная плоскость может быть разделена на несколько. Например, на плоскости, соответствующие исполнительной, законодательной и судебной власти. Понятно, что взаимодействие ОАО «Российские железные дороги» происходит в основном с исполнительной властью в центре и на местах.

— Плоскость, содержащая сеть регионально-экономической структуры. Эта плоскость соответствует экономическому устройству страны. Узлы этой сети — предприятия, организации и физические лица, объединенные местом проживания в населенных пунктах. Связи здесь носят как чисто экономический характер, например, отношения двух хозяйствующих субъектов, так и социальный, например, рабочие места, налоги, социальная политика. Существенная часть связей и потоков в этой плоскости — финансовые, ресурсные и информационные. В этой плоскости могут быть отдельно выделены сети, соответствующие юридическим и физическим лицам. Интересно отметить, что узлы этих сетей по-разному могут взаимодействовать с узлами сети ОАО «Российские железные дороги». С одной стороны, компания «Российские железные дороги» может оказывать услуги по перевозке грузов и пассажиров, а с другой — размещать объемные заказы на промышленных предприятиях, предоставлять рабочие места, участвовать в поддержании социальной сферы, т.е. являться одновременно поставщиком и потребителем услуг.

— Слой, соответствующий ОАО «Российские железные дороги». Это сеть, отражающая организационную структуру управления и инфраструктуру железнодорожного транспорта как компании. При решении конкретных задач будет весьма удобным разделить сети, реализующие перевозку грузов и пассажиров. Актуальной в этом случае представляется задача выявления затрат на поддержание инфраструктуры железнодорожного транспорта по отдельности на грузовые и пассажирские перевозки.

— Плоскость Министерства транспорта России содержит сеть административно-распорядительного воздействия на ОАО «Российские железные дороги» со стороны Правительства Российской Федерации.

Исходя из задачи исследования и организации долгосрочного взаимодействия РЖД с регионами в предложенной модели, очевидно, необходимо исследовать вертикальные связи между плоскостями. Между плоскостью РЖД и плоскостью административно-управленческой структуры существует ряд связей. Например, ОАО «Российские железные дороги» выполняет социальный заказ по обеспечению низкой цены на билеты для пассажирских перевозок, в которых заинтересована плоскость регионально-экономической структуры в части физических лиц и не заинтересована в части юридических лиц, осуществляющих грузовые перевозки, в цену которых может закладываться компенсация ОАО «Российские железные дороги» за пассажирское обслуживание.

В свою очередь, плоскость административно-управленческой структуры заинтересована в реализации такого социального заказа. Возникает прямое взаимодействие между сетью компании и административно-управленческой структурой, связанное с балансированием или компенсированием затрат, понесенных ОАО «Российские железные дороги». В этом случае удобно рассматривать взаимодействие «пассажирской» плоскости РЖД с физическими лицами в сети регионально-экономической структуры.

Аналогичным образом для исследования других видов вертикальных связей между плоскостями участвующие во взаимодействии слои могут быть детализированы, и в них выделены именно те плоскости, между которыми действует та или иная связь.

Вместе с тем на начальных этапах исследования уместно изучать не всю сэндвич-модель, а какой-то ее фрагмент, полученный вертикальным сечением предложенных плоскостей по границам отдельного региона, области или территории. После того как будет детально разработан аппарат, позволяющий моделировать, исследовать, регулировать и прогнозировать вертикальные взаимодействия в таких фрагментах, естественно исследовать взаимодействие между фрагментами и тем самым научиться работать со всей сэндвич-моделью в целом. На основе предлагаемой модели, по всей видимости, необходимо разработать интегральные характеристики взаимодействия между различными плоскостями, которые складываются из показателей отдельных вектор-меток связей между рассматриваемыми плоскостями (суммы потоков, суммы задолженностей, общий оборот, величины заключенных контрактов и т.д.). Именно в терминах таких характеристик возможно охарактеризовать общую картину взаимодействия ОАО «Российские железные дороги» с регионами. Их надо изучать и оптимизировать.

Априорные преимущества предлагаемой модели заключаются в возможности ее детализации за счет дальнейшего «расслоения» рассматриваемых плоскостей — разделения их на две и более плоскости. Такая процедура «расслоения» соответствует формализации и выделению в отдельное рассмотрение различных подструктур конкретной плоскости или различных функциональных направлений сети, расположенной на данной плоскости.

Предусмотрена возможность внесения в модель (в метки как узлов, так и ребер) любого количества интересующих нас параметров, которые могут влиять на исследуемые процессы и на решение поставленной задачи. Это обстоятельство весьма существенно, так как на первоначальном этапе исследований априори неясно, какие из характеристик и параметров являются наиболее существенными, а какие — второстепенными.

Имеется возможность выполнения над моделью различных гомоморфных преобразований — детализации или укрупнения масштаба, внесения дополнительных узлов или их удаления, объединения узлов в группы и т.д.

Модель легко может быть реализована на компьютере и в силу своего сетевого (графического) характера допускает наглядную визуализацию. Достаточно очевидно просматривается организация и хранение числовых данных.

Сетевая диаграмма модели соответствует географическому расположению моделируемой сети железнодорожных станций и предприятий по обслуживанию инфраструктуры.

Предлагаемая сетевая модель обозрима и вполне доступна в исследовании (в частности, традиционными методами сетевого анализа, теории графов и теории вероятности).

Литература

1. Шутюк С.В. Региональная политика в условиях реформирования отрасли // Железнодорожный транспорт. — 2002. — № 12. — С. 28–29.

2. Шутюк С.В. Развивать взаимовыгодное сотрудничество // Железнодорожный транспорт. — 2004. — № 3. — С. 9–13.

3. Сай В.М. Планетарные структуры управления на железнодорожном транспорте: Монография. — М.: ВИНИТИ РАН, 2003. — 345 с.

МОНОГРАФИЯ



В. М. САЙ
ПЛАНЕТАРНЫЕ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Монография посвящена реформированию железнодорожного транспорта: в ней обобщен зарубежный опыт реформирования, рассмотрены проблемы акционирования и приватизации, предложена планетарная структура корпорации ОАО «Российские железные дороги».

Предназначена для научных сотрудников, преподавателей высшей школы, аспирантов, а также практических работников, специализирующихся в области организации и управления на железнодорожном транспорте.

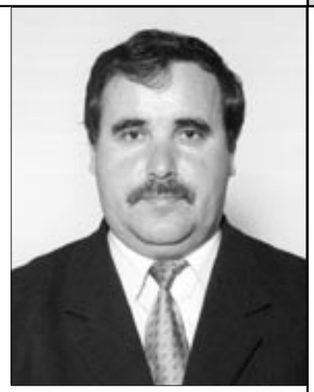
Умняшкин В.А., Филькин Н.М.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ И ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЕЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Один из резервов улучшения топливной экономичности и тягово-скоростных свойств выпускаемых и вновь разрабатываемых автомобилей — реализация в их конструкциях оптимальных параметров и характеристик энергосиловой установки, т.е. трансмиссии и энергетической установки, что требует разработки соответствующих методов исследования и методик расчета.



Умняшкин Владимир Алексеевич,
д. т.н., профессор, заведующий кафедрой «Дизайн промышленных изделий» УдГУ



Филькин Николай Михайлович,
д.т.н., начальник бюро инженерного анализа автомобиля. ОАО «ИжАвто»

В качестве энергетической установки может быть тепловой двигатель, электродвигатель и другие типы двигателей или какая-либо их комбинация (автомобили с комбинированными энергосиловыми установками).

Проведенный анализ и практика проектирования показали, что в общем случае оптимизация параметров и характеристик энергосиловой установки автомобиля возможна по трем направлениям, не исключающим друг друга: оптимизация конструктивных параметров трансмиссии для заданного автомобиля и установленной на нем энергетической установки; оптимизация параметров и характеристик энергетической установки при заданных других параметрах и характеристиках автомобиля; совместный поиск оптимальных параметров и характеристик трансмиссии и энергетической установки, т.е. энергосиловой установки в целом.

Исследования по данной тематике позволили разработать ряд методик расчета и оптимизации конструктивных и мощностных параметров и характеристик энергосиловых установок автомобилей, которые в настоящее время широко применяются на практике при создании новых конструкций энергосиловых установок.

1. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ ТРАНСМИССИИ

Проблема повышения топливной экономичности и тягово-скоростных свойств автомобиля за счет реализации в его конструкции оптимальных передаточных чисел возникает еще на ранней стадии проектирования и решается на протяжении всего срока проектирования, т.к. постоянно изменяются и уточняются параметры автомобиля в процессе проектирования. Но решить эту проблему не очень просто, так как единого критерия, который бы полностью характеризовал топливную экономичность и тягово-скоростные свойства автомобиля, пока не найдено. Поэтому задачу оптимизации приходится решать при помощи ряда частных критериев оптимальности [1, 2].

В качестве таких критериев для передаточных чисел трансмиссии транспортных машин берутся расходы топлива (в городском европейском, магистральном и других ездовых циклах, а также при заданных скоростях движения), максимальные преодолеваемые подъемы и скорость на горизонтальной дороге, средняя скорость движения в ездовом цикле, время разгона с места с переключением передач до заданной конечной скорости и на заданном участке пути и др. Однако многие частные критерии противоречат один другому, например, уменьшая расход топлива в городском ездовом цикле, мы в то же время ухудшаем некоторые частные критерии тягово-скоростных свойств машины.

Выход из создавшегося положения предлагается следующий: в качестве критерия оптимальности передаточных чисел трансмиссии с точки зрения топливной экономичности берется обобщенный критерий оптимальности, который представляет собой комбинацию нормированных частных критериев топливной экономичности, с соответствующими весовыми коэффициентами важности, которые определяются одним из экспертных методов, например

методом экспертных оценок. При этом на частные критерии тягово-скоростных свойств машины накладываются ограничения, т.е. задаются их наихудшие, но еще приемлемые для проектируемой машины значения.

Следовательно, если ставится задача улучшения топливной экономичности машины, то обобщенный критерий оптимальности представляет собой комбинацию частных критериев топливной экономичности, а на тягово-скоростные свойства вводятся ограничения. И наоборот, при улучшении тягово-скоростных свойств (например, для спортивного автомобиля) обобщенный критерий оптимальности представляет собой сумму нормированных частных критериев тягово-скоростных свойств. В общем случае в обобщенный критерий входят как частные критерии топливной экономичности, так и тягово-скоростных свойств.

Главная трудность при решении задачи расчета оптимальных передаточных чисел трансмиссии автомобиля состоит в выборе критериальных ограничений. Чтобы они были строго обоснованными, предлагается определять ресурсные возможности автомобиля по каждому частному критерию оптимальности и диапазоны их изменения, т.е. необходимо найти минимально возможные значения времени разгона до заданных скоростей и расходов топлива, максимальные значения преодолеваемых подъемов и т.д. для исследуемого автомобиля при изменении передаточных чисел трансмиссии в пределах, возможных к реализации на практике в конструкции автомобиля, например, по компоновочным требованиям. Эта проблема сводится к отысканию экстремумов функций (частных критериев оптимальности) многих переменных (передаточных чисел трансмиссии).

Для решения задачи оптимизации передаточных чисел трансмиссии в разработанном пакете прикладных программ применяется оптимизационный градиентный метод — метод наискорейшего спуска. В настоящее время в методике оптимизации передаточных чисел трансмиссии используется 25 частных критериев оптимальности. Из множества частных критериев можно в диалоге на ПЭВМ формировать различные обобщенные критерии оптимальности передаточных чисел трансмиссии в зависимости от требований, предъявляемых к топливной экономичности и тягово-скоростным свойствам проектируемой машины.

2. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛА СТУПЕНЕЙ ТРАНСМИССИИ

Разработка методики обоснованного выбора числа ступеней трансмиссии в теории автомобиля до сих пор остается практически нерешенным вопросом. Поэтому конструкторы на практике выбор числа ступеней трансмиссии осуществляют обычно на основе сравнительного анализа расчетного исследования влияния числа ступеней трансмиссии на показатели топливной экономичности и производительности (тягово-скоростных свойств для транспортных машин) для различных типов применяемых на практике рядов передаточных чисел и анализа конструкций машин-прототипов.

Задача определения оптимального числа ступеней трансмиссии автомобиля неразрывна от задачи расчета оптимальных передаточных чисел, т.е. поиск этих оптимальных конструктивных параметров необходимо вести одновременно. Однако решение этой оптимизационной задачи методами математического программирования осложняет наличие целочисленной независимой переменной (число ступеней трансмиссии), влияющей на число независимых переменных. Но дело упрощается, если воспользоваться принципом декомпозиции, позволяющим исходную задачу разложить на совокупность подзадач. В этом случае выполняется перебор целочисленной переменной, в ходе которого для каждого из чисел ступеней трансмиссии находятся оптимальные величины передаточных чисел трансмиссии автомобиля. В итоге для каждой подзадачи получается ряд оптимальных величин передаточных чисел трансмиссии и соответствующая минимальная величина обобщенного критерия оптимальности. Затем из множества минимальных величин обобщенного критерия оптимальности выбирается наименьшее, и соответствующее ему число ступеней и передаточные числа трансмиссии автомобиля принимаются как оптимальные. При этом следует учитывать, что с увеличением числа ступеней трансмиссии возрастает как стоимость коробки передач, так и сложность управления ею.

Таким образом определялись число ступеней и передаточные числа трансмиссии, обеспечивающие ижевскому легковому автомобилю ИЖ-2126 минимум обобщенного критерия оптимальности, представляющего собой сумму четырех нормированных частных критериев: расхода топлива в городском и магистральном ездовых циклах, времени разгона машины до скоростей 60 и 150 км/ч. На скоростные свойства исследуемой машины были наложены ограничения: время разгона до скорости 100 км/ч — не более 17 с, до скорости 150 км/ч — не более 60 с, с места на пути 1000 м — не более 42 с. Частные критерии оптимальности нормировались путем деления на значения критериев автомобиля ИЖ-2126 с реальной (неоптимальной) трансмиссией [3].

Разработанные подходы к исследованию влияния количества ступеней трансмиссии на топливную экономичность и скоростные свойства машины, реализованные на ПЭВМ в виде пакета прикладных программ, позволяют более объективно, чем при других известных методах, определять оптимальные числа ступеней трансмиссии проектируемых машин.

3. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ЗАКОНОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ПЕРЕДАЧ

Другой резерв повышения топливной экономичности и тягово-скоростных свойств автомобилей — это реализация в их конструкциях оптимальных процессов разгона, которые, согласно экспериментальным исследованиям, в городском режиме движения составляют 30–45% общего времени движения автомобиля. Эта проблема непосредственно связана с тенденцией автоматизации трансмиссий различных типов автомобилей с целью улучшения: удобства управления машиной, комфортабельности движения, экономичности, проходимости, тягово-скоростных свойств, надежности и других эксплуатационных свойств.

В общем случае при определении оптимальных законов переключения передач следует рассматривать четыре режима движения: разгон, движение с установившимися или близкими к ним скоростями (малые ускорения), накат и торможение. Наименее изученным и сложным режимом как с точки зрения теоретических и расчетных исследований, так и реализации оптимальных законов автоматического управления в конструкции трансмиссии и системе управления ею является режим разгона.

Проведенный анализ множества частных критериев оптимальности позволил сделать вывод: наиболее полно характеризуют скоростные свойства разгона легкового автомобиля до заданной конечной скорости два критерия — время $T_{\text{разг}}$ и путь $S_{\text{разг}}$, топливную экономичность — абсолютный расход топлива за разгон $Q_{\text{разг}}$. В качестве производных указанных трех показателей эффективности разгона можно порекомендовать для оценки тягово-скоростных свойств среднеэффективную скорость разгона $V_{\text{сред}}$, а для топливной экономичности — удельные показатели: расход топлива на единицу пройденного пути Q_s и на единицу средней скорости разгона Q_v. Практически все другие показатели эффективности разгона, применяемые в настоящее время различными авторами, либо являются комбинацией указанных шести показателей, либо для оценки в полном объеме эффективности разгона неприемлемы.

В общем случае постановка рассматриваемой задачи будет формулироваться следующим образом: определить векторы оптимальных конструктивных параметров трансмиссии $\vec{K}_{\text{тр}}$ и параметров управления энергосиловой установкой машины $\vec{U}$, обеспечивающие оптимальные (наилучшие) значения множества частных критериев оптимальности ($T_{\text{разг}}$, $S_{\text{разг}}$, $Q_{\text{разг}}$, $V_{\text{сред}}$, Q_s, Q_v) при движении автомобиля в режиме разгона.

При оптимизации процесса разгона реального автомобиля, как правило, определяют оптимальные моменты переключения передач и положение органа подачи топлива при заданных других параметрах. Предлагается к независимым переменным критериев оптимальности отнести также параметры трансмиссии (число передач и передаточные числа коробки передач), оптимальные величины которых можно заложить в конструкцию проектируемого автомобиля.

Разработанная методика [4] позволяет определять оптимальные параметры для конкретного угла открытия дроссельной заслонки, поэтому расчеты повторяются для различных углов в интервале от нуля до 100%. По результатам расчетов строятся графические зависимости передаточных чисел и моментов переключения передач от угла открытия дроссельной заслонки.

Для каждого значения угла открытия дроссельной заслонки будет свой оптимальный ряд передаточных чисел, т.е. желательно иметь конструкцию, способную реализовывать оптимальные зависимости значений передаточных чисел от угла открытия дроссельной заслонки, что на современном уровне развития техники достаточно сложно. Проведенный анализ расчетных исследований автомобиля ИЖ-2126 показал, что при условии реализации оптимальных зависимостей передаточных чисел в конструкции рассматриваемые критерии улучшаются незначительно, в среднем всего на 1,8–2,4%. Поэтому в данном случае наиболее рационально реализовывать в конструкции фиксированные передаточные числа трансмиссии с учетом наиболее характерных нагрузочных и скоростных режимов работы автомобиля в процессе эксплуатации, которые можно получить экспериментальными или расчетными исследованиями. Малое влияние передаточных чисел для трансмиссии, у которой реализованы оптимальные законы переключения передач, говорит о том, что такого типа трансмиссия обладает свойствами адаптивности к условиям эксплуатации автомобиля.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ ВНЕШНЕЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПО КРИТЕРИЯМ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ СВОЙСТВ

В последние годы в автомобилестроении наблюдается устойчивая тенденция повышения производительности и улучшения тягово-скоростных свойств вновь проектируемых и модернизируемых автомобилей. Одним из направлений повышения указанных эксплуатационных свойств автомобилей является применение более мощных двигателей.

Для заданных дорожных условий эксплуатации тягово-скоростные свойства автомобиля в основном зависят от значений крутящих моментов, подводимых к ведущим колесам. Очевидно, что реализация на ведущих колесах автомобиля крутящих моментов, соответствующих максимальному коэффициенту сцепления шин с опорной поверхностью, в каждый момент времени процесса движения обеспечит максимальные значения показателям тягово-скоростных свойств.

Проведенные расчетные исследования [5] показали, что на полноприводном автомобиле можно реализовать лучшие тягово-скоростные свойства при движении по всем типам опорной поверхности и для всех значений коэффициента сцепления шин с опорной поверхностью, т.к. существенное увеличение сцепного веса на ведущих колесах позволяет использовать более мощные двигатели. Для переднеприводного автомобиля можно добиться лучших показателей тягово-скоростных свойств на асфальтобетонном дорожном покрытии в сравнении с заднеприводным автомобилем при значениях коэффициента сцепления шин с опорной поверхностью $\varphi_и$ < 0,4. Заднеприводной автомобиль в сравнении с переднеприводным обладает лучшими тягово-скоростными свойствами на следующих типах дорожного покрытия: асфальтобетонном покрытии в отличном состоянии, щебеночном покрытии в хорошем состоянии и грунтовой дороге сухой укатанной. Переднеприводной автомобиль имеет более высокие тягово-скоростные свойства на снежной, укатанной и на обледенелой дорогах.

Задача оптимизации внешней скоростной характеристики по критериям производительности и тягово-скоростных свойств автомобиля решается достаточно просто

и однозначно [5]. Но при этом мы должны помнить, что улучшение показателей тягово-скоростных свойств ведет, как правило, к ухудшению топливной экономичности.

5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА МОЩНОСТНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК АВТОМОБИЛЕЙ

В настоящее время четко обозначились два направления развития автомобилей с электромеханическими приводами: первое — создание чистого электромобиля, второе — разработка электромеханических приводов с комбинированными энергосиловыми установками (КЭСУ), состоящими из теплового и электродвигателя.

Решить сложную проблему обоснованного выбора базовых параметров КЭСУ, состоящей из двигателя внутреннего сгорания (ДВС), электродвигателя (ЭД), накопителя электрической энергии и трансмиссии, возможно только за счет применения на ПЭВМ методов математического моделирования движения проектируемого автомобиля с КЭСУ в различных условиях его эксплуатации. Анализ многолетней работы по данной тематике позволил формализовать процесс разработки автомобилей с КЭСУ и записать его в виде методики, представляющей собой последовательность необходимых работ, инвариантных по отношению к типу проектируемого автомобиля, для получения наиболее рациональной (оптимальной) конструкции [6].

Последовательность действий этой методики для КЭСУ с параллельной компоновкой ДВС и ЭД, которые соединены между собой редуктором и работают на один выходной вал, следующая:

— разработать математическую модель движения автомобиля, оборудованного КЭСУ;

— обоснованно выбрать множество частных критериев оптимальности параметров и характеристик КЭСУ, состоящей из соединенных редуктором ДВС и ЭД и трансмиссии;

— провести анализ априорной информации для обоснования критериальных ограничений и ограничений на оптимизируемые параметры и характеристики;

— разработать программные средства расчета показателей тягово-скоростных свойств и экономичности (частных критериев) автомобиля;

— реализовать на ПЭВМ многокритериальный метод поиска оптимального решения по множеству частных критериев оптимальности;

— рассчитать внешнюю скоростную характеристику ДВС по требованиям к показателям тягово-скоростных свойств при работе КЭСУ на высоких частотах вращения ее выходного вала;

— рассчитать внешнюю скоростную характеристику ЭД по расчетной внешней характеристике ДВС и по требованиям к показателям тягово-скоростных свойств при работе КЭСУ на малых и средних частотах вращения ее выходного вала;

— провести предварительные расчетные исследования по обоснованию логики управления КЭСУ для реализации ее в электронном блоке;

— выполнить предварительный расчет передаточных чисел трансмиссии по множеству частных критериев оптимальности;

— провести разработку и изготовление ДВС и ЭД с учетом расчетных внешних характеристик;

— выполнить экспериментальные исследования ДВС с целью построения многопараметрового семейства его нагрузочных характеристик;

— на основе анализа реальной внешней скоростной характеристики разработанного ЭД и требований к показателям тягово-скоростных свойств и экономичности автомобиля разработать систему управления ЭД;

— в соответствии с логикой управления ЭД построить семейство его нагрузочных характеристик;

— провести окончательный расчет оптимальных параметров трансмиссии для разработанной КЭСУ и логики управления ею по множеству частных критериев оптимальности.

Основой разработанных методик, рассмотренных в настоящей работе, являются математические модели исследуемых автомобилей [7, 8 и др.], представляющие собой набор алгоритмов, реализованных на ПЭВМ и позволяющих вычислять значения частных критериев оптимальности. Корректность математических моделей проверена путем сопоставления результатов расчетов с результатами дорожных испытаний различных типов транспортных машин.

Теоретические положения разработанных методик оптимизации параметров и характеристик энергосиловых установок автомобилей, как было отмечено выше, положены в основу разработанных программных средств для ПЭВМ, которые внедрены и используются в практике проектирования новых и модернизации выпускаемых в настоящее время транспортных машин на ряде предприятий России: ОАО «ИжАвто», ОАО «Ижевские мотоциклы», ОАО «Ульяновский автомобильный завод», ОАО «Тульский машиностроительный завод» и ОАО «Ковровский машиностроительный завод им. В.А. Дегтярева».

В частности, разработанные методики использовались при создании следующих машин, выпускаемых в настоящее время: семейство автомобилей марки «ИЖ» (легковые — с кузовами хэтчбэк и универсал, грузовые модификации типа фургон и пикап, грузопассажирский, легковой полноприводный); семейство мотоциклов марки «ИЖ» (мотоциклы ИЖ 7.109, ИЖ 7.110, ИЖ 7.111, грузовой трехколесный мотоцикл, мотоцикл «Чоппер ИЖ»). Был также создан ряд опытных образцов энергосиловых установок, которые прошли лабораторные и дорожные испытания в составе автомобилей и мотоциклов: автоматические гидромеханические трансмиссии для легковых автомобилей и мотоциклов; фрикционная многодисковая и клиноременная бесступенчатые вариаторные трансмиссии мотоцикла; инерционно-импульсные трансмиссии для мотоциклов и легковых автомобилей (разработаны конструкции и экспериментальные образцы, прошедшие лабораторные исследования); комбинированные энергосиловые установки [9, 10 и др.].

Литература

1. Кондрашкин А.С., Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Методика расчета передаточных чисел трансмиссии легкового автомобиля // Автомобильная промышленность. — 1986. — № 2. — С. 16–17.

2. Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Оптимизация передаточных чисел ступенчатых механических трансмиссий машин // Теория и практика зубчатых передач: Труды международной конференции ТРG'98. — Ижевск: ИжГТУ, 1998. — С. 349–354.

3. Кондрашкин А.С., Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Оптимизация числа ступеней трансмиссии легкового автомобиля // Автомобильная промышленность. — 1987. — № 12. — С. 16–17.

4. Кондрашкин А.С., Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Оптимизация законов переключения передач // Автомобильная промышленность. — 1988. — № 10. — С. 19 — 20.

5. Филькин Н.М. Оптимизация параметров ДВС: внешней скоростной характеристики по тягово-скоростным свойствам АТС // Автомобильная промышленность. — 1995. — № 10. — С. 6–9.

6. Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Разработка методики расчета мощностных и конструктивных параметров энергосиловой установки электромобиля гибридного типа на примере легкового автомобиля // Вестник Уральского межрегионального отделения Академии транспорта. — Курган: КГУ, 1999. — С. 49–53.

7. Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Динамика комбинированных энергосиловых установок машин // Вестник Уральского межрегионального отделения Академии транспорта. — Курган: КГУ, 1998. — С. 4–10.

8. Умняшкин В.А., Якимович Б.А., Филькин Н.М. Моделирование движения транспортных машин при наличии в их трансмиссиях передач с динамической связью // Proceedings of 5 International Conference IFToMM «Dinamics of machine aggregates». — Slovak Republic: Gabcikovo, 2000. — С. 249–254.

9. Умняшкин В.А., Сальников В.Ю., Филькин Н.М. Легковой автомобиль с гибридной энергосиловой установкой // Техника и технологии строительства и эксплуатации автомобильных дорог: Сборник научных трудов. — М.: МАДИ (ТУ); УФ МАДИ (ТУ), 2000. — С. 135–140.

10. Умняшкин В.А., Филькин Н.М. Разработка автоматической инерционно-импульсной коробки передач для легкового автомобиля // Прогрессивные технологии, машины и механизмы в машиностроении: Сборник докладов Международной научно-технической конференции БАЛТТЕХМАШ-2000. — Том II. — Калининград: КГТУ, 2000. — С. 5–6.

УЧЕБНИК



А. В. ЕФИМОВ, А. Г. ГАЛКИН
НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Рассмотрены основы теории надежности, модели отказов, расчеты структурной и функциональной надежности систем, вопросы резервирования, эксплуатационная надежность и виды отказов устройств электроснабжения железных дорог. Описаны процессы деградации, износа и разрегулировок и их математические модели. Приведены стратегии технического обслуживания.

Изложены основные положения диагностики, модели объектов и алгоритмы диагностирования. Описаны современные средства диагностирования, применяемые в системах элекроснабжения железных дорог.

В книге приведены примеры расчетов и программы для их решения на ЭВМ.

Петров В.Ю., Коротаев В.Н., Якимов М.Р.

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ КРУПНЫХ ГОРОДОВ



Петров Василий Юрьевич,
д.т.н., профессор, ректор ПГТУ



Коротаев Владимир Николаевич,
д.т.н., профессор кафедры «Охрана окружающей среды» ПГТУ



Якимов Михаил Ростиславович,
ст. преподаватель кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» ПГТУ

Автомобильный парк ежегодно потребляет 200–220 млн. т кислорода, что составляет около 8% его воспроизводства над территорией страны.

В атмосферу автомобильными двигателями ежегодно выбрасывается 20–27 млн. т. монооксида углерода, 2,0–2,5 млн. т углеводородов, 6–9 млн. т оксида азота, до 190 т. соединений серы, до 100 тыс. т сажи, 13 тыс. т соединений тяжелых металлов, 200–230 млн. т двуоксида углеводорода, а также до 3,11012 МДж теплоты. Общий объем выбросов нормируемых вредных веществ парком транспортных средств в пересчете на оксид углерода (CO) составляет порядка 300–400 млн. условных тонн в год [1].

На основании приведенных данных можно заключить, что количественная оценка изменений в окружающей среде, связанных с воздействием автомобильных двигателей, сложна и затрагивает целый комплекс взаимосвязанных проблем.

Пермь является одним из крупнейших городов России, и, конечно же, она испытывает все трудности, связанные с бурным развитием автомобильного транспорта. В масштабах области в 2002 году выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) автомобильным транспортом составили 142,2 тысяч тонн, или 18% от общего вала выброса, что на 9 тысяч тонн больше, чем в 2001 году [2].

В городе Перми ситуация с загрязняющими выбросами автотранспорта обстоит более серьезно, чем в области, т.к. здесь автотранспорт является основным загрязнителем атмосферы. В Перми в 2002 году выбросы ЗВ автотранспортом составили 62 тысячи тонн, или 58% от общего вала выбросов, что на 8 тысяч тонн больше, чем в 2001 году [3].

Действующая в нашей стране система статистической отчетности о параметрах выбросов ЗВ не охватывает в настоящее время ни индивидуальный автотранспорт, ни многие другие передвижные источники выбросов. Основной причиной такого положения является недостаточное научно-методическое обеспечение выполнения работ по экологическому мониторингу, в том числе отсутствие необходимых методик расчета выбросов от ряда транспортных средств и транспортных потоков, а также «привязки» этих источников к местности. Работы по определению экологической нагрузки на окружающую среду от автотранспорта в настоящее время носят нерегулярный характер. Результаты этих работ не только не дают какой-либо целостной картины ситуации с загрязнением атмосферы выбросами автотранспорта, но и порой дают ошибочные представления о влиянии и вкладе автомобильного транспорта в общее загрязнение атмосферного воздуха. В этих условиях возникает необходимость в проведении комплекса мероприятий по контролю, анализу и прогнозированию влияния автомобильного транспорта на экологию городов. Поэтому основная задача — это разработка методики и создание системы расчетного мониторинга и прогнозирования загрязнения атмосферы крупных городов отработавшими газами автотранспорта на основе геоинформационных технологий. Создание подобной системы, включающей в себя этапы сбора, обработки, анализа и визуализации информации, актуально с точки зрения возможности выработки широкого круга грамотных и обоснованных решений в области дорожного строительства и организации дорожного движения, направленных на оптимизацию улично-дорожной сети (УДС) и минимизацию загрязнения атмосферы. Основными задачами

такой системы применительно к решению проблем экологии транспорта должны являться, во-первых, создание механизма сбора, хранения, отображения и анализа информации о загрязнении атмосферы крупных городов выбросами автомобильного транспорта, а во-вторых, разработка уточненных методик определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы на основе информации о напряженности и скоростных параметрах транспортных потоков. Известные на настоящий момент методики сбора, получения и анализа информации о состоянии загрязнения атмосферы городов выбросами автотранспорта несовершенны, высокозатратны и не отражают современных реалий развития автотранспортного комплекса и уровня автомобилизации крупных городов. Кроме того, отсутствие системного подхода на этапе накопления и систематизации различной информации не позволяет прогнозировать развитие ситуации с загрязнением атмосферы, что обуславливает крайне низкую эффективность проводимых работ. Для решения подобного класса задач, затрагивающих интересы смежных областей науки и техники, создаются информационные системы, включающие в себя элементы, отвечающие за поведение каждого компонента системы.

ЭТАПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ

В общем случае разработка подобных систем разбивается на три основных этапа, каждый из которых, в свою очередь, является самостоятельной инженерной задачей, имеющей прикладное значение как в рамках разрабатываемой системы, так и в качестве отдельных приложений.

1. Разработка механизма сбора и систематизации исходной информации о параметрах транспортных потоков и об основных характеристиках УДС.

2. Разработка новых методик обработки информации (расчетная часть).

3. Разработка инструмента для визуализации и анализа полученной информации на основе геоинформационных систем (ГИС).

При помощи этой системы будет возможно с высокой точностью определить величину и характер загрязнения атмосферы в любой конкретной точке города и прогнозировать изменение величины загрязнения при любом качественном и количественном изменении транспортного потока на УДС города (рисунок 1).

Подробнее рассмотрим первую составляющую системы.

СБОР ИНФОРМАЦИИ

Этот этап основной и на 90 процентов определяющий качество и функциональность всей системы в целом. Цель этого этапа — создание системы мониторинга состояния и условий движения на УДС города. Получаемая до настоящего времени информация о характере функционирования УДС была недостаточной, разрозненной и не систематизировалась. Организации, нуждающиеся в подобной информации, не получают ее вовремя и не имеют автоматизированных рабочих мест для обработки этой информации, номенклатура показателей ограничена, что не позволяет принимать эффективные управленческие решения ни в области дорожного строительства и организации дорожного движения, ни в области контроля и управления экологическими рисками.

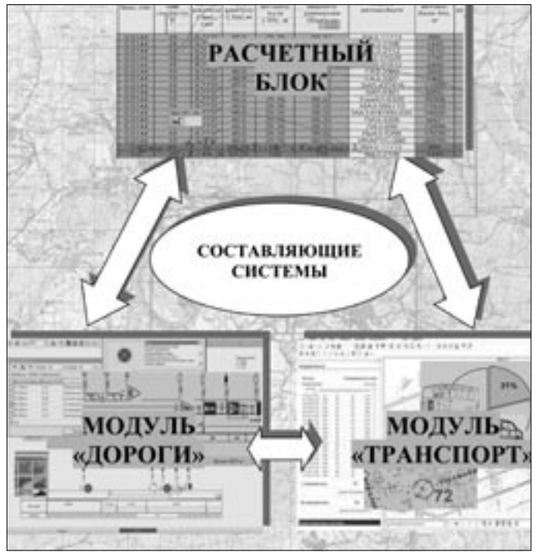


Рисунок 1 — Структурная схема геоинформационной системы по прогнозированию влияния автотранспорта на загрязнение атмосферы крупных городов

Цель создания системы мониторинга транспортных потоков на УДС города — получение данных для решения следующих задач:

— разработки и внедрения макроскопических методов организации дорожного движения (организация грузового движения, одностороннее движение, зональные методы организации движения, информационное обеспечение участников движения и др.);

— разработки и уточнения поэтапных планов реконструкции и строительства новых элементов УДС;

— разработки и внедрения управленческих решений в сфере дорожного движения (регламентация объемов ввода объектов нового строительства, совершенствование структуры размещения мест притяжения грузовых и пассажирских перевозок, введение ограничений на транзитный транспорт, совершенствование парковочной политики, оценка потребности в автостоянках и др.);

— получения достоверных данных для расчета и прогнозирования ситуации с загрязнением территории городов выбросами автомобильного транспорта, а также прогнозирования развития общей ситуации с дорожно-транспортной обстановкой в городе;

— создания основы и исходных данных для разработки системы моделирования условий движения на УДС города.

Условно можно выделить следующие этапы работ:

— наблюдение и измерение фактических параметров транспортных потоков, сбор статистической инфор-

мации о характеристиках УДС, ее геометрических параметрах и наличии технических средств регулирования;

— обработка результатов наблюдений с целью выявления и математического описания функциональными зависимостями закономерностей в характере движения транспортных потоков;

— визуализация, оценка и анализ полученных результатов с использованием ГИС.

При выборе параметров, по которым ведется мониторинг, следует учитывать несколько основных моментов.

1. Состав и количество параметров должны максимально полно и однозначно определять характер и степень воздействия автотранспортных потоков на окружающую среду. Это требование определяет как саму возможность проведения дальнейших расчетов суммарных выбросов ЗВ и шумового загрязнения окружающей среды транспортным потоком, так и достоверность получаемых результатов. В предлагаемой нами методике сбора показателей предусмотрен сбор дополнительных параметров, на наш взгляд существенно влияющих на величины суммарных выбросов ЗВ:

— производится замер углов продольного профиля дороги для каждого из обследуемых перегонов;

— ведется наблюдение за средневзвешенной загрузкой транспортных средств отдельно по каждому из видов транспорта в течение дня.

2. Технология сбора выбранных показателей должна обеспечивать максимальную достоверность собираемой информации. Выполнение этого требования в большей степени определяет итоговую ошибку получаемых расчетных величин загрязнений. В ходе замеров показателей интенсивности транспортных потоков мы можем, например, задаться целью измерения мгновенной скорости транспортного потока или научиться замерять некоторые параметры ездовых циклов отдельных групп автомобилей, а также автоматически на этапе подсчета количества транспорта более детально делить весь транспортный поток на отдельные группы. Все эти шаги, без сомнения, будут способствовать более полному и детальному изучению характера движения и, как следствие, должны привести к более качественным и достоверным результатам при определении уровня загрязнений. Однако проведенный нами ряд экспериментов по учету и замерам дополнительных параметров транспортных потоков заставил отказаться от учета многих, без сомнения, полезных параметров, характеризующих движение транспортного потока. Анализ собранной в процессе проведения пробных замеров информации о некоторых дополнительных параметрах транспортных потоков обнаружил крайне низкую стабильность результатов наблюдений, низкий коэффициент автокорреляции между сходными по смыслу параметрами, а также существенную величину случайной ошибки. Подобные объективные трудности при сборе информации по ряду параметров заставили нас отказаться, например, от замеров количества автомобилей, находящихся в очереди перед регулируемым перекрестком, и от автоматического деления транспортного потока на более мелкие группы, как требует того ряд известных методик.

3. Состав и количество параметров, механизм, технологии и методики сбора необходимой исходной информации, как и дальнейшее получение расчетной информации, должны отвечать принципу минимизации затрат на их проведение. Работы по проведению натурных обследований структуры и интенсивности транспортных потоков чрезвычайно дорогостоящие и требуют привлечения большого количества людей. Поэтому увеличение количества измеряемых показателей, как и ужесточение методик по сбору информации, автоматически приводит или к увеличению числа учетчиков, принимающих участие в исследованиях, или к увеличению времени проведения исследований. В предлагаемой нами методике предусмотрены различные варианты, позволяющие максимально сократить прямые затраты на сбор информации о параметрах транспортных потоков.

В любом случае, все работы по сбору информации о параметрах транспортных потоков необходимо проводить регулярно, с учетом динамически меняющейся ситуации на УДС города.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДА ПЕРМИ ВЫБРОСАМИ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА (ВАД)

Для оценки эффективности функционирования УДС г. Перми и влияния автомобильного транспорта на общее загрязнение атмосферы города были использованы критерии, охватывающие параметры транспортных потоков: интенсивность, плотность, характеристики скоростного режима, время задержек транспортных средств на перегонах. Необходимые данные были получены в ходе комплексного обследования параметров транспортных потоков г. Перми, проведенного в 2002 году в соответствии с постановлением главы г. Перми № 2436. Также были использованы данные обследования скоростных параметров и недельных колебаний интенсивности транспортных потоков, проводившегося специалистами ПГТУ в июле 2001 и 2002 годов. Анализ полученных данных был проведен с использованием модуля «Транспортные потоки» геоинформационной системы «Вега».

На этапе расчета величин выбросов ЗВ была использована разработанная методика расчета выбросов ЗВ автотранспортными потоками, движущимися по УДС города Перми. Данная методика — основа для создания системы расчетного мониторинга, моделирования и прогнозирования загрязнения городской атмосферы выбросами автомобильного транспорта. При работе с этой методикой исходные данные для расчета выбросов следующие:

1. Геометрические параметры УДС города Перми, представленные электронной картой УДС с пронумерованными перекрестками и известными длинами каждого перегона.

2. Данные обследования структуры и интенсивности транспортных потоков 2001, 2002 годов в городе Перми. Эти данные содержат:

- количество легковых автомобилей, проезжающих по перегону за тридцатиминутный промежуток времени;
- количество грузовых автомобилей, проезжающих по перегону за получасовой интервал времени;
- количество автобусов, проезжающих по перегону за тридцатиминутный промежуток времени;



Рисунок 2 — Пример расчета состояния загрязнения атмосферного воздуха в центральной части города Перми



Рисунок 3 — Среднедневные концентрации бенз(а)пирена в атмосферном воздухе в районе главного корпуса ПГТУ

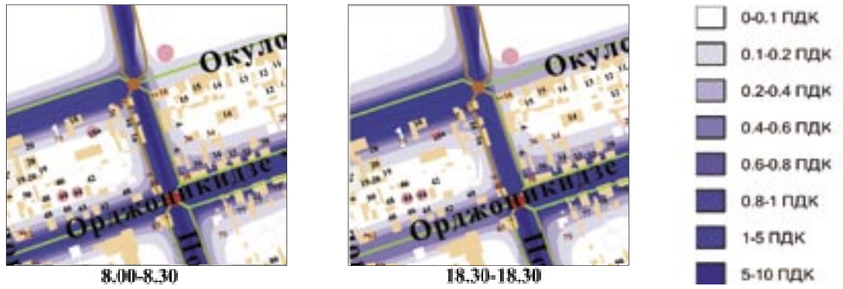


Рисунок 4 — Концентрации углеводородов (CH) в атмосферном воздухе на участке ул. Попова в различное время суток

• среднюю скорость транспортного потока на УДС города Перми;

• среднее время задержки автомобилей транспортного потока при остановке перед светофором.

3. Значения коэффициента приведения марочного состава транспортного потока.

4. Значения коэффициентов, определяющих расходы топлива базовыми автомобилями при движении транспортного потока в режиме разгона, равномерного движения, торможения и принудительного холостого хода.

5. Значения коэффициентов, учитывающих влияние на расход топлива загрузки автомобилей и продольного профиля дороги;

6. Значения концентраций токсичных веществ в отработавших газах бензиновых и дизельных двигателей.

7. Значения плотностей отработавших газов автомобильных двигателей для различных режимов работы.

8. Масса и объем отработавших газов, полученные из одного килограмма топлива при различных условиях работы двигателей.

В результате расчетов по разработанной методике получаем параметры удельных выбросов ЗВ (г/с) на каждом из перегонов УДС (окиси углерода, оксидов азота, углеводородов, альдегидов, сажи, соединений серы).

Полученные при расчетах данные позволяют оценить и проанализировать интенсивность загрязнения атмосферы автотранспортными потоками на УДС крупных городов.

Таким образом, удалось создать систему, включающую в себя этапы сбора, обработки, анализа и визуализации информации как в отдельности для каждого компонента системы ВАД, так и для комплексной оценки их взаимодействия, определяющего величину воздействия автотранспорта на атмосферу. Данная система мониторинга может являться действенным инструментом, который позволит более эффективно решать вопросы по улучшению экологической и транспортной ситуации в городе Перми.

Картограммы рассеивания ЗВ от выбросов автомобильного транспорта в городе Перми — заключительный этап работы, наглядно иллюстрирующий возможности системы. Вместе с тем система создания картограмм рассеивания — это основное звено системы расчетного мониторинга загрязнения городской атмосферы выбросами автомобильного транспорта. При помощи картограммы можно наглядно проследить за процессами загрязнения атмосферы и узнать концентрацию ЗВ отработавших газов автотранспортных потоков в любой точке района города, в котором проводилось обследование структуры и интенсивности автотранспортных потоков.

Работу по построению картограмм можно условно разбить на несколько взаимосвязанных этапов.

1. Сбор информации о структуре и интенсивности транспортных потоков на обследуемых участках УДС города.

2. Определение параметров атмосферы в районе обследования транспортных потоков.

3. Создание электронной базы данных по замеренным параметрам транспортных потоков.

4. Определение расходов топлива транспортными потоками, движущимися по УДС города Перми (производится на основе созданной базы данных при помощи разработанной методики расчета расходов топлива).

5. Расчет удельных выбросов (г/с) ЗВ отработавших газов автотранспортных потоков на основе полученных расходов топлива транспортным потоком.

6. Доработка электронной графической базы карты города Перми, которая заключается в нанесении на карту координатной сетки.

7. В узлах данной координатной сетки и в образованных ею квадратах производится расчет концентраций для любого конкретного ЗВ отработавших газов. Расчет концентраций ЗВ производится на основе значений удельных выбросов ЗВ, определенных на предыдущих этапах, с применением формулы, определяющей рассеивание ЗВ в атмосфере города. Данная формула учитывает параметры атмосферы в данном конкретном районе, замеренные на предыдущих этапах построения карты.

8. На основе вычисленных значений концентраций ЗВ в доработанной графической базе в цвете рисуются поля концентраций ЗВ по соответствию с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) данного конкретного вещества. Три выбранных цвета характеризуют концентрацию загрязняющего вещества; соответственно первый цвет — концентрация ЗВ меньше ПДК, второй цвет — концентрация близка к ПДК, третий цвет — концентрация ЗВ превышает ПДК. Интенсивность первого и третьего цветов определяется соотношением концентрации ЗВ в данном районе и ПДК на это загрязняющее вещество.

Таким образом, построение картограмм включает в себя восемь этапов. При построении данной картограммы было учтено максимально возможное количество факторов, определяющих концентрацию ЗВ и рассеивание их в атмосфере города.

На рисунке 2 показан фрагмент центральной части города Перми в виде картограммы распределения концентраций оксида углерода (CO) в долях ПДК. На рисунке 3 — фрагмент картограммы распределения среднедневных концентраций бенз(а)пирена в атмосферном воздухе в районе главного корпуса ПГТУ. На рисунке 4 показаны концентрации углеводородов (CH) в атмосферном воздухе на участке ул. Попова в различное время суток.

Литература

1. Амбарцумян В.В., Носов В.Б. Экологическая безопасность автомобильного транспорта /Под ред. В.Н. Луканина — М: Транспорт, 1999.

2. Состояние и охрана окружающей среды Пермской области в 2002 году / Управление по охране окружающей среды Пермской области. — Пермь, 2003. — 137 с.

3. Состояние окружающей среды и здоровья населения г. Перми в 2002 году / Муниципальное управление по экологии и природопользованию. — Пермь, 2003. — 74 с.

Павлюков А.Э.

ВИРТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ



Павлюков Александр Эдуардович,
д.т.н., профессор кафедры «Вагоны» УрГУПС

Рассмотрена комплексная имитационная модель прогнозирования ресурса деталей тележек грузовых вагонов повышенной грузоподъемности, предложена компьютерная реализация.

В настоящее время рядом организаций разрабатывается конструкция тележки грузового вагона с повышенной осевой нагрузкой 25 тс/ось. Современные экономические требования обуславливают необходимость не только разработки новой конструкции тележки, существенно отличающейся от типовой конструкции тележки нынешних грузовых вагонов, но еще и в сжатые сроки. В таких условиях, требующих анализа значительного количества предложений и вариантов без изготовления опытных образцов, большое значение приобретают разработка и внедрение методов прогнозирования нагруженности на стадии проектирования с использованием математического моделирования. При этом максимальная эффективность от математического моделирования, на взгляд автора, может быть достигнута при использовании для разработки моделей аналитических программных сред (АПС).

Под АПС автором понимаются компьютерные открытые специализированные программные системы, предназначенные для моделирования определенного круга задач на основе слияния в общую модель встроенных, характерных для данной системы математических процедур и уникальной математической модели исследователя, отражающей индивидуальные свойства объекта моделирования и созданной по правилам и на языке среды.

Преимущество АПС в том, что в них реализованы хорошо отлаженные, ставшие математическим стандартом алгоритмы. Большие возможности АПС в части ввода-вывода данных, обработки результатов и визуализации освобождают исследователя от необходимости программирования этих процедур, но позволяют сосредоточиться на создании в среде модели индивидуальных особенностей системы, например уникальных видов связей, и сосредоточиться не на создании аппарата, а на верификации модели, достижении высокой точности, достоверности модели и собственно на многовариантных вычислительных экспериментах.

Согласно ГОСТ 27609-88 [1], под нагруженностью принято понимать состояние конструкции, обусловленное внешними воздействиями и условиями функционирования. Для транспортных конструкций, связанных с движением, считается, что усталостные повреждения элементов конструкции являются основным предельным состоянием. В связи с этим оценка нагруженности конструкций вагонов должна выполняться по критерию усталостной долговечности.

Анализ работ в области нагруженности вагонов показывает, что в зависимости от поставленной задачи исследуются различные показатели нагруженности вагонов, которые условно можно разделить на две группы:

— динамические характеристики движения конструкции (нагрузки, ускорения, перемещения, коэффициенты динамичности и т.д.);

— характеристики, определяющие надежность конструкции (динамическое напряженно-деформированное состояние, спектральные плотности напряжений и др.).

Для решения задач первой группы система представляется в виде недеформируемых тел. Исследование выполняется на основе анализа систем ДУ колебаний, полученных для пространственных или плоских расчетных схем.

Для решения задач второй группы экипаж или узел представляются в виде распределенной системы. При этом используются методы строительной механики: методы перемещений и сил, метод конечных элементов.

Для относительно простых объектов, которые могут быть адекватно описаны системой дифференциальных уравнений невысокого порядка, задачи первой и второй групп могут решаться моделированием для системы в целом.

Однако для сложной системы, какой является в целом рельсовый экипаж, реально возможный путь прогнозирования нагруженности — имитационный подход, то есть поблочное описание системы с объединением через численные данные, отображающие входные и выходные эффекты отдельных блоков. На основании этого предлагается следующая схема блочной имитационной модели прогнозирования нагруженности ходовых частей вагонов по критерию сопротивления усталости (рисунок 1).

Первый блок состоит в задании внешних случайных возмущений. Второй блок представляет моделирование движения вагона, представленного в виде системы твердых тел, во временной области. На выходе данного блока имитируются спектральные плотности ускорений. Третий

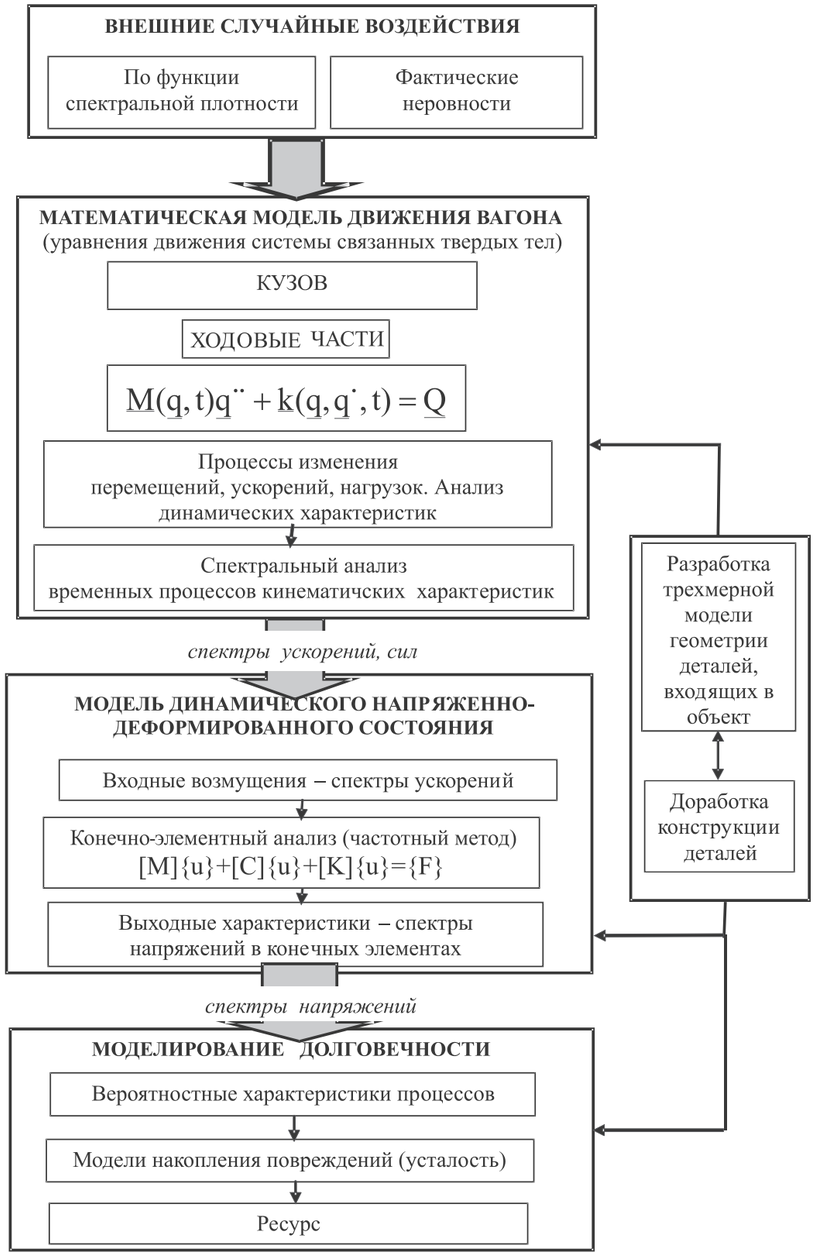


Рисунок 1 — Схема блочной имитационной модели прогнозирования нагруженности тележек грузовых вагонов при проектировании

блок — моделирование динамического напряженно-деформированного состояния от входных возмущений в виде спектральных функций. На выходе третьего блока — спектральные плотности напряжений системы. Четвертый блок — оценка ресурса по спектральным плотностям напряжений. Для перехода от решения задач второго блока к третьему используется принцип частотной дискриминации, т.е. игнорирования на первом этапе упругих колебаний конструкции.

Отдельные фрагменты блочной модели, связанные с трансляцией данных, разрабатываются в виде специализированных модулей без использования АПС, а также в универсальных программных комплексах математического анализа (MahtCad, MahtLab, KeyPlot).

Рассмотрим реализацию блочной модели применительно к грузовым вагонам повышенной грузоподъемности.

Первый блок. Геометрия пути в горизонтальной и вертикальной плоскостях может быть сгенерирована по заданной функции спектральной плотности, например, из РД32.86-96 [2] или по результатам измерения отклонений реального пути в вертикальной (просадки) или горизонтальной плоскости (рихтовки, шаблон).

Второй блок. Опыт создания в США, Канаде, России тележек грузовых вагонов с повышенной осевой нагрузкой показывает, что при нагрузках 245 кН и выше в конструкции используется трехэлементная рама из литых несущих деталей, демпферы сухого трения и одноступенчатое или двухступенчатое подвешивание. Базируясь на этой тенденции, для тележек данного типа разработана обобщенная структурная схема модели движения грузового вагона (рисунок 2).

В расчетной схеме с каждым телом условно связывается собственная система координат (рисунок 3). Имеются также две общие системы координат: базовая неподвижная и базовая подвижная (путевая). Подвижная система координат движется вдоль оси пути относительно базовой неподвижной. Движение каждого тела записывается относительно подвижной системы координат вектором перемещения центра масс и матрицей направляющих косинусов (матрицей поворота). Для описания движения всего тела каждая точка тела определяется координатами в собственной и путевой системе координат тела и задается радиус-вектором. Таким образом, определяется движение в пространстве не только центра масс, но и всего тела. Расчетная схема движения вагона базируется на 19 телах (рисунок 4). Тела вагона представлены в модели с высокой степенью соответствия реальным деталям. Система обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описы-

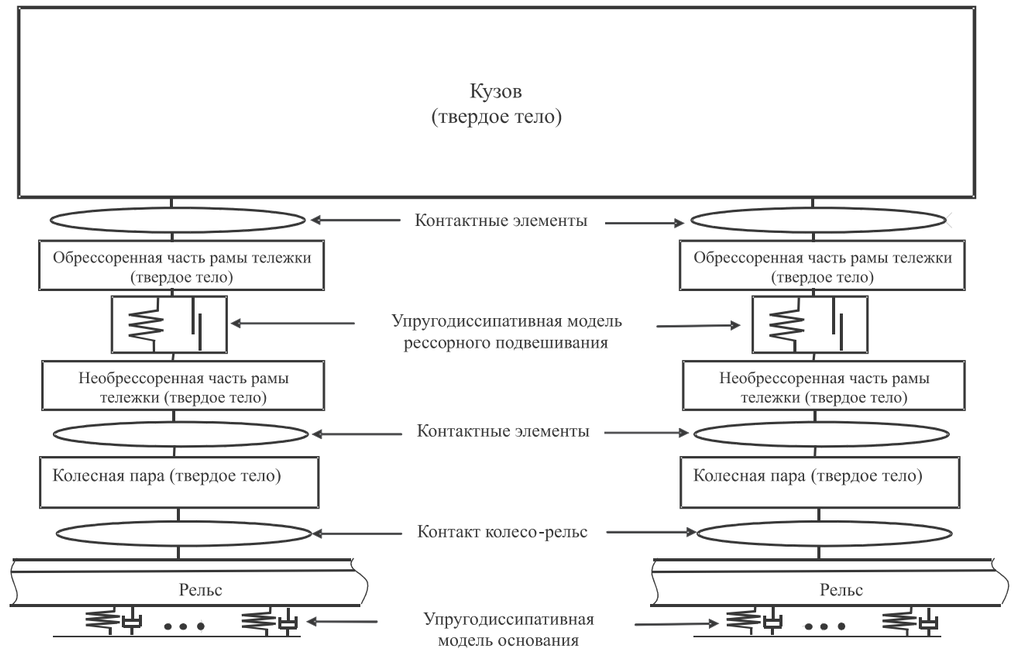


Рисунок 2 — Структурная схема модели движения грузового вагона

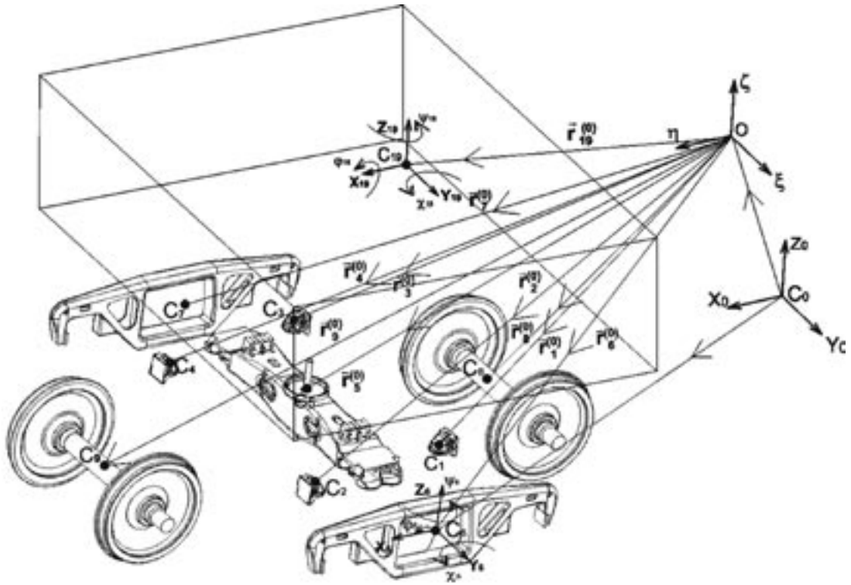


Рисунок 3 — Схема задания координат на $^1/_2$ расчетной схемы

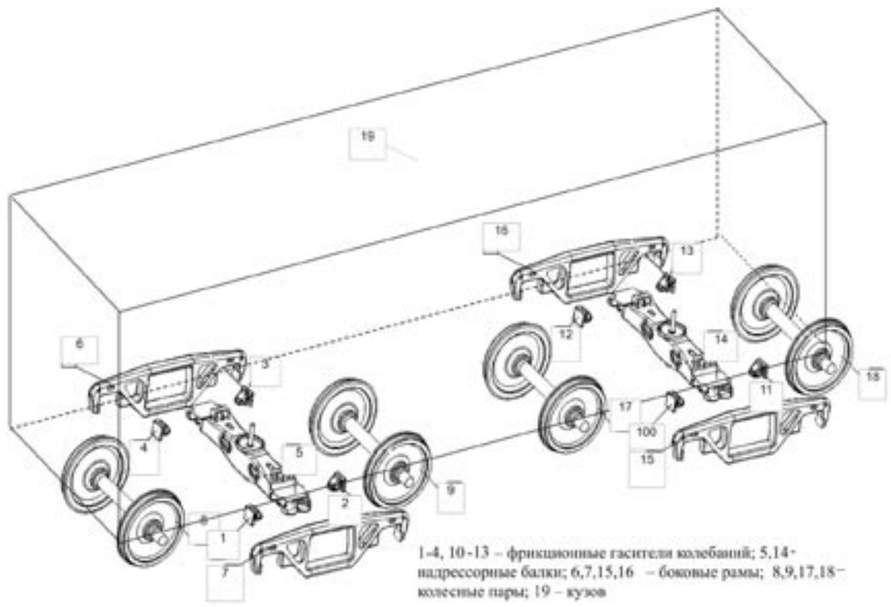


Рисунок 4 — Нумерация тел в модели грузового вагона

вающих движение системы в обобщенных координатах q, с нелинейными правыми частями (в матричном виде) представляется в виде

$$\sum_{i=1}^{19} \underline{\underline{M}}_i(\underline{q},t)\ddot{\underline{q}} + \sum_{i=1}^{19} \underline{k}_i(\underline{q},\dot{\underline{q}},t) = \sum_{i=1}^{19} \underline{Q}_i \,, \qquad (1)$$

где $\underline{\underline{M}}$ — матрица масс; $\underline{k}$ — матрица-столбец сил инерции; $\underline{Q}$ — матрица-столбец обобщенных сил.

Для вывода обобщенных сил (правой части системы уравнений) разрабатывается математическая модель силовых связей в системе вагон — путь, затем производится синтез общих уравнений движения. Для синтеза уравнений движения была использована программная среда «Универсальный механизм» (профессор Погорелов Д.Ю., БГТУ).

Для моделирования взаимодействий контактного типа разработана и реализована в виде программной процедуры математическая модель контакта типа точка — плоскость [3]. На основе модели контакта точка — плоскость разработаны математические модели работы узлов: фрикционный гаситель, пятник — подпятник; связь боковой рамы с буксой; взаимодействие скользунов кузова и тележки.

На основе разработанных связей получены математические модели функционирования возможных конструкций узлов тележки: скользунов различного типа (жестких, роликовых, упругих, упругороликовых); центрального подвешивания с линейной и билинейной характеристикой при различных схемах подвешивания.

Моделирование путевой структуры производилось заданием упругодиссипативного основания с параметрами в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для взаимодействия колеса и рельса в точке контакта использовалась модель вычисления сил крипа по Калкеру, реализованная в «Универсальном механизме».

Численное моделирование производится на различных скоростях движения вагона в различных участках пути (кривая, прямая). По результатам моделирования для каждой скорости строятся графики кинематических и силовых показателей движения вагона от времени. Построение функций спектральной плотности производится по временным зависимостям, например, в программном комплексе Keyplot.

Третий блок. Расчет динамического напряженно-деформированного состояния. Входными воздействиями для расчета напряженно-деформированного состояния элементов системы (вагон) могут служить силовые и кинематические воздействия, заданные либо в виде спектральных плотностей сил для первого случая, либо в виде спектров перемещений и ускорений для второго случая. Исходя из особенностей работы несущей рамы тележки, целесообразно для задания входных возмущений использовать не силовые, а кинематические факторы — ускорения, полученные при решении задачи второго блока. В соответствии с этим уравнения динамического деформирования конструкции от кинематических факторов, дискретизированной с использованием метода конечных элементов, могут быть записаны в разделенной форме [4]:

$$\begin{bmatrix} M & M_C \\ M_C^{\mathrm{T}} & M_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{u}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & C_C \\ C_C^{\mathrm{T}} & C_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u}_R \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_C \\ K_C^{\mathrm{T}} & K_R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ u_R \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ R \end{Bmatrix}, \qquad (2)$$

где u — вектор неизвестных перемещений для степеней свободы, на которые не наложены закрепления и не заданы кинематические возмущения; u_R — вектор единичных перемещений, заданных по степеням свободы конечно-элементной модели, к которым прикладываются кинематические возмущения; M, C и K — матрицы масс, демпфирования и жесткости, ассоциируемые со степенями свободы (u), на которые не заданы кинематические возмущения; M_R, C_R и K_R — матрицы масс, демпфирования и жесткости, ассоциируемые со степенями свободы (u_R), на которые заданы кинематические возмущения; M_C, C_C и K_C — матрицы связи масс, демпфирования и жесткости между степенями свободы, на которые заданы и не заданы кинематические возмущения; R — вектор сил реакций, соответствующих степеням свободы, на которые заданы кинематические возмущения; 0 — вектор сил, соответствующих степеням свободы, на которые не заданы кинематические воздействия.

Решение динамической задачи основного уравнения МКЭ выполнялось в частотной области методом разложения по собственным формам. Для этого исследуемое тело представляется как набор n осцилляторов, расположенных в порядке возрастания их собственных частот колебаний. Отклик в виде спектральной плотности мощности для i-й степени свободы определяется по частям ($S_{di}(\omega)$ — динамическая часть; $S_{si}(\omega)$ — псевдостатическая часть; $S_{sdi}(\omega)$ — корреляционная часть между псевдостатической и динамической) и, согласно основному уравнению статистической динамики, вычисляется от входных спектров с помощью передаточной функции для системы с одной степенью свободы и последующим объединением форм колебаний.

Абсолютное среднеквадратичное значение отклика перемещений незакрепленных узлов системы вычисляется как

$$D_i = \int_0^\infty S_{di}(\omega)d\omega + \int_0^\infty S_{si}(\omega)d\omega + 2\left|\int_0^\infty S_{sdi}(\omega)d\omega\right|_{\mathrm{Re}} = \\ = D_{di} + D_{si} + 2C_v(u_{si}, u_{di}), \qquad (3)$$

где $|\,|_{\mathrm{Re}}$ — реальная часть аргумента; D_{di} — дисперсия i-х относительных (динамических) свободных перемещений; D_{si} — дисперсия i-х псевдостатических перемещений; $C_v(u_{si}, u_{di})$ — корреляция между псевдостатическими и динамическими перемещениями.

Аналогично вычисляются дисперсии напряжений. Дисперсии напряжений используются для оценки ресурса в четвертом блоке (см. рисунок 1) имитационной модели прогнозирования нагруженности. Для реализации вычислений выражений (2)-(3) используется аналитическая программная среда конечно-элементного анализа ANSYS.

Четвертый блок — оценка ресурса по спектральным плотностям напряжений. Учитывая повышенные требования к безопасности движения, можно оценивать предельное состояние при оценке качества проектирования по критерию образования усталостной трещины. С учетом корректированной линейной гипотезы накопления повреждений [5] и учетом различных режимов эксплуатации вагона [6] выражение для определения долговечности в циклах записывается в виде

$$\lambda = \frac{\nu_p \cdot \sigma_{-1}^m \cdot N_0}{\sum_{k=1}^{z} p_k \cdot \gamma_{бk} \cdot J_k \cdot \frac{1}{\varphi_{\sigma k}^m}}, \qquad (4)$$

где J_k — интеграл, характеризующий накопление усталостных повреждений, вычисляемый по двум выражениям из [7] в зависимости от значения коэффициента широкополосности; σ_{-1} — предел выносливости; $\varphi_\sigma = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_в}$ — коэффициент, учитывающий асимметрию цикла ; m — показатель кривой усталости ; $\gamma_{бk}$ — количество циклов в блоке нагружения; p_k — относительные доли времени работы конструкции (k — номер комбинации факторов, влияющих на величину нагрузок) за срок службы; z — общее количество комбинаций; $\sum_{k=1}^{z} p_k = 1$, N_0 — базовое число циклов;

$$\nu_p = \frac{\sigma_{a\max} \cdot \varsigma - 0{,}5 \cdot \sigma_{-1}}{\sigma_{a\max} - 0{,}5 \cdot \sigma_{-1}}.$$

В выражении (1) относительные доли времени применительно к железнодорожным экипажам характеризуют k комбинаций факторов, влияющих на уровень нагрузок, — это движение в прямых, кривых участках пути, стрелочных переводах и с различными скоростями [6]. Однако конструкция тележки содержит демпферы сухого трения, и для нее существенным является изменение нагрузок в эксплуатации вследствие износа фрикционных поверхностей.

В работе [7] представлены результаты исследований на имитационной модели движения по определению влияния величины износа на поверхностях трения фрикционного гасителя на динамические характеристики тележки. Согласно данным результатам, следует, что в рабочем диапазоне износов происходит значительное изменение нагрузок. При этом для определения продолжительности работы конструкции в каждом интервале возможно использование опытных данных об интенсивности износа конструкций аналогов и определение соответствующих характеристик нагрузок на каждом интервале, а также прогнозирование на имитационной модели износа во времени.

Соответственно выражение (4) для количественного прогноза ресурса с учетом изменения нагрузок от износа демпферов сухого трения для тележек грузовых вагонов рассматриваемого типа примет следующий вид:

$$\lambda = \frac{\nu_p \cdot \sigma_{-1}^m \cdot N_0}{\sum_{k=1}^{z} \sum_{n=1}^{m} \frac{p_k}{n} \cdot \gamma_{бnk} \cdot J_{nk} \cdot \frac{1}{\varphi_{\sigma nk}^m}}, \qquad (5)$$

где z — число режимов нагрузок, обусловленное движением в различных участках пути и различными скоростями; m — число режимов нагрузок, обусловленное количеством интервалов износов, выбранных для оценки.

Для численной оценки долговечности по выражению (5) реализована программа вычислений на символьном языке программного комплекса MahtCad.

Согласно изложенным положениям методики оценки нагруженности, выполнены исследования работоспособности устройства блокировки рессорного подвешивания тележки грузового вагона. Устройство устанавливается на боковой раме тележки, которая подкатывается под грузовые вагоны, предназначенные для специальной техники на железнодорожном ходу (например, кран), и служит на стоянке для передачи нагрузки от кузова на рельсы через колесо, минуя рессорный комплект.

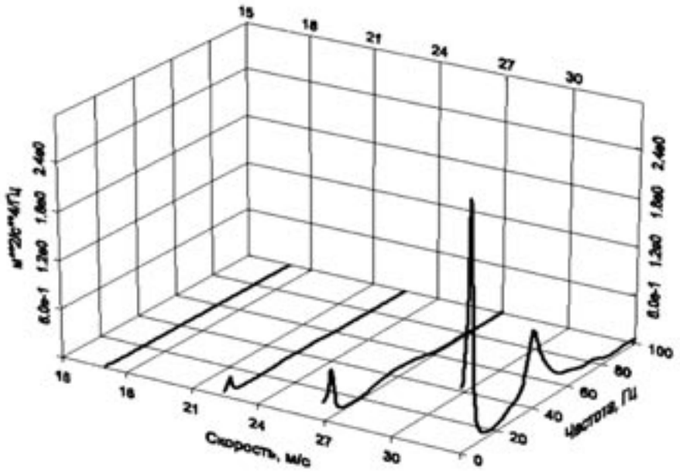


Рисунок 5 — Графики расчетных спектральных плотностей ускорений, действующих на устройство блокировки для различных скоростей движения вагона

Динамические возмущения от движения тележки, передающиеся от рамы на устройство, как выяснилось из эксплуатации, приводят к быстрому разрушению несущего элемента — вилки. Работа устройства подвергалась моделированию согласно предложенному методу прогнозирования нагруженности. На первой стадии моделированием движения вагона были получены спектральные плотности ускорений, которые возникают на боковой раме в месте крепления устройства (рисунок 5). Для расчета динамических напряжений разработана схема нагружения и конечно-элементная модель устройства, деталь (вилка) которой показана на рисунке 6. Для расчета динамических напряжений от спектральных воздействий предварительно выполнялся модальный анализ. При этом получено, что одна из собственных частот попадает в значение частоты, соответствующей второму пику спектра возмущений.

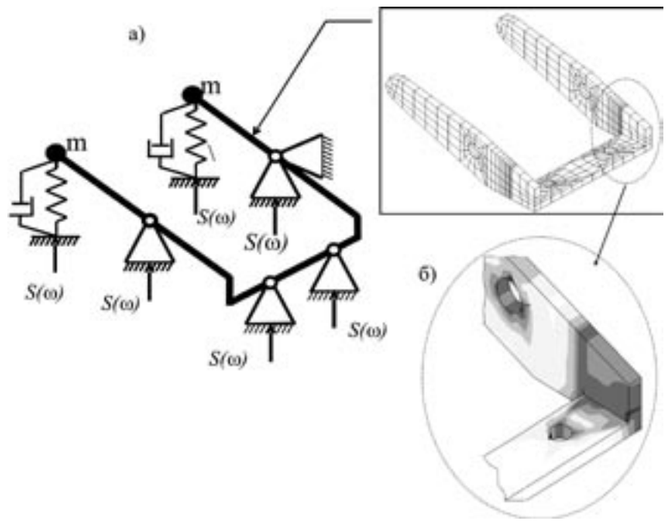


Рисунок 6 — Расчетная схема устройства блокировки рессорного подвешивания и схема приложения спектральных воздействий (а) при динамическом расчете, результаты расчета в виде полей динамических напряжений в опасной зоне конструкции устройства (б)

Расчетом от спектральных возмущений были получено динамическое напряженное состояние (см. рисунок 6) и статистические оценки напряжений. По данным характеристикам рассчитывался ресурс типовой конструкции согласно зависимости (2) и программе расчета. В единицах пробега ресурс составил 46200 км, что соответствовало данным эксплуатации. Изменение конструкции устройства было осуществлено с целью увода первой собственной частоты от опасного частотного интервала входных воздействий. Проведенный анализ показал, что первая парциальная частота новой конструкции лежит выше данного интервала. Уровень полученных дисперсий и среднеквадратических значений (CKO) напряжений в измененной конструкции при расчете от спектральных воздействий ниже (CKO = 2,19 МПа), чем у типовой конструкции (CKO = 5,12 МПа). Расчетная оценка ресурса измененной конструкции составила соответственно 879000 км пробега, что почти в 20 раз выше, чем у типовой конструкции.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности проведенных изменений в конструкции устройства с использованием имитационной модели прогнозирования динамической нагруженности, а это, в свою очередь, говорит о целесообразности использования модели на стадии проектирования грузовых вагонов.

Литература

1. ГОСТ 27609-88. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Основные требования к проведению и нормативно-техническому обеспечению. Введ. 21.05.91. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 14 с.

2. РД 32.68-96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. — М.: ВНИИЖТ, 1996. —17 с.

3. Погорелов Д.Ю., Павлюков А.Э., Юдакова Т.А., Котов С.В. Моделирование контактных взаимодействий в задачах динамики систем тел // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сборник научных статей / Под ред. Б.Г. Кеглина. — Брянск: Изд-во БГТУ, 2002. — С. 11–23.

4. Ronald S. Harichandran. Spatal variation of earthquake ground motion (What is it, how do we model it, and what are its engineering implications?). — http:// www.msu.edu/ harichan.

5. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. — М.: Машиностроение, 1989. — 248 с.

6. Савоськин А.Н., Бурчак Г.П., Матвеевичев А.П. и др. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / Под ред. А.Н. Савоськина.— М.: Машиностроение, 1990. —288 с.

7. Павлюков А.Э. Имитационная модель прогнозирования ресурса деталей тележек грузовых вагонов // Новые материалы и технологии в машиностроении: Сборник научных трудов. — Брянск, 2002. — Вып. 1.— С. 75–79.

Баутин С.П., Жироухов Е.И., Рощупкин А.В.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ В ТОРМОЗНОЙ МАГИСТРАЛИ ПОЕЗДА ПРИ РАСПРЕДЕЛЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ



Баутин Сергей Петрович,
д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная математика» УрГУПС



Жироухов Евгений Иванович,
заведующий научно-исследовательской лабораторией «Вес поезда» УрГУПС



Рощупкин Алексей Васильевич,
ассистент кафедры «Прикладная математика», научный сотрудник лаборатории «Вес поезда» УрГУПС

В ближайшие десятилетия основной объем перевозок в нашей стране будет осуществляться грузовым железнодорожным транспортом. Явной тенденцией развития в грузовом движении является введение в регулярное обращение тяжеловесных, длинносоставных и соединенных поездов. В подавляющем большинстве такие поезда имеют рассредоточенную тягу и, следовательно, распределенное воздействие на тормозные средства, из которых основными были, есть и будут пневматические тормоза. Также следует добавить ожидаемое широкое внедрение радиоустройств контроля и управления тормозной магистралью (ТМ) с хвоста поезда. При этом воздействие на ТМ из разных точек может быть как синхронным, так и разнесенным по времени, а также выполняться по специально выбранному закону.

При подобных воздействиях главную роль в процессе торможения и отпуска играет динамика сложного взаимодействия воздушных потоков в ТМ. В этом случае получить адекватное и точное описание состояния ТМ с помощью ранее применявшихся методов [1–3] реально невозможно. Дело в том, что в [1–3] используется линейная математическая модель, являющаяся системой линейных телеграфных уравнений с частными производными, а с помощью точных решений линейной модели невозможно описать такие сложные газодинамические течения, как, например, переход воздушного потока в ТМ от волн разрежения к волнам сжатия при немонотонных по времени граничных условиях на кране машиниста. Особенно если такие переменные граничные условия имеют место, например, в двух разных точках ТМ и, как отмечалось выше, реализуются в разные моменты времени.

Развитие математических методов газовой динамики, а также наличие и доступность высокопроизводительной вычислительной техники позволяют привлечь для описания течений газа в автотормозах нелинейную систему уравнений газовой динамики [4–6] (нелинейная модель), являющуюся нелинейной системой уравнений с частными производными гиперболического типа. Решения этой системы удовлетворяют фундаментальным законам сохранения массы, импульса и энергии и, естественно, более адекватно передают течения газа, чем линейная модель.

В данной работе система уравнений газовой динамики берется в дивергентном виде [7], что обусловлено применяемым способом ее численного решения. Рассматривается случай плоскосимметричных течений, возникающих в том числе при движении газа в цилиндрической трубе постоянного диаметра:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \dfrac{\partial (\rho u)}{\partial x} = f_1\left(t, x, \vec{U}\right), \\ \dfrac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \dfrac{\partial \left(p + \rho u^2\right)}{\partial x} = f_2\left(t, x, \vec{U}\right), \\ \dfrac{\partial \rho \left(\varepsilon + u^2/2\right)}{\partial t} + \dfrac{\partial \left[\rho u\left(\varepsilon + u^2/2\right) + pu\right]}{\partial x} = f_3\left(t, x, \vec{U}\right). \end{cases} \quad (1)$$

В системе (1): t — время; x — пространственная координата; $\vec{U} = (\rho, u, p, \varepsilon)$ — вектор неизвестных функций; ρ — плотность; p — давление; ε — внутренняя энергия единицы массы газа; u — скорость газа в направлении оси O_x.

К системе уравнений (1) добавляется уравнение состояния воздуха, являющегося идеальным политропным газом,

$$\varepsilon(p, \rho) = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho}, \gamma = \text{const} = 1{,}4\ . \quad (2)$$

При известном решении системы (1) значение температуры T восстанавливается по формуле

$$T = \frac{p}{R\rho},$$

где положительная константа является универсальной газовой постоянной.

Считается, что в уравнениях (1), (2) стандартным образом проведено обезразмеривание как независимых, так и зависимых переменных:

$$z = \frac{z'}{\tilde{z}},$$

где для краткости записи символ z означает безразмерные значения всех переменных t, x, ρ, u, p, ε, а $\tilde{z}$ — масштабная единица для соответствующей размерной величины z'. Кроме того, штрихом помечаются размерные величины, а волнистая черта ставится над масштабными значениями.

В качестве масштабных единиц газодинамических параметров взяты: $\tilde{p}$ = 1атм = 10332,27 кг/м² — атмосферное давление; $\tilde{\rho}$ = 1,293 кг/м³ — плотность воздуха при 20 °С и атмосферном давлении. За масштабное значение расстояния $\tilde{x}$ берется длина ТМ. Масштабное значение скорости звука в воздухе при указанных условиях будет таким: $\tilde{c}$ = 331,22 м/с. При этом за значение масштабной единицы скорости принимается величина $\tilde{u} = \tilde{c}$, а за значение масштабной единицы времени величина $\tilde{t} = \tilde{x}/\tilde{c}$.

Если течение газа в ТМ необходимо рассматривать при других значениях температуры, например при $T = \tilde{T} \neq 20^0 C$, то это приведет к изменению масштабной скорости звука

$$\tilde{c} = \sqrt{R\gamma T}$$

и, следовательно, к соответствующему изменению масштабных единиц $\tilde{u}$, $\tilde{x}$.

В системе (1) каждое из уравнений является дифференциальной формой своего закона сохранения: массы (первое уравнение), импульса (второе), энергии (третье). Если стоящие в правых частях системы (1) функции f_1, f_2, f_3 тождественно равны нулю, то это означает, что в рассматриваемых течениях газа отсутствуют внешние притоки массы, импульса и энергии, т.е. рассматривается замкнутый от внешнего воздействия объект. Если какая-то из упомянутых функций f_1, f_2, f_3 отлична от нуля, то это означает присутствие притока или стока (в зависимости от знака функции) соответствующей газодинамической величины. Заметим, что притоком-стоком массы, импульса и энергии можно управлять и без функций f_1, f_2, f_3, задавая на концах трубы соответствующие граничные условия.

Очевидно, что модель идеальной цилиндрической трубы без присутствия в системе (1) функций f_1, f_2, f_3, т.е. без внешних притоков-стоков, распределенных вдоль всей трубы, будет неадекватно описывать движение газа в ТМ. Самым простым подтверждением этого служит тот факт, что в реальной ТМ при постоянно поддерживаемом давлении краном машиниста и при всех воздухораспределителях, находящихся в положении отпуска, давление вдоль состава тем не менее не является постоянным. Оно монотонно убывает вдоль состава при удалении от крана машиниста. Естественно, что такое непостоянное распределение давления не является решением системы (1) при нулевых значениях функций f_1, f_2, f_3 и постоянных начальных и краевых условиях для системы (1).

Также достаточно очевидно, что возникающие в действительности движения газа по ТМ определяются не только утечками воздуха или неидеальностью внутренней поверхности трубопровода, а еще многими, объективно существующими свойствами реальных ТМ.

Имеется еще один серьезный аргумент в пользу того, что при использовании модели течения газа в трубе постоянного диаметра необходимо вводить ненулевые функции f_1, f_2, f_3. При отпуске тормозов в каждом вагоне начинается восстановление нормального зарядного давления в ТМ, зарядка золотниковых камер воздухораспределителей и, основное, зарядка запасных резервуаров. А этот процесс существенно увеличивает объемы и массы воздуха, участвующие и принципиально влияющие на динамику газовых потоков в ТМ.

Введение функций f_1, f_2, f_3 часто применяется в газовой динамике [8]. И, как показывает опыт использования функций f_1, f_2, f_3, наиболее эффективно влияет на газовый поток наличие функции f_2, описывающей приток или потерю импульса при движении газа. Например, в [8] при рассмотрении движения газа в трубе система уравнений газовой динамики записана с неоднородной правой частью для второго уравнения системы

$$f_2 = q\rho u^2; \quad f_1 = f_2 = 0\ ,$$

где q — либо константа, либо некоторая конкретная функция, зависящая в общем случае как от t и x, так и от всех параметров потока газа. В указанной работе [8] предлагается в качестве q брать линейную функцию, зависящую

от некоторой степени разности *(p - p_k)*, где p_k — давление в камере, сообщающейся с трубой через отверстия в ее стенках. При этом $q < 0$, если происходит втекание газа в трубу; $q > 0$, если происходит отток газа.

При использовании линейной модели [1] также учитывается незамкнутость и неидеальность ТМ. При этом, по сравнению с [8] делается дальнейшее преобразование функции f_2. А именно вначале полагается, что

$$f_2 = A\rho u, \qquad (3)$$

где $A = \lambda u / d_0$ (λ, d_0 — константы).

Затем величина A полагается равной некоторой постоянной. При решении конкретных задач, связанных с повышением или понижением давления в тормозной магистрали, эта константа бралась в [1] различной для разных режимов.

Именно в виде (3) ниже рассматривается правая часть для второго уравнения системы (1), а функции f_1, f_3 полагаются нулями. Кроме того, в отличие от [1], для более адекватного описания различных газодинамических течений в ТМ в данной работе A будет считаться не константой, а некоторой кусочно-постоянной функцией от независимой переменной. В дальнейшем при моделировании еще более сложных потоков в ТМ предполагается брать A в виде функции от переменной, а также и от параметров газового потока.

Далее в системе (1) полагается $f_1 = f_3 = 0$, а f_2 определяется по формуле (3).

К системе (1) дополнительно задаются начально-краевые условия.

Начальное условие:

$$\vec{U}(t,x)\Big|_{t=0} = \vec{U}_0(x), \qquad (4)$$

где вектор считается известным и описывает состояния газа в ТМ в начальный момент времени $t = 0$.

Краевые условия ставятся при $x = 0$ и при $x = 1$, т.е. в начале и конце состава.

На левой границе тормозной магистрали, т.е. при $x=0$, будут реализовываться два разных режима.

Первый описывает торможение в режиме «перекрыша с питанием»:

$$p(t,x)\big|_{x=0,t\le t_1} = P_1(t), p(t,x)\big|_{x=0,t\ge t_1} =$$

$$= P_2(t) = \text{const} = P_1(t_1), \qquad (5)$$

где момент времени t_1 соответствует моменту окончания выпуска воздуха из тормозной магистрали в атмосферу, а вид функции $P_1(t)$ берется из условий, реализуемых краном машиниста.

Второй режим на левой границе передает торможение в режиме «перекрыша без питания»:

$$p(t,x)\big|_{x=0,t\le t_1} = P_1(t), u(t,x)\big|_{x=0,t\ge t_1} = 0. \qquad (6)$$

На правой границе тормозной магистрали при обоих режимах рассматривается условие непротекания, говорящее о том, что газ через правую границу не течет:

$$u(t,x)\big|_{x=1} = 0. \qquad (7)$$

Естественно, что при других режимах торможения, в том числе при распределенном воздействии, граничные условия должны передавать в нужных точках ТМ нужные зависимости. Так, при моделировании газодинамических процессов в ТМ соединенного поезда всю рассматриваемую область надо разбивать на подобласти с краевыми условиями на их границах, определяемыми процессами, создаваемыми соответствующими кранами машиниста.

Выбранный метод численного решения начально-краевых задач для системы (1) называется методом Годунова и описан в книге [7]. Суть этого метода заключается в следующем.

Отрезок [0,1] точками $x_j = hj, j = 0, 1, \ldots, N$ разбивается на N равных частей. Расстояние между соседними точками $h=1/N$ называется шагом сетки по пространственной переменной. Также вводятся точки с «полуцелыми номерами»: $x_{j-1/2} = (x_j + x_{j-1})/2$, $x_{j+1/2} = (x_j + x_{j+1})/2$.

Значения компонент вектора в точках с целыми индексами $\vec{U}$ называются «большие значения» и обозначаются $\vec{U}_j = (R_j, U_j, P_j, E_j)$. Значения компонент вектора $\vec{U}$ в точках с полуцелыми индексами $x_{j\pm1}$ обозначаются $\vec{U}_{j\pm1} = (\rho_{j\pm1}, u_{j\pm1}, p_{j\pm1}, \varepsilon_{j\pm1})$. При этом считается, что если индекс точки у функции стоит внизу $\vec{U}_j$, то это значения с текущего временного слоя, а если вверху $\vec{U}^j$, то это значения функций на следующем временном слое, отличном от текущего на величину τ.

Цель указанного выше вычислительного алгоритма: переходя с одного временного слоя на другой, построить в узлах сетки x_j значения искомых параметров газа в моменты времени от $t = 0$ до некоторого $t = t_{кон}$, до которого требуется найти течение газа в ТМ.

Суть вычислительного алгоритма следующая. В качестве начального временного слоя берется значение $t = 0$, при этом значения искомых функций в узлах сетки берутся из начальных условий (4):

$$\vec{U}_j = \vec{U}_0(x_j),\ \vec{U}_{j\pm1} = \vec{U}_0(x_{j\pm1}).$$

Пусть рассчитано n шагов по времени и на n-м временном слое (при $t = t_n$) известны значения функций $\vec{U}(x, t_n)$ как в целочисленных точках, так и в дробных. Расчет значений функций $\vec{U}$ на следующем временном слое $(n+1)$ при $t_{n+1} = t_n + \tau$, где τ находится из условия Куранта

$$\tau = \min_{j\in[0,N]} \frac{h}{\max(u_j - c_j, u_j + c_j)}.$$

На первом этапе расчет значений $\vec{U}$ в точках с нецелыми номерами $x^{j\pm1}$ на следующем временном слое производится по формулам:

$$\rho^{j-1/2} = \rho_{j-1/2} - \alpha\left[M_j - M_{j-1}\right];$$

$$u^{j-1/2} = \left\{(\rho u)_{j-1/2} + (f_2)_{j-1/2} - \alpha\left[J_j - J_{j-1}\right]\right\} / \rho^{j-1/2};$$

$$\varepsilon^{j-1/2} = -\left(u^2/2\right)^{j-1/2} + \left\{\left(\rho\left[\varepsilon + u^2/2\right]\right)_{j-1/2} - \alpha\left[I_j - I_{j-1}\right]\right\} / \rho^{j-1/2};$$

$$p^{j-1/2} = (\gamma - 1)(\varepsilon\rho)^{j-1/2},$$

где

$$\alpha = \frac{\tau}{h}, M_j = (RU)_j, J_j = \left(P + RU^2\right), I_j = \left[RU\left(E + \frac{U^2}{2}\right) + PU\right]_j.$$

На втором этапе производится расчет больших значений $\vec{U}$ в точках x^j с целыми номерами на следующем временном слое, исходя из решения задачи о распаде разрыва [4–7]. Поскольку расчетные формулы второго этапа достаточно громоздкие [7], то они здесь не приводятся.

После реализации данного вычислительного алгоритма его достоверность была проверена счетом тестового примера из книги [7].

Расчетами были промоделированы испытания, проведенные в мае 2003 года на тормозной станции ВНИИЖТ со следующими параметрами ТМ. Длина без отводов: грузового поезда — 100 вагонов (1477 м); пассажирского поезда — 40 вагонов (1016,5 м); общая длина 2830 м; диаметр условного перехода 32 мм; объем одного метра ТМ — 0,8 л.

Вначале приведем данные одного численного расчета для одиночного грузового поезда (100 вагонов) с параметрами: ТМ без утечек; груженый и равнинный режимы торможения и отпуска, нормальное зарядное давление уравнительного резервуара 0,55 МПа.

Эксперимент — служебное торможение: разрядка на 0,07 МПа и отпуск с завышением до 0,65 МПа. В этом случае функция $P_1(t)$ имеет вид, изображенный на рисунке 1 серой линией.

На рисунках 1–4 приведены зависимости давления (по оси ординат) в разных точках ТМ от времени (по оси абсцисс). Серой линией показаны данные эксперимента, черной линией — результаты численного расчета. Указанные зависимости соответствуют значениям $x = 0$; $x = 0{,}4$; $x = 0{,}5$; $x = 1{,}0$. При этом в численных расчетах величина A определялась из соотношения

$$A\rho^{j-1/2} = \begin{cases} -12 \text{ при } 0 \le t < 24; \\ 880 \text{ при } 24 \le t. \end{cases}$$

Приведем два расчета для соединенного поезда (50+50 вагонов) с параметрами: ТМ без утечек, груженый и равнинный режимы торможения и отпуска, зарядное давление УР — 0,55 МПа.

Рисунок 1

Рисунок 3

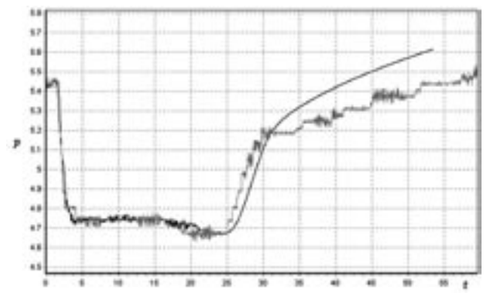


Рисунок 2

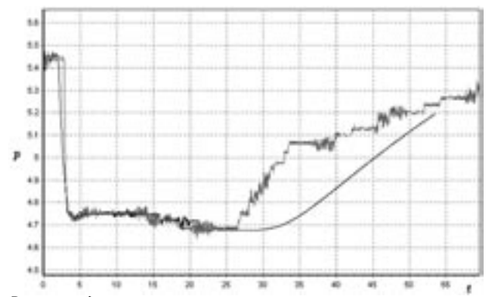


Рисунок 4

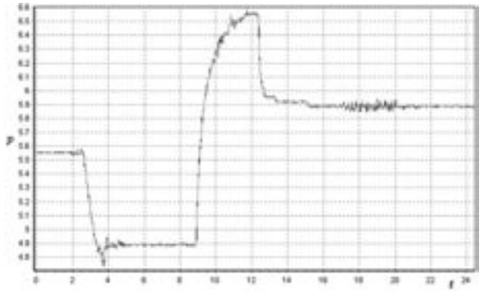


Рисунок 5

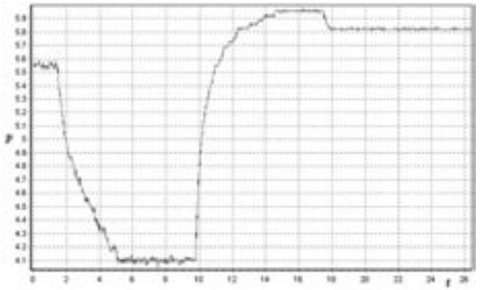


Рисунок 9

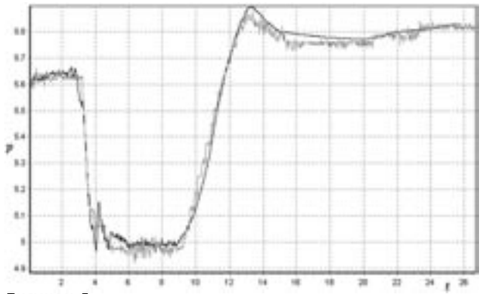


Рисунок 6

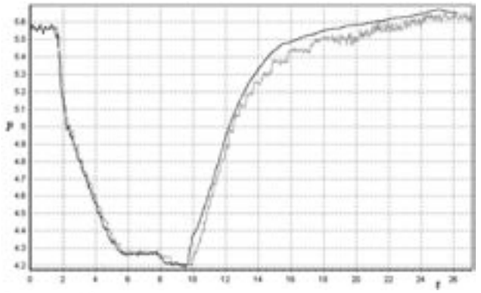


Рисунок 10

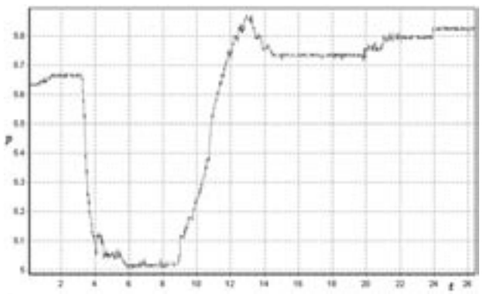


Рисунок 7

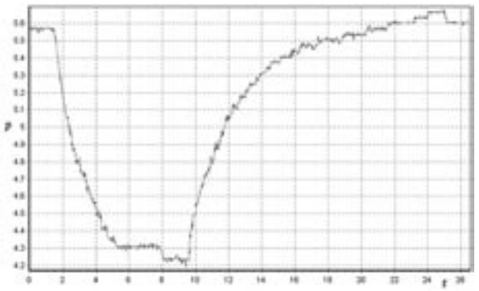


Рисунок 11

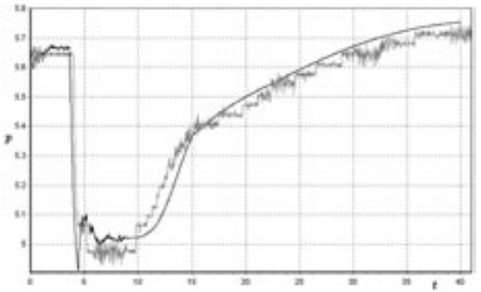


Рисунок 8

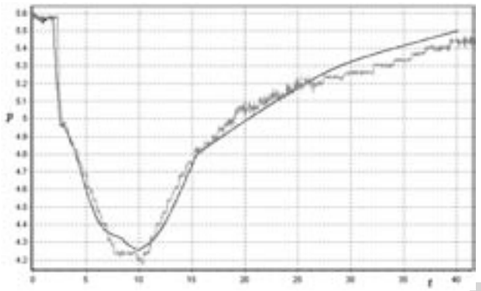


Рисунок 12

Эксперимент № 1 — служебное торможение: на первом и на втором кранах машиниста (50-й вагон) — выполняются разрядка ТМ на 0,07 МПа и отпуск с завышением давления до 0,65 МПа. В этом случае функции, задающие давление на первом кране машиниста, имеют вид, приведенный на рисунке 5 (головная часть поезда). На втором кране машиниста (50-й вагон) давление задается функцией, приведенной на рисунке 7.

В этом эксперименте функция A определялась из соотношения

$$A\rho^{j-1/2} = \begin{cases} -12 \text{ при } 0 \le t < 9; \\ 880 \text{ при } 9 \le t. \end{cases}$$

Эксперимент № 2 — полное служебное торможение: на первом и на втором кранах машиниста (50-й вагон) разрядка ТМ на 0,18 МПа и отпуск с завышением давления до 0,65 МПа. В этом случае функции, задающие давление на первом кране машиниста, имеют вид, приведенный на рисунке 9 (головная часть поезда). На втором кране машиниста (50-й вагон) давление задается функцией, приведенной на рисунке 11.

В этом эксперименте функция A также определялась из соотношения:

$$A\rho^{j-1/2} = \begin{cases} -12 \text{ при } 0 \le t < 4; \\ -70 \text{ при } 4 \le t < 18; \\ 880 \text{ при } 18 \le t. \end{cases}$$

На рисунках 5–8 (соответствующих значениям $x = 0$; $x = 0{,}4$; $x = 0{,}5$; $x = 1{,}0$) также серым и черным цветами помечены соответственно данные первого эксперимента и результаты расчетов (координатные оси на этих рисунках такие же, как на рисунках 1–4). А на рисунках 9–12 (при тех же значениях переменной и в тех же координатах, что и на предыдущих рисунках) приведена соответствующая информация для второго эксперимента.

Как видно из приведенных рисунков, численные расчеты при подобранных значениях величины не только качественно, но и количественно совпали с данными экспериментов на всем рассматриваемом временном отрезке. Относительная погрешность не превосходит 1–8%. Наибольшая погрешность достигается в хвостовой части для одиночного состава (см. рисунок 4 при $t = 35$) и равна 100%·(5,09–4,75) / 5,09 = 7,66%.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предложенный способ численного моделирования газодинамических течений в ТМ дает результаты, хорошо согласующиеся с натурными испытаниями реальных ТМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казаринов В.М., Иноземцев В.Г., Ясенцев В.Ф. Теоретические основы проектирования и эксплуатации автотормозов. — М.: Транспорт, 1968. — 399 с.

2. Казаринов В.М. Автотормоза. — М.: Транспорт, 1974. — 240 с.

3. Иноземцев В.Г., Казаринов В.М., Ясенцев В.Ф. Автоматические тормоза. — М.: Транспорт, 1981. — 464 с.

4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1970. — 904 с.

5. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Изд. 2-е. — М.: Наука, 1978. — 688 с.

6. Овсянников Л.В. Лекции по основам газовой динамики. — М — Ижевск: Изд-во института компьютерных исследований, 2003. — 336 с.

7. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. — 400 с.

8. Черный Г.Г. Неустановившиеся движения газа в каналах. Устойчивость замыкающего скачка // Газовая динамика. Избранное. — Т.1. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. — С. 590–609.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Максимальный уровень тягового усилия между ведущим колесом локомотива и рельсом зависит от способности контактной площадки воспринимать тягу. Эта способность выражается в виде коэффициента сцепления, являющегося отношением силы тяги к нормальной нагрузке. Обычно сцепление колеса с рельсом достигает своего максимума при величине продольного крипа (относительного проскальзывания), равной 0,01–0,02.

Однако на характер зависимости между тяговым усилием и крипом существенное влияние оказывают реологические характеристики слоев, образующих третье тело между поверхностями катания колеса и рельса. Слой третьего тела состоит из смеси частиц контактирующих материалов, и на его состав оказывают влияние факторы окружающий среды и эксплуатационные условия.

Если поверхности рельса и колеса сухие и чистые, коэффициент сцепления остается на высоком уровне при больших проскальзываниях и скоростях движения. Когда поверхности рельса и колеса загрязнены водой и особенно смазочным материалом, коэффициент сцепления снижается по мере увеличения относительного проскалъзывания, а также повышения скорости движения поезда. Это влияние следует учитывать при использовании взаимосвязи между силами крипа и его характером в моделях динамики взаимодействия пути и подвижного состава или при конструировании локомотивов.

Харрис У. Дж., Захаров С.М., Ландгрен Дж., Турне Х., Эберсен В. Обобщение передового опыта тяжеловесного движения: вопросы взаимодействия колеса и рельса/ Пер. с англ. — М.:Интекст, 2002.— 408 с.

Румянцев С.А.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ САМОСИНХРОНИЗИРУЮЩИХСЯ ВИБРОТРАНСПОРТИРУЮЩИХ МАШИН НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



Румянцев Сергей Алексеевич,
д.т.н., УрГУПС

Вибротранспортирующие машины (ВТМ) предназначены для транспортировки и (или) сортировки различных сыпучих материалов и скальных пород. Они широко применяются на перегрузочных пунктах железнодорожных станций, на производстве щебня, а также на обогатительных фабриках, в цехах металлургических заводов, предприятий строительных и флюсовых материалов и т.д.

По конструкции большинство из этих машин представляет собой единое твердое тело (несущее тело), закрепленное на пружинах, которые позволяют ему совершать плоскопараллельное движение (рисунок 1). Движение несущего тела или рабочего органа (РО) возбуждается специальными устройствами — вибровозбудителями (ВВ). Чаще всего применяются дебалансные вибровозбудители, представляющие собой неуравновешенные роторы, которые приводятся в движение электродвигателями. Применение двух или любого четного числа одинаковых ВВ, вращающихся с одинаковыми угловыми скоростями в противоположных (попарно противоположных) направлениях, позволяет получить возмущающую силу постоянного направления.

Традиционно для синхронизации вращений дебалансов применялась жесткая механическая связь между ними или электрическая связь между электродвигателями, приводящими их во вращение. В последние десятилетия, однако, все более широкое применение находят машины с независимо вращающимися ВВ. Их роторы могут вращаться независимо, а необходимая для нормальной работы машины синхронизация вращений достигается в силу специфического явления, известного как явление самосинхронизации механических систем (см., напр., [1]).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ ВТМ

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение ВТМ с самосинхронизирующимися вибровозбудителями, была получена И.И. Блехманом [1]. Им и его учениками исследованы синхронные решения этой системы, соответствующие установившимся синхронным вращениям ВВ, а также условия их существования и устойчивости.

В работах [2–5] исследованы неустановившиеся движения ВТМ, связанные с пусковыми и послеударными переходными динамическими процессами. В работах [2–5] получена система дифференциальных уравнений, содержащая дополнительные слагаемые, позволяющие более точно описывать неустановившиеся движения:

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}\Big[-k_x\dot{x} - k_{x\varphi}\dot{\varphi} - c_x x - c_{x\varphi}\varphi + m_1\varepsilon_1(\ddot{\varphi}_1\sin\varphi_1 + \dot{\varphi}_1^2\cos\varphi_1) + m_2\varepsilon_2(\ddot{\varphi}_2\sin\varphi_2 + \dot{\varphi}_2^2\cos\varphi_2)\Big];$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{M}\Big[-k_y\dot{y} - k_{y\varphi}\dot{\varphi} - c_y y - c_{y\varphi}\varphi + m_1\varepsilon_1(\dot{\varphi}_1^2\sin\varphi_1 - \ddot{\varphi}_1\cos\varphi_1) + m_2\varepsilon_2(\dot{\varphi}_2^2\sin\varphi_2 - \ddot{\varphi}_2\cos\varphi_2) - F_{уд}\Big];$$

$$\ddot{\varphi} = \frac{1}{J}\Big[-k_{x\varphi}\dot{x} - k_{y\varphi}\dot{y} - k_\varphi\dot{\varphi} - c_{x\varphi}x - c_{y\varphi}y - c_\varphi\varphi + m_1\varepsilon_1 r_1\big(\dot{\varphi}_1^2\sin(\varphi_1 - \delta_1 - \varphi) - \ddot{\varphi}_1\cos(\varphi_1 - \delta_1 - \varphi)\big) + m_2\varepsilon_2 r_2\big(\dot{\varphi}_2^2\sin(\varphi_2 - \delta_2 - \varphi) - \ddot{\varphi}_2\cos(\varphi_2 - \delta_2 - \varphi)\big) + M_{уд}$$

$$\ddot{\varphi}_1 = \frac{1}{J_1}I_1\big[L_1(\dot{\varphi}_1) - R_1(\dot{\varphi}_1)\big] + \frac{m_1\varepsilon_1}{J_1}\Big[\ddot{x}\sin\varphi_1 - \ddot{y}\cos\varphi_1 - g\cos\varphi_1 - r_1\ddot{\varphi}\cos(\varphi_1 - \delta_1 - \varphi) - r_1\dot{\varphi}^2\sin(\varphi_1 - \delta_1 - \varphi)$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{1}{J_2}I_2\big[L_2(\dot{\varphi}_2) - R_2(\dot{\varphi}_2)\big] + \frac{m_2\varepsilon_2}{J_2}\Big[\ddot{x}\sin\varphi_2 - \ddot{y}\cos\varphi_2 - g\cos\varphi_2 - r_2\ddot{\varphi}\cos(\varphi_2 - \delta_2 - \varphi) - r_2\dot{\varphi}^2\sin(\varphi_2 - \delta_2 - \varphi)\Big]. \quad (1)$$

Здесь (x,y) — координаты центра масс (РО) в некоторой неподвижной декартовой системе координат (рисунок 1); φ — угловая координата РО, т.е. угол поворота подвижной системы координат, жестко связанной с РО относительно неподвижной системы координат (отсчитывается против часовой стрелки); φ_1, φ_2 — угловые координаты (отсчитываются против часовой стрелки) первого и второго ВВ, т.е. углы, которые составляют радиус-векторы дебалансов с осью Ox (на рисунке 1 условно показан один ВВ, обозначенный индексом i); $L_1(\dot{\varphi}_1), L_2(\dot{\varphi}_2), R_1(\dot{\varphi}_1), R_2(\dot{\varphi}_2)$ — вращающие моменты электродвигателей первого и второго ВВ и моменты сил сопротивления вращению системы электродвигатель — передающий механизм — вибровозбудитель; I_1, I_2 — индексы направления, т.е. коэффициенты, принимающие значение +1, если вращение данного ВВ происходит против часовой стрелки, и значение –1 в противном случае; M, J — соответственно масса и момент инерции РО; J_i, m_i — соответственно момент инерции и статический момент i-го ВВ; c_x, c_y, c_φ и т.д. — коэффициенты жесткости упругих опорных элементов; k_x, k_y, k_φ и т.д. — коэффициенты вязкого сопротивления, соответствующие указанным в индексах обобщенным координатам; $F_{уд}$ и $M_{уд}$ — соответственно сила и момент относительно центра масс ударного воздействия; g — ускорение свободного падения; δ_1, δ_2 — углы, задающие положения осей дебалансов (см. рисунок 1).

В работе [5] на основании численного решения системы (1) построена математическая модель динамики ВТМ с независимыми дебалансными вибровозбудителями, позволяющая исследовать все особенности движения вибромашины, включая переходные динамические процессы.

На рисунке 2 приведены расчетные графики, характеризующие пусковые и ударные переходные процессы.

При синхронном движении суммарная фаза вращающихся в разные стороны ВВ остается постоянной. Поэтому о наступлении синхронизации при пуске и после возмуще-

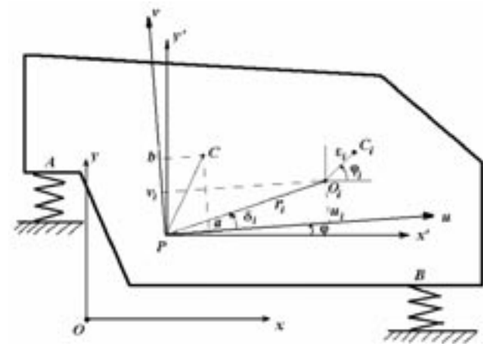


Рисунок 1 — Расчетная схема ВТМ

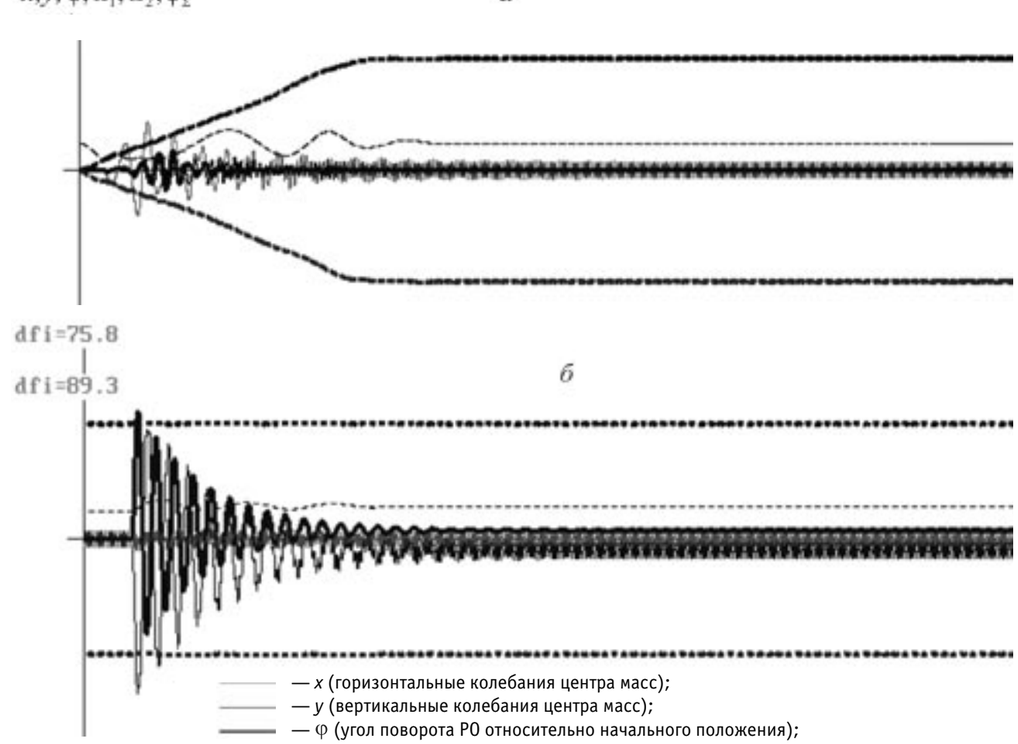


Рисунок 2 — Характерная картина переходных процессов: а — при пуске машины; б — при ударе

ния, вызванного ударом, можно судить по выпрямлению тонкой пунктирной линии, изображающей суммарную фазу вращения ВВ. В работах [2], [4] и [5] исследованы зависимости времени пусковой и послеударной синхронизации от различных физических и геометрических параметров машины.

На рисунке 2б оставлены в левом верхнем углу выданные компьютером значения синхронной суммарной фазы дебалансов в градусах до и после удара. Эти значения снабжены идентификатором *dfi*. До удара значение суммарной фазы было $\varphi_\Sigma = 75{,}8°$, а после удара — $\varphi_\Sigma = 89{,}3°$. Из этого следует, что при данных значениях падающей и колеблющейся массы и при данном положении точки падения синхронизация вращений ВВ наступает при новых значениях суммарной фазы, которым соответствует новое направление вектора колебаний РО.

Это явление известно как адаптивное свойство ВТМ [6]. В работе [5] показано, что адаптивное свойство может при определенных условиях играть отрицательную роль. Изменение направления колебаний РО, происходящее в ходе адаптации к новому положению центра масс, может привести к изменению направления вибрации и ухудшению производительности машины вплоть до полного прекращения транспортировки, и даже к транспортировке в обратную сторону.

Возникает вопрос: во всех ли вариантах взаимного расположения осей ВВ и центра масс машины происходит столь значительное изменение направления вибрации? Иными словами, можно ли, изменяя конструкцию машины, свести к минимуму или совсем устранить данный отрицательный эффект?

Наличие достаточно точной и надежно работающей математической модели, способной описывать нестационарную динамику вибромашины, позволяет ставить и решать как эту, так и многие другие задачи совершенствования конструкции ВТМ. В данной статье предлагается вариант решения этих проблем как задач оптимального проектирования конструкции машины.

ЦЕЛЕВЫЕ ФУНКЦИИ

Не вникая пока в детали того, какие элементы конструкции ВТМ и в какой мере могут быть изменены, сформулируем возможные цели оптимизации. За счет изменения конструкции машины можно минимизировать:

1. Время пусковой синхронизации ВВ машины.
2. Время послеударной синхронизации ВВ (время адаптации после удара).
3. Изменение угла вибрации после удара.

Разумеется, значимость этих целей не одинакова. Более того, достижение одной может противоречить другим. Тем не менее все они заслуживают внимания. Во всяком случае, две последние не только обещают существенное повышение производительности машины, но и кажутся не противоречащими друг другу.

Сформулируем критерии оптимизации (целевые функции), соответствующие каждой из этих трех целей.

Пусть особенности каждой конкретной конструкции вибромашины однозначно определяются некоторым набором параметров $(\pi_1, \dots, \pi_n)$. Мы не конкретизируем пока смысл этих параметров и характер зависимости от них конструкции машины. Будем называть π_i параметрами оптимизации, а вектор

$$\boldsymbol{\pi} = (\pi_1, \dots, \pi_n) \qquad (2)$$

— вектором проектирования. Каждому вектору проектирования $\boldsymbol{\pi}$ соответствует некоторый проект (в нашем случае — конкретная разновидность конструкции вибромашины). На параметры π_i могут, вообще говоря, быть наложены ограничения геометрического, технического, экономического и другого характера, определяющие множество допустимых проектов $\boldsymbol{\Pi}$, так что

$$\boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}. \qquad (3)$$

Зададим целевые функции, соответствующие перечисленным выше направлениям совершенствования конструкции вибромашины. Пусть все параметры, определяющие конструкцию и физические свойства машины (кроме параметров оптимизации), остаются неизменными. В этом случае длительность процесса синхронизации T_c зависит только от параметров оптимизации, т.е. является функцией вектора проектирования

$$T_c = T_c(\pi), \ \boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}. \qquad (4)$$

Длительность процесса послеударной синхронизации T_a при сделанных выше предположениях также является функцией вектора проектирования

$$T_a = T_a(\pi), \ \boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}. \qquad (5)$$

И наконец, изменение угла вибрации после удара, которое равно половине изменения суммарной фазы дебалансов φ_Σ, также является функцией вектора проектирования при неизменных остальных параметрах задачи. Обозначим величину, на которую изменяется угол вибрации после удара, как Ψ. Тогда

$$\Psi = \Psi(\pi), \ \boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}.$$

Значения величин T_c, T_a и Ψ как функций параметров оптимизации определяются из решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений (1). При этом в первом случае используется некоторый стандартный (т.е. один и тот же для всех проектов) набор начальных условий. Будем в дальнейшем такую задачу называть стандартной задачей Коши. Во втором и третьем случаях рассматривается некоторая стандартная задача об ударе, т.е. задача, в которой для всех проектов рассматривается падение одного и того же по массе монолита с одной и той же высоты на одно и то же место РО вибромашины. При этом предполагается, что к моменту удара уже установилось синхронное движение вибровозбудителей.

ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ ВТМ

1. Задача оптимизации конструкции вибромашины с целью уменьшения времени пускового переходного процесса (времени синхронизации) может быть сформулирована следующим образом: определить оптимальный проект, минимизирующий целевую функцию

$$T_c(\boldsymbol{\pi}^0) = \min_{\boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}}, \qquad (7)$$

где $T_c(\boldsymbol{\pi}^0)$ определяется из решения стандартной задачи Коши для системы (1).

2. Задачу оптимизации конструкции вибромашины с целью уменьшения длительности процесса послеударной синхронизации (времени адаптации машины) сформулируем следующим образом: определить оптимальный проект $\boldsymbol{\pi}^0$($\boldsymbol{\pi}^0 \in \boldsymbol{\Pi}$), минимизирующий целевую функцию

$$T_a(\boldsymbol{\pi}^0) = \min_{\boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}}, \qquad (8)$$

где $T_c(\boldsymbol{\pi}^0)$ определяется из решения стандартной задачи об ударе для системы дифференциальных уравнений (1).

3. И наконец, рассмотрим задачу оптимизации конструкции вибромашины с целью уменьшения величины, на которую изменяется угол вибрации после удара. Эта задача может быть сформулирована следующим образом: определить оптимальный проект $\boldsymbol{\pi}^0(\boldsymbol{\pi}^0 \in \boldsymbol{\Pi})$, минимизирующий целевую функцию

$$\left|\Psi(\boldsymbol{\pi}^0)\right| = \min_{\boldsymbol{\pi} \in \boldsymbol{\Pi}}. \qquad (9)$$

И здесь значения функции Ψ ($\boldsymbol{\pi}$) определяются из решения стандартной задачи об ударе для системы дифференциальных уравнений (1).

Для того чтобы конкретизировать задачи (7)–(9), необходимо придать определенный геометрический смысл параметрам оптимизации (2) и множеству допустимых проектов (3).

ПАРАМЕТРЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Какие элементы конструкции вибромашины допускают изменения, которые могут привести к существенному результату с точки зрения поставленных выше целей? К таким элементам в первую очередь относится расположение осей вибровозбудителей на рабочем органе машины, в том числе и их взаимное расположение. В самом общем случае можно рассматривать в качестве параметров проектирования координаты осей дебалансов. Это дает четыре параметра оптимизации:

$$\pi_1 = x_{O_1}; \quad \pi_2 = y_{O_1};$$
$$\pi_3 = x_{O_2}; \quad \pi_4 = y_{O_2}. \qquad (10)$$

Кроме того, в некоторых, правда, весьма ограниченных пределах могут быть подвергнуты изменению положения точек подвески A и B (см. рисунок 1). Координаты этих точек можно рассматривать как еще четыре параметра оптимизации:

$$\pi_5 = x_A; \quad \pi_6 = y_A;$$
$$\pi_7 = x_B; \quad \pi_8 = y_B. \qquad (11)$$

Все координаты в формулах (10) и (11) заданы в системе координат, жестко связанной с рабочим органом вибромашины, т.е. отсчитываются от ее центра масс. Столь высокая размерность вектора проектирования (восемь параметров) не должна вызывать опасений. Во-первых, можно рассматривать задачу только для части параметров (например, только оптимизацию положения осей дебалансов или только оптимизацию положения точек подвески; возможны и другие комбинации части параметров). Во-вторых, далеко не все приведенные в формулах (10) и (11) параметры независимы. Помимо ограничений на их абсолютные величины, они обычно бывают связаны некоторыми соотношениями, позволяющими выражать одни параметры через другие и тем самым уменьшать размерность задачи.

Таким образом, комбинируя постановки (7)–(9) с разными наборами предложенных выше параметров оптимизации (их список может быть расширен), мы получаем целый пучок различных оптимизационных задач. Все они представляют несомненный теоретический интерес, поскольку вопрос зависимости времени самосинхронизации и адаптационных свойств машины от особенностей ее конструкции практически не исследовался. Это последнее соображение позволяет сказать, что любая из этих задач может привести к результату, который будет иметь помимо теоретического и немалое практическое значение. Какие задачи решать в первую очередь, а какие позднее, должны определить практики. Тем не менее приоритетность одной задачи очевидна. Ее численная реализация приведена ниже.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ОСЕЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ НА РО С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ВИБРАЦИИ ПОСЛЕ УДАРА

Традиционное расположение осей ВВ на рабочем органе машины (рисунки 1, 3) сложилось в эпоху преобладания вибрационных машин с жесткой механической связью между вибровозбудителями. Такие машины называют самобалансными. Оба показанных на рисунке 3 варианта расположения вибровозбудителей продиктованы главным образом соображениями удобства установки и обслуживания устройств, обеспечивающих механическую связь между ними.

У значительной части эксплуатируемых сегодня вибромашин с самосинхронизирующимся приводом сохранены такие же варианты расположения вибровозбудителей. Влияние положения осей вибровозбудителей на динамику процессов самосинхронизации вибромашины как после пуска, так и вследствие удара никем прежде не исследовалось. Таким образом, у этих машин положение ВВ определяется не анализом динамики самосинхронизации, а в силу традиции, сложившейся в эпоху машин с другим типом механики.

Будем рассматривать в качестве параметров оптимизации координаты осей дебалансов. Это четыре параметра (10). Решение четырехмерной задачи оптимизации потребовало бы слишком больших вычислительных затрат. Однако в этом нет необходимости, т.к. расположение осей дебалансов на рабочем органе вибромашины не может быть совсем произвольным. Обычно оси ВВ стараются расположить так, чтобы срединный перпендикуляр к отрезку, соединяющему их, проходил одновременно через

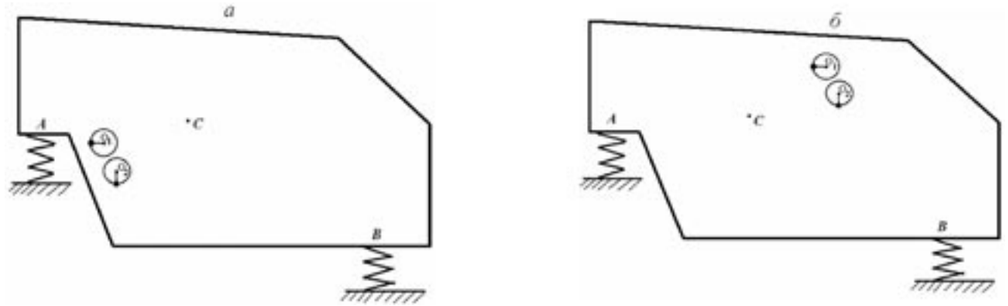


Рисунок 3 — Варианты расположения вибровозбудителей на рабочем органе вибромашины

центр масс машины. Это условие продиктовано рядом инженерных соображений, и имеет смысл его сохранить. В этом случае координаты центров O_1 и O_2 (см. рисунок 3) перестают быть абсолютно независимыми величинами и фактическая размерность задачи становится меньше четырех.

При фиксированном направлении вибрации с учетом симметричности расположения ВВ относительно центра масс положение их центров может быть задано двумя независимыми параметрами. Рассмотрим рисунок 4, на котором изображена схема задания этих параметров. Ось $C\xi$ параллельна направлению вибрации и составляет с горизонталью угол β. Значение параметра ξ задает точку пересечения линии O_1O_2 с осью $C\xi$ ($O_1O_2 \perp C\xi$). Этот параметр может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Параметр η задает расстояние каждого центра дебаланса от оси $C\xi$ (центры симметричны относительно этой оси). Значения этого параметра всегда положительны.

Заданные таким образом параметры ξ и η позволяют исчерпать все технологически целесообразные варианты расположения вибровозбудителей. Перейдем теперь к ограничениям, которые должны быть наложены на всевозможные сочетания значений этих параметров. Эти ограничения в данном случае представляют собой условия невыхода точки O_1 или O_2 за пределы габаритов рабочего органа машины (контурные ограничения).

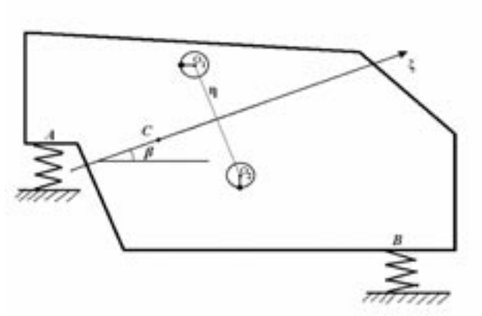


Рисунок 4 — Выбор параметров проектирования

Аналитические выражения для контурных ограничений составить непросто (и выглядели бы они довольно громоздко). Впрочем, при реализации решения задачи программными методами в этом нет необходимости. Проверка соответствия данной пары параметров контурным ограничениям осуществляется путем прямого наложения полученных точек на маску рабочего органа (контуры чертежа). Такая проверка может делаться при генерации каждой новой пары параметров ξ и η и не представляет собой сложной проблемы.

Рассмотрим теперь более подробно задачу оптимизации положения вибровозбудителей на рабочем органе вибромашины с целью минимизации изменения угла вибрации после удара. Эта задача может быть сформулирована с учетом вышесказанного следующим образом. Найти оптимальный проект (ξ^o, η^o), минимизирующий функцию

$$\left|\Psi(\xi^o,\eta^o)\right| = \min_{(\xi,\eta)\in\Pi}, \qquad (12)$$

где значения функции $\Psi(\xi, \eta)$ определяются из решения стандартной задачи об ударе с помощью математической модели динамики вибромашины. При этом каждой паре значений ξ и η из области допустимых проектов $(\xi, \eta) \in \Pi$ соответствует вполне определенное и единственное положение центров вибровозбудителей O_1 и O_2 относительно рабочего органа машины, т.е. относительно точек A, B и C (см. рисунок 1). Выражения для координат этих центров в неподвижной (абсолютной) системе координат, связанной с фундаментом машины, могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_C + \xi\cos\beta - \eta\sin\beta;\\ y_1 &= y_C + \xi\sin\beta + \eta\cos\beta;\\ x_2 &= x_C + \xi\cos\beta + \eta\sin\beta;\\ y_2 &= y_C + \xi\sin\beta - \eta\cos\beta. \end{aligned} \qquad (13)$$

Здесь (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — координаты центров вибровозбудителей; (x_C, y_C) — координаты центра масс рабочего органа машины, β — угол вибрации; ξ и η — значения параметров проектирования (см. рисунок 4).

При численной реализации задачи оптимального проектирования вибромашины использовалась математическая модель динамики ВТМ с геометрическими и физическими параметрами вибромашины ГПТ-3. Угол вибрации β (заданная величина при проектировании машины) был принят равным 30°, что соответствует наиболее распространенному случаю.

На рисунке 5 представлено поле значений целевой функции $\left|\Psi(\xi, \eta)\right|$, дающее наиболее подробную информацию о ее рельефе. Темный полукруг в окрестности начала координат представляет собой область неустойчивой работы модели. На рисунке хорошо видно, что целевая функция в области допустимых значений параметров проектирования многоэкстремальна. Локальные минимумы, заметные в левом и правом краях полукруга допустимых значений, соответствуют положениям осей дебалансов, изображенным на рисунках 3а и 3б.

Вместе с тем на этом рисунке хорошо заметен наименьший (абсолютный) минимум. Область этого минимума представляет собой щель, сильно сжимающуюся по мере приближения к центру масс и становящуюся все более пологой по мере удаления от него. Пологая конфигурация целевой функции в окрестности минимума с практической точки зрения более благоприятна. В этом случае неизбежные неточности в изготовлении рабочего органа машины и вызванная ими неточность в определении положения центра масс не приводят к резкому росту целевой функции. Оптимальная конструкция здесь оказывается более устойчивой к неточностям изготовления.

Рассмотрим теперь задачу о нахождении такого расположения осей ВВ на рабочем органе машины, при котором время перехода на новый режим синхронного движения после удара (время послеударной адаптации T_a) было бы минимальным. Решить эту задачу (после того, как решена предыдущая) уже просто.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ОСЕЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ НА РО С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ВРЕМЕНИ АДАПТАЦИИ ПОСЛЕ УДАРА

Сохранив тот же смысл параметров оптимизации ξ и η, который они имели в предыдущей задаче, мы можем сформулировать задачу отыскания оптимального (в смысле уменьшения времени послеударной адаптации) расположения осей вибровозбудителей следующим образом. Найти оптимальный проект (ξ^o, η^o), минимизирующий функцию

$$T_a(\xi^o,\eta^o) = \min_{(\xi,\eta)\in\Pi}, \qquad (14)$$

где значения функции $T_a(\xi, \eta)$ определяются из решения

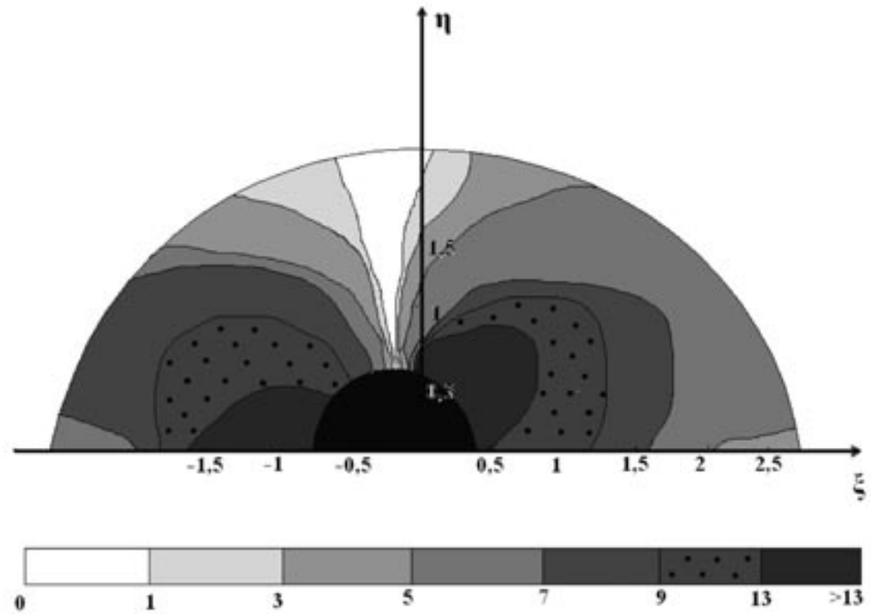


Рисунок 5 — Поле значений функции $\left|\Psi(\xi, \eta)\right|$

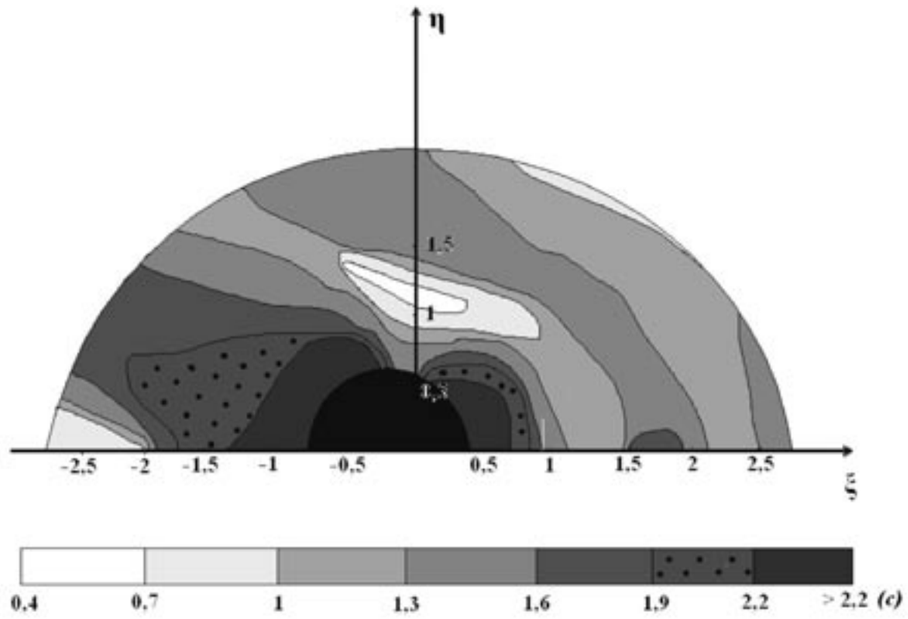


Рисунок 6 — Поле значений функции $T_a(\xi,\eta)$

задачи об ударе с помощью математической модели динамики вибромашины.

Очевидно, что минимальные значения этой функции и функции (12) могут достигаться при различных наборах параметров ξ и η. Особенно интересны возможные пересечения областей минимальных значений в этой и предыдущей задачах, так как они соответствуют конструкции, обладающей одновременно двумя полезными свойствами.

На рисунке 6 показано поле функции $T_a(\xi, \eta)$. Как и в предыдущей задаче, целевая функция имеет несколько минимумов, но расположение их да и весь характер рельефа заметно отличаются от таковых у функции $|\Psi(\xi, \eta)|$.

Окрестность главного (абсолютного) минимума, как и в предыдущей задаче, имеет вид довольно узкой щели, но расположена эта щель, в отличие от первого случая, почти горизонтально.

Весьма примечательным оказывается то, что обе эти щели пересекаются, причем пересечение их происходит в окрестности точки (–0,26; 1,4). Этот факт позволяет рекомендовать конструкцию вибромашины с параметрами расположения осей дебалансов $\xi = -0{,}26$; $\eta = 1{,}4$ как конструкцию, обеспечивающую самую быструю синхронизацию после удара при наименьшем (практически нулевом) изменении угла вибрации. Вид этой оптимальной конструкции показан (схематически) на рисунке 7.

Следует напомнить, что обе задачи оптимизации были численно реализованы для физических и геометрических параметров вибромашины ГПТ-3. Найденные положения вибровозбудителей на РО оптимальны только для этой машины. Для других ВТМ оптимальные решения могут характеризоваться иными числами, но качественная картина оптимальной конструкции не изменится.

Исходя из изложенных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Математическая модель динамики ВТМ с самосинхронизирующимися ВВ не только дает возможность выявить важные закономерности динамики вибромашин при пуске и в послеударный период, но и открывает широкие

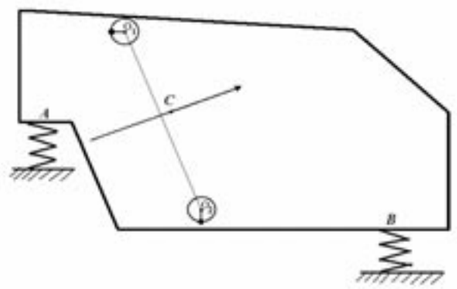


Рисунок 7 — Оптимальное расположение самосинхронизирующихся вибровозбудителей на рабочем органе вибротранспортирующей машины ГПТ-3

перспективы для постановки и решения задач оптимизации конструкции этих машин.

2. Рассмотренные и доведенные до численных результатов задачи оптимизации положения осей вибровозбудителей на РО с целью минимизации изменения угла вибрации после удара и положения осей вибровозбудителей на РО с целью уменьшения времени послеударной адаптации открывают путь для создания новых типов ВТМ с самосинхронизирующимся приводом, обладающих повышенной устойчивостью к ударным воздействиям и перекосам рабочей нагрузки.

3. Применение вибромашин с таким расположением ВВ позволит снизить потери производительности ВТМ из-за снижения скорости транспортировки, связанного с изменением угла вибрации при ударах и перекосах распределенной по рабочей поверхности транспортируемой массы.

Литература

1. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. — М.: Наука, 1971. — 654 с.

2. Румянцев С.А. Моделирование динамики переходных процессов самосинхронизирующихся вибрационных машин // Изв. вузов. Горный журнал. — 2003. — № 6. — С. 111–118.

3. Мальцев В.А., Румянцев С.А., Косолапов А.Н., Юдин А.В. Стабильность фазировки самосинхрозирующихся вибровозбудителей карьерных вибропитателей-грохотов // Обогащение руд. — 2002. — №2. — С. 37–42.

4. Мальцев В.А., Румянцев С.А., Юдин А.В. Особенности проявления адаптационных свойств вибросистем с самосинхронизированным приводом в условиях ударного нагружения // Изв. вузов. Горный журнал. — 2002. — № 6. — С. 68–75.

5. Румянцев С.А. Динамика переходных процессов и самосинхронизация движений вибрационных машин. — Екатеринбург: УрО РАН. — 2003. — 135 с.

6. Косолапов А.Н. Адаптивное свойство колебательной системы с самосинхронизирующимися вибровозбудителями // ДАН СССР. — 1989. — Т. 309. — № 2.



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

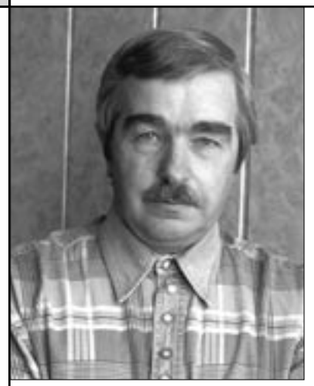
В.Р. АСАДЧЕНКО
РАСЧЕТ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ТОРМОЗОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В учебном пособии даются методики расчета автоматических тормозов, тормозного оборудования и процессов, возникающих при торможении, необходимые как для глубокого их изучения, так и для разработки новых или модернизации существующих тормозных приборов. Сформулированы вопросы для проверки знаний по принципам действия тормозных устройств и систем, а также тесты для самоконтроля. Приведены необходимые справочные данные, позволяющие выполнять требуемые расчеты по вариантам заданий, указанным в таблицах.

Пособие предназначено для студентов специальностей 180700 «Электрический транспорт», 150800 «Вагоны» и 150700 «Локомотивы» железнодорожных вузов, а также для инженерно-технических работников локомотивного и вагонного хозяйств, связанных с эксплуатацией и ремонтом тормозных устройств.

Асадченко В.Р.

ХАРАКТЕРИСТИКА СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕС С РЕЛЬСАМИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ



Асадченко Виталий Романович,
д.т.н., профессор, УрГУПС.

Высокоскоростное движение пассажирских поездов в нашей стране с каждым годом становится все более актуальным и требует скорейшего решения комплекса проблем, в том числе разработки эффективных тормозных устройств нового поколения. К ним относятся дисковые, магниторельсовые, вихретоковые и другие тормоза с применением противоюзных, авторежимных и скоростных регуляторов сил нажатий тормозных колодок, выполненных с использованием современных технологий.

Поскольку основными тормозами, определяющими безопасность движения, в настоящее время и на ближайшую перспективу являются колодочный или дисковый, их главная функция заключается во все большем использовании сил сцепления при наименьшем износе взаимодействующих поверхностей колес и рельсов. Предельные по условиям сцепления зависимости действительного коэффициента нажатия тормозных колодок δ_{max}, например, для авторежимных или скоростных регуляторов можно рассчитать по выражению [1]

$$\delta_{max} = \frac{m_1(dq_o\psi_{\kappa max} - m_v c)\cdot}{2вm_v q_0} +$$

$$+ \frac{\sqrt{(dq_o\psi_{\kappa max} - m_v c)^2 + 4вq_o\psi_{\kappa max} m_v c}}{2вm_v q_0}, \qquad (1)$$

где m_1 — число колодок, действующих на колесную пару;

a, b, c, d, e, f — коэффициенты в обобщенной формуле для определения коэффициента трения колодок:

$$\varphi_к = a\frac{bк + c}{dк + c}\cdot\frac{V + e}{fV + e}, \qquad (2)$$

k — действительная сила нажатия тормозной колодки;

V — скорость движения;

q_o — нагрузка, передаваемая от колесной пары на рельсы;

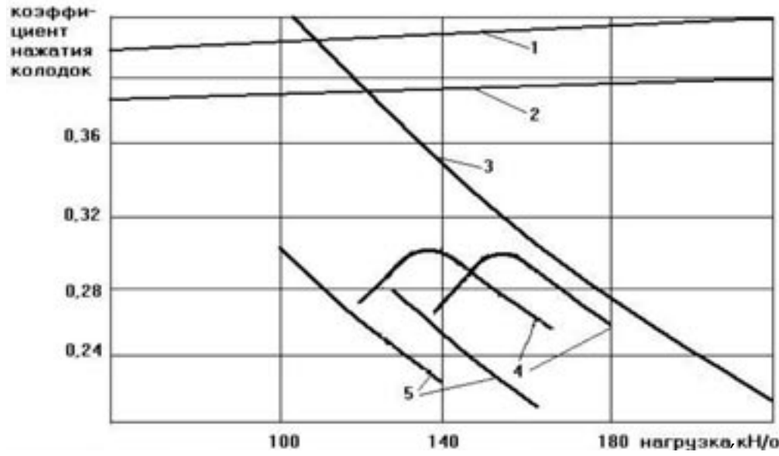
$\Psi_{к\ max}$ — потенциальный (табличный) коэффициент сцепления колес с рельсами;

$m_v = am_1\frac{V + e}{fV + e}$ — скоростной коэффициент.

На рисунке 1 приведены зависимости $\delta^k_{max} = f(q_0)$ для композиционных тормозных колодок, которые позволяют найти эффективные способы изменения тормозного нажатия регуляторами по условиям движения. Здесь же показаны графики действительного коэффициента нажатия δ^k при существующем однорежимном (пассажирском) тормозе, наличии авторежимов, а также ограничение по допускаемым удельным давлениям на тормозную колодку (тепловым режимам).

Как видно, при соответствующей характеристике авторежимных грузовых регуляторов нажатия тормозных колодок можно было бы успешнее использовать имеющееся сцепление между колесом и рельсом и повысить тормозную эффективность без увеличения вероятности входа в состояние юза. Основной проблемой при этом является низкая эксплуатационная надежность таких пневмомеханических устройств, работающих в крайне тяжелых условиях, и недостаточный диапазон измерения загрузки по прогибу рессорного подвешивания.

Для пассажирских вагонов, загрузка которых превышает 25% от веса тары, при наличии источников электропитания целесообразно создать авторежимно-скоростной регулятор электронно-пневматического типа с высоконадежными электрическими датчиками загрузки и скорости движения. При высокой степени использования сцепления таким регулятором, например, в соответствии с приведенными выше зависимостями к нему одновременно должно быть подключено электронное противоюзное устройство для повышения тормозной эффективности при экстренном торможении, в том числе путем использования так называемых адаптивных алгоритмов управления скольжением [1, 2]. Оно, вне зависимости от загрузки, должно устанавливаться на все транспортные средства с дисковым тормозом, имеющим пониженное



1, 2 — максимальные по условиям сцепления соответственно для скоростей 40 и 140 км/ч;
3 — ограничение по тепловым режимам;
4 — реализуемые пассажирскими вагонами с авторежимами;
5 — реализуемые пассажирским подвижным составом без авторежимов.

Рисунок 1 — Расчетные зависимости действительных коэффициентов нажатия композиционных тормозных колодок от нагрузки на колесную пару

сцепление рельсов с колесами из-за отсутствия их нагрева и очистки от посторонних включений.

Для создания совершенных быстродействующих противоюзных регуляторов, у которых функция защиты колесных пар от повреждений является второстепенной и сама собой разумеющейся, но кроме этого и позволяющих управлять их скольжением, вызывая режим постоянного небольшого проскальзывания, для максимальной эффективности тормоза приведенных на рисунке 1 графиков недостаточно. Быстротечный процесс юза развивается в соответствии с другой закономерностью — характеристикой сцепления колес с рельсами при торможении.

Многие исследователи этой зависимости, ссылаясь на одинаковую природу процессов трения-сцепления, а также на идентичность тягового и тормозного режимов, априорно переносят эту закономерность с первого на последний. В то же время и на данный момент не имеется полного математического описания этой характеристики при боксовании, особенно ее обратной ветви.

Процесс взаимодействия колес и рельсов в перемещающемся контактном пятне (иногда двух) трудно поддается исследованию по причине значительной сложности протекающих, в том числе на молекулярном уровне, процессов, проблем использования измерительной аппаратуры при больших удельных давлениях в сотни мегапаскалей и температур, вызывающих плавление металла.

Поэтому наиболее реальным является косвенный способ определения этой характеристики на натуральном оборудовании в эксплуатационных условиях по касательной силе трения $F_{тр}$ тормозных колодок за вычетом силы инерции F_u колесной пары в соответствии с выражением:

$$F_{сц} = F_{тр} - F_и, \qquad (3)$$

где $F_{сц}$ — сила сцепления колес с рельсами.

Несмотря на простоту приведенного выражения, необходимо отметить, что тормозной силой ВТ, замедляющей транспортное средство, является сила сцепления $F_{сц}$, и другим способом ее можно определить через изменение скорости транспортного средства.

Для исследований была разработана методика [3, 4] и создана оригинальная измерительная система [5] с датчиками нормальных и касательных усилий, сигналы которых вместе с давлением в тормозном цилиндре, скоростью движения и нагрузки на колесную пару записывались на бумажный носитель. Поскольку одни и те же опыты приходилось повторять в различных погодных и других условиях, для проверки гипотезы об однородности оценок дисперсий и воспроизводимости эксперимента использовался критерий Кохрэна. Он основан на законе распределения отношения максимальной оценки дисперсии к сумме всех сравниваемых оценок дисперсий

$$G = \frac{\max\{S_i^2\}}{\sum_{i=1}^{n} S_i^2(y)}. \qquad (4)$$

Если полученное значение критерия Кохрэна оказывалось меньше критического, приведенного в таблицах, то гипотеза об однородности выборочных дисперсий соответствовала результатам экспериментов. При отрицательном результате проверки признавалась невоспроизводимость опытов относительно управляемых факторов вследствие дестабилизации, вносимой неуправляемыми, и увеличивалось число параллельных экспериментов.

Кроме того, иногда в этих случаях использовалась модификация метода наименьших квадратов, пригодная при невыполнении предпосылки о воспроизводимости эксперимента. Путем последовательного повышения сте-

пени подбираемого многочлена $y = \sum_{i=1}^{n} a_i x_i$ линеаризованы явно выраженные четыре участка характеристики сцепления (изменение силы или коэффициента сцепления от скорости скольжения) с максимальной относительной погрешностью ± 12%, представленные на рисунке 2.

Анализ полученных процессов показывает, что увеличение скольжения колеса при юзе (процесс его движения за пределами крипа или упругих деформаций) приводит к некоторому росту силы сцепления и инерции, в соответствии с выражением (3), до момента блокирования (остановки) колесной пары. При этом возрастающая сила инерции от максимальной резко снижается до нуля, вызывая ударного характера нагрузки на тормозную систему.

Одновременно происходит падение силы сцепления до уровня скольжения колес по рельсам. Выход из заклиненного состояния возникает после существенного снижения тормозного нажатия в 2 — 3 раза по отношению к вызвавшему юз.

Дифференциальное уравнение, описывающее движение колес в процессе реализации сцепного взаимодействия, в том числе при входе и выходе из состояния юза, имеет следующий вид:

$$\frac{dV_k}{dt} = \frac{R^2}{I}\left[F_{\text{сц}\,\max}(p_n c_k + q_n)(U - \frac{V_0}{h})\right] -$$

$$- \frac{R^2}{I}\left(nk\frac{bk+c}{dk+c}\cdot\frac{V+e}{fV+e}\right), \qquad (5)$$

где R, I — соответственно радиус и момент инерции колесной пары;

$F_{\text{СЦ max}}$ — максимальная сила сцепления, реализуемая колесной парой;

p_n, q_n — коэффициенты прямых четырех аппроксимированных участков характеристики сцепления;

c_k — коэффициент проскальзывания колес по рельсам;

U, h — коэффициенты, определяющие изменение уровня сцепления в зависимости от скорости движения;

V_0 — максимальная скорость движения;

n — число тормозных колодок, действующих на колесную пару.

Представленная характеристика сцепления значительно отличается от аналогичной в режиме тяги при боксовании, особенно своими второй восходящей ветвью и третьей ниспадающей. В этой связи, несмотря на сложность протекающих в пятне контакта колеса и рельса процессов, можно высказать несколько предположений о причинах их различия.

Во-первых, без дополнительных исследований понятно, что тепловые режимы при юзе, особенно с остановкой вращения колеса, значительно интенсивнее, чем при боксовании. Во-вторых, величина относительного скольжения в последнем случае может превышать единицу (100%), а при торможении только достигает этого значения.

Наконец, сила инерции из-за электромеханических взаимодействий в тяговых двигателях не может исчезать скачкообразно и ее знак при развитии и ликвидации боксования изменяется без остановки колеса, в отличие от юза. Значит, переход с прямой на обратную ветвь характеристики сцепления в первом случае должен происходить плавно из одной точки, а во втором — после резкого изменения сил, определяющих ее падающий третий участок, с последующим возвратом по четвертому участку при ликвидации юза.

Известно, что природа сил трения-сцепления имеет двойственный молекулярно-механический (адгезионно-

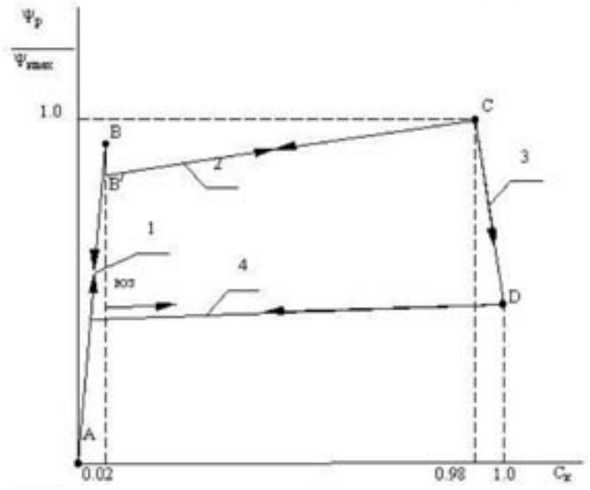


Рисунок 2 — Характеристика сцепления колес с рельсами при торможении

деформационный) характер. До настоящего времени нет определенности о вкладе каждой составляющей в общий процесс, хотя механика явления в общих чертах понятна. С увеличением скорости между двумя трущимися телами механическая составляющая увеличивается, так как растет работа по срезанию выступов и неровностей, а молекулярная падает по той причине, что взаимных молекулярных связей возникает меньше. Это подтверждают опыты с элементарными физическими телами [6].

Таким образом, при входе в юз возрастают и механическая, и молекулярная составляющие, а при выходе из него они обе снижаются. Другая ситуация возникает при боксовании колеса: в начале этого процесса механическая часть силы сцепления возрастает, а молекулярная падает, и наоборот — при выходе из этого состояния. Возможно, этим в том числе и объясняется столь существенная разница между характеристиками сцепления в рассматриваемых режимах.

Практическим подтверждением существования второй восходящей и третьей ниспадающей ветвей характеристики сцепления являются несколько процессов, зафиксированных другими исследователями. Так, например, при рекуперативном торможении реализуются высокие уровни сцепления при стабильном скольжении 10–15% благодаря устойчивости характеристик тяговых двигателей в этом режиме [7]. Значения сцепления при этом достигаются даже большие, чем при фрикционном торможении.

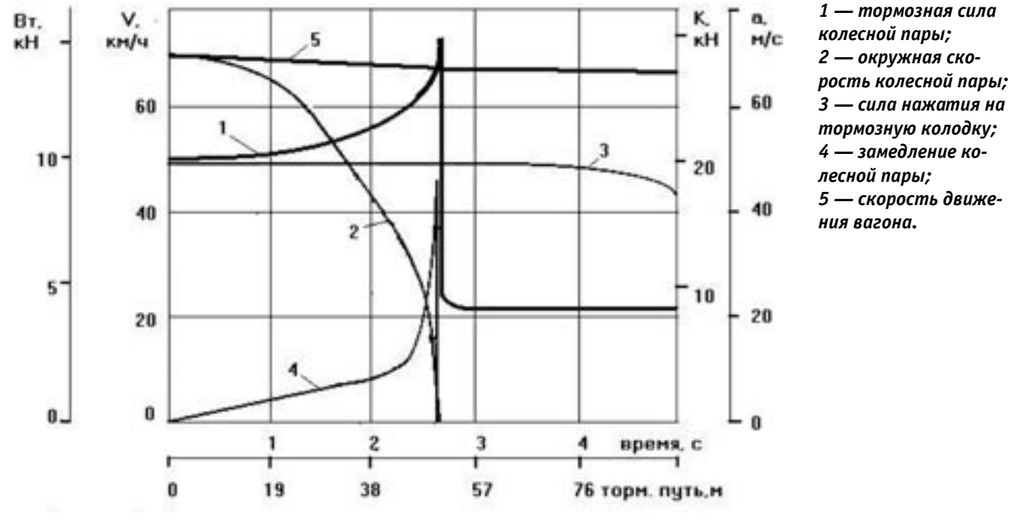
На рисунке 3 приведены результаты опытов по исследованию процессов заклинивания колесных пар, проведенные проф. В.М. Казариновым и Л.А. Вуколовым [8]. Из них видно, что с падением окружной скорости колесной пары до нуля (2-я зависимость) при неизменном нажатии тормозных колодок (линия 3) растет тормозная сила (сила сцепления) (график 1) и замедление колеса (кривая 4), а затем, при его остановке, происходит их резкое снижение.

Особо показательным при этом является то, что в данный момент происходит уменьшение темпа снижения скорости, а значит, замедляющей силы $F_{\text{сц}}$ вагона (линия 5), что подтверждает наличие второй и третьей ветвей представленной характеристики сцепления. Комментируя этот факт, авторы статьи [8] пишут: «Результаты обработки записей процесса заклинивания колесных пар подтвердили известный факт резкого снижения тормозной силы вагона при переходе от качения колеса к скольжению».

Представляют интерес и более ранние опыты Гальтона [9], результаты которых представлены графиками на рисунке 4. На них снижение темпа падения скорости вагона (линия 2) также возникает после остановки и блокирования колеса, которому предшествовал рост тормозной силы (кривая 4). Достраивая этот график линией 5, можно показать падение скорости колеса до нуля за время существования выступа в верхней части зависимости 4.

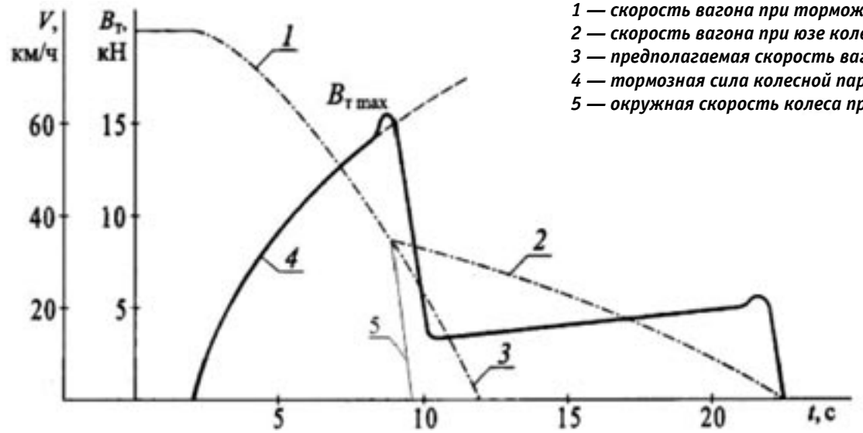
Комментируя эти опыты, проф. Б.Л. Карвацкий пишет: «Через 8 секунд после начала торможения тормозная сила поднялась до величины 1700 кг, что оказалось больше силы сцепления колес с рельсами, ввиду чего началось скольжение. С этого момента тормозная сила немного увеличилась, а затем быстро снизилась до 270 кг, и лишь к концу остановки она возросла до 500 кг. Из этого видно, что благодаря заклиниванию тормозная сила колесного ската уменьшилась более чем на 80%, ввиду чего тормозной путь, конечно, удлинился».

В завершение проведенного анализа хочется отме-



1 — тормозная сила колесной пары;
2 — окружная скорость колесной пары;
3 — сила нажатия на тормозную колодку;
4 — замедление колесной пары;
5 — скорость движения вагона.

Рисунок 3 — Зависимости процессов при входе колесной пары в юз



1 — скорость вагона при торможении;
2 — скорость вагона при юзе колес;
3 — предполагаемая скорость вагона при юзе;
4 — тормозная сила колесной пары;
5 — окружная скорость колеса при юзе.

Рисунок 4 — Диаграммы изменения тормозных характеристик вагона при юзе колесных пар

тить, что актуальность четкого математического описания характеристики сцепления с допустимыми упрощениями при торможении год от года возрастает, так как с ростом скоростей поездов неизбежно придется индивидуально управлять движением каждой колесной пары в поезде для эффективного торможения. Создание таких устройств управления скольжением невозможно без достоверных данных об указанной основополагающей закономерности, представленных выше.

Разумеется, было бы желательно определиться и с характеристикой сцепления при тяговом режиме, особенно с ее обратной ветвью, так как, несмотря на более ранние поиски этой зависимости, в нашей стране ее обычно представляют без цифровых значений, называя «примерной», «классической» или «качественной», а иногда даже в виде нескольких восходящих участков [10].

Видимо, ориентируясь на сравнительно управляемый и фиксируемый процесс боксования, простоту его ликвидации подсыпкой песка и менее неприятные последствия по количеству повреждаемых колес, чем при юзе, а также на безусловную сложность выявления закономерности сцепления, она до настоящего времени для этого режима в полной мере не установлена. Однако рост весовых норм поездов и повышающиеся требования к эффективности перевозок ставят эту задачу на одно из первых мест.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асадченко В.Р. Автоматические тормоза подвижного состава железнодорожного транспорта. — М.: УМК МПС России, 2002. — 128 с.

2. А.с. 1772022. СССР. Способ адаптивного управления колесными тормозами по условиям сцепления антиблокировочной системой / В.Р. Асадченко, В.Г. Иноземцев // БИ. — 1992. — № 40.

3. Асадченко В.Р. Исследование характеристики сцепления колес с рельсами при торможении // Вест. ВНИИЖТ. — 1987 — № 5. — С. 32–34.

4. Асадченко В.Р. Реализация свойств сцепления колес с рельсами при избыточном скольжении в режиме торможения. // Эксплуатация автотормозного оборудования грузового и пассажирского подвижного состава: Сб. науч. тр. / ВНИИЖТ. — 1989. — С. 47–52.

5. А.с. 1646934 СССР. Измерительная система для определения коэффициента сцепления колес с рельсом. В.Р. Асадченко, А.А. Белошевич , А.В. Казаринов // Б.И. — 1990. — № 48.

6. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.

7. Лисунов В.Н. Использование сил взаимодействия движущих колес с рельсами в режимах тяги и торможения: Учебное пособие / ОМИИТ. — Омск, 1994. — 86 с.

8. Казаринов В.М., Вуколов Л.А. Коэффициенты сцепления колес с рельсами при торможении// Исследование автотормозной техники на железных дорогах СССР: Сб. науч. тр/ ВНИИЖТ. — М, 1961. — С. 5–38.

9. Карвацкий Б.Л. Тормоза. — Ч2.— М.: Трансжелдориздат, 1938. — 377 с.

10. Саммэ Г.В. Проблемы сцепления локомотива // Вест. ВНИИЖТ. — 1997. — № 1. — С. 3–47.

Ефимов А.В., Галкин А.Г.

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Контактная сеть (КС) — важная составляющая системы электроснабжения электрических железных дорог. Она одновременно участвует в трех процессах: в изменении технических состояний, в технической эксплуатации, в коммерческой эксплуатации.



Ефимов Александр Васильевич,
профессор, ректор УрГУПС.



Галкин Александр Геннадьевич,
д.т.н., заведующий кафедрой электроснабжения УрГУПС

Цель функционирования КС определяется процессом коммерческой эксплуатации и состоит в передаче электрической энергии от устройств преобразования энергии к подвижному составу с обеспечением токосъема и в защите от аварийных режимов при поддержании заданных показателей качества. В процессе технической эксплуатации принимают участие люди, поэтому КС вместе с обслуживающими ее структурами является эргатической системой.

Всю историю развития КС и соответственно теории и методов ее расчетов можно разбить на три этапа.

Систематические исследования в области теории КС начались в первой половине двадцатого века. Однако значительная сложность КС как объекта исследования и небольшой полигон ее применения ограничивали глубину и результативность этих работ.

Вторым этапом работ можно считать начало второй половины двадцатого века. Массовая электрификация в нашей стране пришлась на 50–60-е годы. Расширялось применение электрифицированного транспорта и в европейских странах, а также в Японии. Столь резкое увеличение полигона КС послужило стимулом интенсификации научных исследований.

Третий (современный) этап развития КС связан у нас в стране с началом внедрения скоростного движения и с тем, что на значительной части полигона КС приблизилась к исчерпанию ресурса. Известная классическая кривая интенсивности отказов имеет три участка. Этап приработки на большинстве участков КС пройден давно (получено одним из авторов). Последние 25–30 лет почти повсеместно состояние КС соответствовало второму этапу нормальной работы. Сегодняшнее состояние таково, что КС на значительной части полигона из-за исчерпания ресурса выходит на третий этап жизненного цикла. Особенность заключается как раз в том, что электрификация проводилась массово. Старение КС и исчерпание ее ресурса происходят теми же темпами и в тех же объемах, что и массовая электрификация. Опыта работы в таких условиях нет ни в одной стране мира.

Железные дороги относятся к объектам, срок службы которых не ограничен. Неограниченность срока службы вступает в противоречие с ограниченными ресурсами отдельных подсистем — пути, локомотивов, системы электроснабжения. Противоречие разрешается за счет смены поколений технических устройств подсистем. Таким образом, три этапа жизненного цикла технических объектов образуют последовательную цепь, или поток событий. Причем для КС проблема смены поколений возникла впервые.

Хозяйства железных дорог в большинстве своем имеют возраст, неоднократно превосходящий срок службы основных технических объектов. Путь, локомотивы существуют более ста лет, их оборудование уже неоднократно достигало исчерпания своего ресурса. Обслуживающий персонал разработал целую систему технического обслуживания и ремонтов, которая позволяет поддерживать надежность и при наступлении третьего этапа, и далеко за ним. КС по сравнению с другими хозяйствами железных дорог является относительно «молодым» объектом. До сих пор еще не было опыта работы со стареющей КС на третьем этапе жизненного цикла. Хозяйство электроснабжения впервые столкнулось с такой проблемой. Весь предыдущий опыт, система технического обслуживания, численность обслуживающего персонала были получены при нахождении КС на этапе нормальной работы, когда, строго говоря, профилактика была не нужна, за исключением, может быть, небольшой группы быстроизнашивающихся объектов. Сейчас ситуация кардинально изменилась (несмотря на сокращение размеров движения, растет число отказов) и требует принятия мер, адекватных сегодняшним реалиям.

Основным направлением в совершенствовании конструкций контактной сети при проектировании новых узлов

и деталей, а также в выполнении проектов перегонов и станций было и остается до сих пор стремление повысить качество токосъема, снизить эксплуатационные расходы и увеличить долговечность контактной сети. Отсюда вытекают требования, в частности, и к отечественным контактным сетям — будь то КС = 200, КС = 160 или любые другие объекты. Прежде всего требуется применять оцинкованные детали (долговечность), точнее регулировать геометрические параметры (токосъем), усиливать изоляцию (снижение трудозатрат на диагностику) и т.д. Этим же объясняются требования выполнения предельных сроков службы отдельных узлов и деталей.

Техническое обслуживание, диагностика также не могут рассматриваться отдельно в качестве «приставных» элементов к существующему объекту. Проектирование контактной сети должно выполняться с учетом последующих этапов жизненного цикла, и прежде всего эксплуатации. К сожалению, до сих пор это выполнялось далеко не всегда. Уже стал хрестоматийным пример того, как не надо делать при проектировании объектов контактной сети — в случае с железобетонными стойками опор. Вначале были спроектированы стойки, склонные к коррозии. Никто при этом не позаботился о том, что делать с корродирующими опорами обслуживающему персоналу на стадии эксплуатации. Потом в спешном порядке были потрачены немалые средства на разработку приборов и алгоритмов диагностирования опор, которые изначально не были приспособлены к диагностике. До сих пор радикальное решение не найдено, несмотря на большое разнообразие средств и методов диагностирования железобетонных стоек опор контактной сети. Все существующие подходы к диагностированию по существу являются «приставными» к не приспособленным для диагностики опорам. Никакой мониторинг, если он не включен в единую систему жизненного цикла контактной сети, не сможет достичь оптимальных показателей. Все указанные направления совершенствования контактной сети, вне всяких сомнений, полезны и улучшают ее свойства.

По нашему мнению, однако, простое количественное улучшение отдельных показателей лишь с небольшой долей вероятности может привести к качественным изменениям. Наиболее эффективным и перспективным будет системный подход к контактной сети как к единому техническому объекту, имеющему свой жизненный цикл. Проектирование, разработка, изготовление, строительство, монтаж, эксплуатация и последующая утилизация должны рассматриваться в неразрывной цепи событий — событий единого жизненного цикла технического объекта. Учитывая, что КС сама по себе не определяет всех процессов, в ней происходящих, обязателен учет всех нагрузок, действующих на нее извне и возникающих в процессе токосъема. Только такой подход может обеспечить не просто рациональные или квазиоптимальные, но действительно оптимальные технические решения.

Проектирование КС традиционно разбивается на две части: проектирование типовых конструкций, узлов и деталей и их привязка к местным условиям. Проектирование новых опорных и поддерживающих конструкций, изоляторов и другой арматуры выходит за рамки данного исследования. Различие местных условий требует либо достаточно широкого типоряда таких конструкций, либо их универсальности. Универсальность может быть достигнута статически, за счет увеличения коэффициентов запаса и габаритов конструкций, либо динамически, за счет регулировок. В любом случае необходимы четко формализованные алгоритмы выбора конструкций и значений их регулируемых параметров, иначе не избежать регулировок «по месту».

Привязка к местным условиям позволяет выбирать различные варианты типов подвески, длин пролетов, числа и мест размещения опорных конструкций, длин анкерных участков, натяжения проводов, схем струн, длины и натяжения рессорного троса, схем размещения электрических соединителей и др. Основная проблема заключается в отсутствии формализованных методов выбора оптимальных проектных решений на основе известных местных условий. Теория проектирования (привязки типовых конструкций) настолько мало разработана, что предусматривает лишь допустимые решения, такие, как допустимая длина пролета, допустимая длина анкерного участка, минимальная несущая способность. Способы оптимизации еще только начинают разрабатываться и относятся в основном к частным показателям.

Стоимость жизненного цикла КС состоит из капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Капитальные затраты состоят из стоимости проектно-изыскательских работ, строительства и монтажа, НИР и разработки типовых проектов. Вопросы финансирования НИР и разработки типовых проектов не есть предмет рассмотрения данного исследования. Эксплуатационные расходы складываются из стоимости профилактических работ и устранения последствий отказов.

Капитальные затраты определяются сметной стоимостью. Стоимость проектно-изыскательских работ обычно составляет от 3 до 5% от сметной стоимости строительства КС.

На этапе выбора проектного решения необходимо учитывать весь жизненный цикл КС — от проектирования до утилизации. Демонтаж необходимо учитывать дважды: на этапе строительства КС по выполненному проекту и по окончании срока службы.

В условиях рыночной экономики само понятие «цена» теряет всякий смысл, т.к. каждый контракт на поставку оборудования и материалов уникален. В этом смысле цену на оборудование и материалы можно рассматривать лишь как некий ориентировочный средний уровень, диктуемый в настоящий момент рынком. Так как состояние рынка зависит от многих случайных факторов, которые с течением времени изменяются, то цену следует рассматривать как случайную функцию со всеми ее параметрами. Подобные же рассуждения можно привести и в отношении стоимости затрат труда, но здесь вариации будут меньше из-за жестких ограничений сметных расценок и малого числа посредников между заказчиками и подрядчиками.

В общем виде капитальные затраты, учитывающие стоимость работ по строительству и монтажу i-й группы однотипных элементов r_i, суммарные коэффициенты, учитывающие все местные особенности производства работ k_{mi} и приобретения и доставки оборудования или материалов i-й группы однотипных элементов k_{ri}, могут быть записаны в матричной форме:

$$К_П = \begin{bmatrix} m_i k_{mi} & r_i k_{ri} \\ \dots\dots\dots\dots & \\ m_n k_{mn} & r_n k_{rn} \end{bmatrix},$$

где m_i — цена материалов или оборудования i-й группы однотипных элементов;

n — число групп элементов проекта.

Эксплуатационные расходы зависят от стоимости управляющего воздействия (УВ), их интенсивности, срока службы КС и включают в себя затраты на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), предоставление окон, материалы. Стоимость и интенсивность УВ определяются прочностью и износостойкостью конструкций КС, действующими нагрузками и принятой системой ТОиР. Амортизационные отчисления определяются по действующим нормам амортизационных фондов. Эксплуатационные расходы (с учетом стоимости аварийных c_{aj} и профилактических c_{nj} УВ для элементов j-го типа) удобно представить в матричной форме, отнеся их ко времени, т.е. в форме удельных расходов,

$$Э = \begin{bmatrix} c_{aj} I_{aj} & c_{nj} I_{nj} \\ \dots\dots\dots\dots & \\ c_{an} I_{an} & c_{nn} I_{nn} \end{bmatrix},$$

где I_{aj} — интенсивность аварийных УВ (может быть принята равной параметру потока отказов группы элементов j-го типа; для ее нахождения можно использовать разработанные модели отказов);

I_{nj} — интенсивность профилактических УВ (может быть найдена с помощью расчета параметров соответствующей стратегии технического обслуживания – СТО).

Стоимость УВ включает в себя оплату труда и налоги, стоимость сырья, материалов и топлива. Из-за накопления повреждений, старения и износа оборудования КС удельные эксплуатационные расходы будут зависеть от наработки.

Число неизвестных в задаче оптимизации параметров КС всегда больше числа уравнений. Оптимальное решение может быть получено для заданного типа подвижного состава, скорости движения, конкретного месторасположения анкерного участка, т.к. в процессе взаимодействия анкерный участок ведет себя как единое целое. Учитывая конечную скорость распространения колебаний вдоль подвески и ее соизмеримость со скоростью движения электрического подвижного состава (ЭПС), можно с полной уверенностью охарактеризовать систему анкерный участок — токоприемники как объект с памятью. Последнее означает, что мгновенное значение силы нажатия на любом токоприемнике зависит не только от приложенных в текущий момент сил, но и от состояния системы в предыдущие моменты времени и величин сил в эти моменты времени. Одним из сильных возмущающих факторов является вход токоприемников в переходной пролет анкерного участка. Параметры этого входа зависят от многих местных особенностей. Поэтому оптимальная регулировка различных анкерных участков, расположенных друг за другом по одному и тому же пути, будет различной (даже для одного и того же типа ЭПС). То, что оптимально в одном случае, не станет таковым в другом. Необходимо учитывать вероятностную природу событий: параметры токоприемников и скорости движения ЭПС, случайный характер внешних нагрузок и разрегулировок. Можно добиться «стохастической» оптимальности, когда оптимальный режим работы (максимальный ресурс, лучшие показатели качества токосъема) будут обеспечиваться для системы в целом с учетом законов распределений случайных величин и функций, описывающих поведение отдельных элементов. Но для каждой отдельной реализации оптимальность может быть никогда не достигнута. Достижение оптимальности можно будет оценить по некоторым интегральным показателям типа накопленного износа контактного провода.

Все существующие проекты и конструкции КС разрабатывались, по существу, эмпирически, привязка типовых проектов к местным условиям выполнялась без учета стоимости жизненного цикла и потребительского эффекта. При выборе оптимального или рационального варианта проектируемой КС может быть два подхода. Задавшись ограничениями на затраты, можно максимизировать коммерческий эффект или, задавшись уровнем коммерческого эффекта, можно минимизировать затраты. КС не только имеет время восстановления, много меньшее, чем время наработки на отказ, но и время строительства и монтажа, намного меньшее срока службы. Для таких объектов оптимизация ТОиР требует учета удельных показателей и критериев (если только цель расчетов — не промежуток времени, соизмеримый с временем сооружения КС). В соответствии с праксеологическим подходом к оценке потребительской эффективности проектных решений можно сказать, что последняя определяется отношением потребительского эффекта (в нашем случае это разница между коммерческим эффектом до и после i-го УВ, т.е. $\Delta П_i = П_i - П_0$) к стоимости жизненного цикла LCC:

$$\varepsilon = \Delta П / LCC.$$

Использование такого критерия возможно только тогда, когда существует детерминированная или хотя бы стохастическая зависимость обоих показателей от параметров проектируемой КС. Сложность решения задачи заключается в слабой степени формализации таких зависимостей. Рассмотрим возможные пути решения указанной проблемы.

Для нахождения потребительского эффекта необходимо знать потребление ресурсов и прибыль, которые характеризуют участок железной дороги до проведения УВ, за исключением всех прочих влияющих факторов (состо-

яние пути или ЭПС и т.д.), не изменяющихся в результате УВ. Потребление ресурсов должно приниматься со знаком минус, прибыль — со знаком плюс. Передача электрической энергии и токосъем сопровождаются безвозвратными потерями электроэнергии и напряжения, в том числе и на борьбу с гололедом. Потери металла контактного провода также безвозвратны, но они учтены в эксплуатационных расходах. Различные сечения проводов, типы подвесок и другие особенности конструкций КС будут допускать разные скорости движения и вес поездов, что отразится на удельных грузообороте и пассажирообороте. Износовые отказы учтены в эксплуатационных расходах, отказы, вызванные превышениями нагрузок над прочностью из-за экстремальных метеоусловий, отказов ЭПС, крушений поездов, наездов техники на опорные конструкции, вандализма, должны учитываться как составляющие коммерческой эксплуатации.

Для того чтобы стало возможным проектирование контактной сети с учетом всего жизненного цикла, необходима разработка моделей всех процессов и объектов, описывающих весь жизненный цикл, и их взаимоувязка в рамках единой модели верхнего уровня. При этом обобщенная модель контактной сети должна строиться по иерархическому уровню.

Цель функционирования контактной сети — передача электрической энергии к потребителю и обеспечение токосъема. КС является эргатической системой, но люди участвуют лишь в процессе технической эксплуатации. Последнее обстоятельство не исключает наличия в системе процесса управления в виде определения способа воздействия и самого воздействия на систему для обеспечения ее работоспособности. Как отмечается в [1], всякое управление — это процесс, включающий в себя получение информации о системе и окружающей среде, выработку решения, проведение УВ и контроль исполнения. КС как система состоит из отдельных элементов.

Понятие системы и элемента относительны [2], в зависимости от целей исследования различные узлы, конструкции и детали КС могут рассматриваться либо в качестве систем, либо в качестве элементов. КС и весь электрифицированный участок имеют иерархическую структуру. Взаимоотношения между отдельными элементами иерархической структуры КС характеризуются как отношения подчиненности и взаимодействия. Отношение подчиненности может означать, что какой-либо элемент является составной частью некоторой системы (подсистемы) или что состояние рассматриваемого элемента (параметры, положение в пространстве) поддается управлению со стороны другого элемента. Отношение взаимодействия подразумевает двухнаправленный обмен сигналами между элементами, например взаимодействие двух подвесок на воздушной стрелке, причем устройства одновременного подъема проводов являются обратной связью между ними. Общее множество взаимодействий между элементами системы и между системой и окружающей средой будем называть [1] процессом функционирования системы, который в соответствии с [3] распадается на два одновременно существующих процесса коммерческой и технической эксплуатации. Еще одной характерной особенностью КС является непрерывное изменение состояния ее элементов и системы в целом. Изменения затрагивают как изменения нагрузок, положения в пространстве, температуру и другие параметры, так и изменение технического состояния системы при накоплении и устранении повреждений. Количественные изменения системы не приводят к изменению ее структуры и могут выражаться в износе, старении отдельных элементов. Качественные изменения наступают при частичных и полных отказах, при проведении УВ по модернизации КС.

КС, как сложная техническая система, характеризуется большим числом элементов, сложными пространственно-временными связями, зависимостью показателей токосъема не только от составляющих КС элементов, но и взаимосвязей между ними. Всего можно рассматривать несколько уровней: весь полигон КС; КС постоянного и переменного тока; организационно — КС в пределах одной дороги; КС в пределах между узловыми станциями; КС станций и перегонов; на станциях — главных и второстепенных путей; анкерный участок; узлы и конструкции; детали и арматура. Первым функционально законченным уровнем иерархической структуры является анкерный участок. На уровне анкерного участка возможна классификация по способам натяжения проводов, по расположению проводов в плане, по типам проводов, по конструкциям подопорных узлов и т.д.

Традиционные методы описания, изучения и формализации КС, при которых основное внимание уделялось описанию свойств отдельных объектов и составляющих их элементов, не позволяют строить адекватные модели системы целиком, отражающие связи КС с окружающей средой, их функции и иерархическую структуру. Именно эти характеристики оказывают решающее влияние на формализацию процесса проектирования. Понятие система и элемент относительны. Один и тот же объект, например, один пролет КС, в зависимости от цели исследования может рассматриваться и как система, и как элемент. Поэтому возникает еще одна дополнительная задача оптимального разбиения КС как сложной системы на элементы с целью автоматизации проектирования.

КС, как и любую техническую систему, можно определить следующими характеристиками:

$$КС = [НГ, ФН, СТ, СФ, ИС],$$

где НГ — связи с окружающей средой, включая климатические и тяговые нагрузки;

ФН — набор выполняемых функций;

СТ — структура КС;

СФ — совокупность структурных и функциональных свойств;

ИС — история функционирования (включая накопление износа разрегулировок, модернизации).

КС как система состоит из ряда компонентов на различных уровнях расчленения, каждый из которых может описываться подобным образом. Для самого нижнего уровня расчленения, называемого обычно базовым, отсутствует структура. Это означает, что объекты базового уровня рассматриваются не как системы, а как элементы.

Для полного описания КС как системы дополнительно необходимы модели каждой из системных характеристик для каждого из n рассматриваемых уровней расчленения. Как отмечается во многих источниках, например в [1], методологически окружающую среду удобно рассматривать как отдельную систему, взаимодействующую с элементами и подсистемами КС. Тогда взаимодействие с окружающей средой можно рассматривать как конфликтующую систему, в которой игра ведется против сил окружающей среды. При этом система «окружающая среда» не имеет целей функционирования, но для ее описания необходима разработка соответствующих моделей нагрузок. Связь с окружающей средой:

$$НГ_i = \bigcup_{j=1}^{m} (Q_{ij}, S_{ij}) \text{ для } i \in 1...n,$$

где m — число уровней расчленения;

Q_{ij} — j-й объект (включая и воздействия окружающей среды) модели взаимодействия с окружающей средой;

S_{ij} — связи (вектор) j-го объекта с другими объектами в модели взаимодействия.

Набор выполняемых функций:

$$ФН_i = \bigcup_{k=1}^{P} (\varphi_{ik} : \{X_k\} \to \{Y_k\}) для\ i \in 1...n,$$

где P — число функций на i-м уровне расчленения;

X_k — множество входов;

Y_k — множество выходов.

Структура:

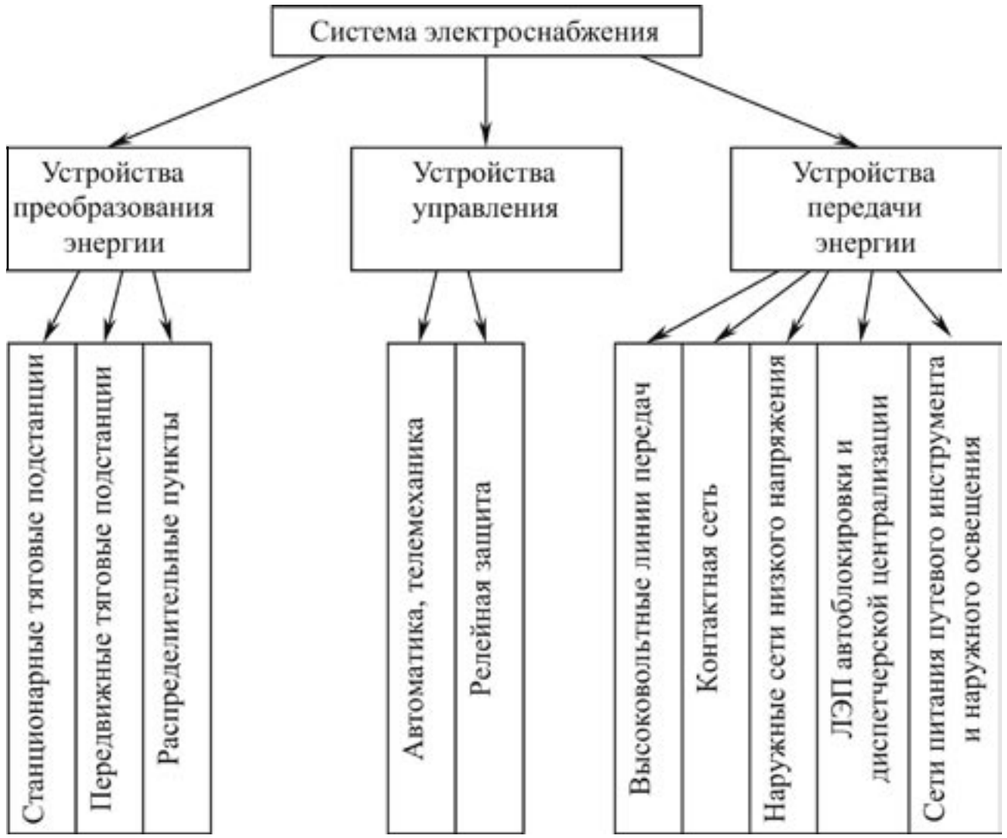


Рисунок 1 — Структурная схема системы электроснабжения

$$\text{СТ}_i = \bigcup_{l=1}^{r} \text{СТ}_{il}(B_{il}, U_{il}) \text{ для } i \in 1...n,$$

где r — число элементов, входящих в объект на i-м уровне расчленения;

B_{il} — l-й элемент.

U_{il} — вектор связей l-го элемента с другими элементами.

История функционирования:

$$\text{ИС}_i = \prod_{f=1}^{z} \text{ИС}_{if} q_{f\,f+1} \text{ для } i \in 1...n,$$

где z — число состояний объекта на i-м уровне расчленения;

$q_{f\,f+1}$ — переход объекта из состояния f в состояние $f+1$ под воздействием процессов деградации или УВ.

Полное описание всех моделей — крупная научная проблема. Ее решение позволит оперировать с КС на всех этапах жизненного цикла, от проектирования до утилизации. Можно сказать, что все исследования, выполнявшиеся до сих пор, и те проблемы, которые решаются отечественными и зарубежными учеными в области КС, сегодня укладываются в рассмотренную модель. Следовательно, нами получено научное обобщение, открывающее системный подход к исследованиям КС. Системный подход к исследованиям КС обладает научной новизной, т.к. ни в одном из опубликованных источников не удалось найти упоминания о системном подходе к КС.

В настоящем исследовании рассматриваются не все составляющие такой системной модели. Ограничение вызвано как очень большими объемами проблемы, так и рамками работы. Понимание системной общности КС позволяет утверждать, что необходимо рассмотреть все составляющие, относящиеся к выбранной области.

В статье [3] рассмотрена структурная схема системы электроснабжения, приведенная на рисунке 1.

КС является относительно обособленной частью системы электроснабжения, связанной с другими ее частями. КС функционально предназначена для передачи электроэнергии к движущемуся ЭПС и обеспечению токосъема. Структурно электрифицированный участок состоит из зон, секций, линий, анкерных участков, пролетов, узлов и т.д. Исследуем связи КС с окружающей средой, к которой отнесем не только климатические воздействия, но также источники и потребителей энергии, обслуживающий персонал. Эти объекты оказывают влияние на КС или зависят от ее состояния и функционирования. Схема связи КС с окружающей средой представлена на рисунке 2.

На входы КС поступает ток от тяговой подстанции, тяговые и климатические нагрузки, управляющие воздействия. С выходов снимаются ток и информация о техническом состоянии. Таким образом, окружающей средой для КС будут тяговая подстанция и другие источники энергии (в частном случае — даже рекуперирующий ЭПС), климатические воздействия и тяговые нагрузки, средства диагностирования и обслуживающий персонал. Математической моделью, как не трудно заметить, может выступать мультиграф, где вершинами являются объекты, а дугами — воздействия. Характер и модель взаимодействия КС с окружающей средой будет изменяться, в зависимости от того, на каком этапе жизненного цикла находится объект. На рисунке 2 показан этап эксплуатации.

При проектировании следует учитывать затраты всего жизненного цикла КС, следовательно, нужна либо динамическая модель, либо набор моделей с правилами перехода между ними.

Целесообразная деятельность КС характеризуется



Рисунок 2 — Схема связи КС с окружающей средой

совокупностью реакций на климатические и тяговые нагрузки, а также на процессы, протекающие внутри системы, которые направляют функционирование на передачу электрической энергии к ЭПС и обеспечение токосъема. Изменение температуры проводов, вызванное внешними и внутренними нагрузками, приводит к изменению длины и натяжения проводов, компенсаторы обеспечивают целесообразную реакцию системы на эти воздействия и стабилизируют натяжение и стрелы провеса.

Функция КС $\varphi_{\text{кс}}$ заключается в передаче электроэнергии E к ЭПС и в обеспечении токосъема T:

$$\varphi_{\text{КС}} : \{E\} \to \{T\}.$$

Функция является сложной и расчленяется на ряд отдельных функций, каждая из которых также может быть сложной функцией. Например, функция опорной конструкции f_{on} состоит в фиксации контактного провода $\varphi_{ф}$, закреплении несущего троса $\varphi_{нт}$, закреплении воздушных линий $\varphi_{вл}$:

$$f_{\text{оп}} : \varphi \to \{\varphi_{\text{ф}}, \varphi_{\text{нт}}, \varphi_{\text{вл}}\}.$$

История КС состоит в накоплении повреждений и износа, разрегулировок, развитии процессов деградации, а также ремонтов, замен и модернизаций отдельных узлов и конструкций. Следовательно, для описания КС необходимы модели накопления повреждений, технического обслуживания и ремонта и др. Историю участка КС можно записать в виде:

$$И = C_{\text{и}} \lambda_1 C_1 \mu_1 C_{\mu 1} \lambda_2 C_2 \mu_2 C_{\mu 2},$$

где $C_{\text{и}}$ — исходное (возможно, исправное) состояние КС;

λ_1 — изменения, накопленные в КС за время первого этапа эксплуатации;

C_1, C_{μ_1} C_{μ_2} — состояния КС после первого периода эксплуатации, ремонта μ_1 и μ_2 соответственно.

КС вместе с окружающей средой образует систему только в том случае, если все составляющие элементы обладают свойством совместимости. Например, уровень изоляции должен соответствовать уровню напряжения, подаваемого в КС, проводимость КС должна соответствовать тяговым нагрузкам, система ТОиР должна парировать накопление повреждений и износ элементов. Можно говорить и о более высоком уровне: затраты на техническую эксплуатацию не должны превышать дохода от коммерческой эксплуатации КС. В этом смысле критерием оптимальности варианта проектного решения будет минимум затрат на совместимость КС с окружающей средой.

Все узлы и элементы внутри КС также должны быть согласованы. Для отдельных узлов и деталей входы и выходы могут не совпадать изначально или приобрести такую особенность со временем. В этом случае должны быть предусмотрены специальные звенья-посредники. Например, при выполнении путевых работ не всегда производится вырезка балласта. Это приводит к тому, что уменьшается высота подвеса контактного провода. Следовательно, в КС должны быть предусмотрены возможности регулировок. Еще один пример: при неравномерном износе проводов и регулировке натяжения проводов в анкерном участке может разрегулироваться стрела провеса. Следовательно, должно быть звено-посредник, позволяющее отрегулировать подвеску. Таким звеном может выступать звеньевая струна. Однако мерная струна КС = 200 в опрессованном зажиме в базовой модификации не допускает регулировки потому, что разработчики КС = 200 не учли рассматриваемый принцип проектирования.

В настоящее время в лаборатории САПР КС кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС на основе изложенных принципов по заданию департамента электрификации ОАО «РЖД» разрабатывается система автоматизированного проектирования контактной сети. Отдельные ее элементы в виде АРМ проектировщика контактной сети прошли опытную эксплуатацию в Трансэлектропроекте (г. Москва) и в настоящее время внедряются не только на сети дорог ОАО «РЖД», но и в зарубежных странах.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Необходимо расширять содержание проектирования контактной сети, с тем, чтобы еще на этапе проектирования не ограничиваться только размерами капитальных затрат, но учитывать весь жизненный цикл объекта.

2. Для наиболее полного учета местных условий и более точной привязки проектных решений к условиям конкретных объектов предлагается от проектирования по нормам переходить к проектированию по моделям объектов и нагрузок.

3. В связи с увеличением скоростей движения подвижного состава, ростом веса поездов необходимо при выборе вариантов проектных решений рассчитывать взаимодействие токоприемников подвижного состава с контактной подвеской — с целью оптимизации их параметров и повышения качества токосъема.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тараканов К.В., Овчаров Л.А., Тырышкин А.Н. Аналитические методы исследования систем. — М.: Сов. радио, 1974. — 240 с.

2. Ефимов А.В., Галкин А.Г. Надежность и диагностика технических систем электроснабжения железных дорог. — М.: УМК МПС России, 2000. — 512 с.

3. Ефимов А.В., Галкин А.Г. Роль информации об отказах в управлении системой электроснабжения электрических железных дорог // Повышение эффективности и надежности устройств электроснабжения: Сб. научн. тр. / МИИТ. — М., 1988. — Вып. 788. — С. 78–84.

Скоробогатов С.М.

УСКОРЕННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ МАССИВНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СООРУЖЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ



Скоробогатов Семен Макеевич,
член-кор. РААСН, засл. деятель науки РФ, д.т.н., профессор УрГУПС

1. ВВЕДЕНИЕ. ПРОБЛЕМЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ СТАРЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

В 1999 г. научно-инженерная строительная общественность отметила 150-летие со времени изобретения железобетона. Хотя на звание родины этого материала претендовали Англия и США, приоритет все-таки следует отдать Франции.

С тех пор построены многие грандиозные сооружения для промышленного, гражданского и железнодорожного строительства. В США насчитывается более 100 небоскребов с монолитным железобетонным каркасом. В Малайзии, в Куала-Лампуре, построены два небоскреба высотой 432 м для нефтяного концерна «Петронас». По данным журнала «Наука и жизнь», 2001 г., № 9, стр. 50, в мире насчитывается 45000 больших плотин. Естественно предположить, что эти самые большие сооружения выполнены из бетона или железобетона. В случае снижения их долговечности и наступления аварийного состояния они представляются экологически, экономически и социально опасными объектами.

Быстрыми темпами растет прочность бетона для изготовления разнообразных, и особенно мостовых, конструкций. Если в начале 60-х годов технологически получаемая прочность бегона составляла 40 МПа, то в 1970 г. — 50 МПа, 1980 г. — 70 МПа, 1990 г. — 100 МПа, 1995 г. — 200 МПа. Прочность так называемого бетона RPC (Reactive powder concrete) может достигать 800 МПа, т.е. 8000 кгс/см^2. Прочность на сжатие американского бетона достигла прочности высокопрочной стали.

В настоящее время в мире ежегодно выпускается более 2 млрд. м^3 бетона и железобетона. Железобетон давно стал доминирующим материалом в железнодорожном строительстве, и поэтому проблема повышения прочности бетона является основной на пути его развития и более широкого применения.

Другой, не менее важной проблемой для строителей является обеспечение долговечности и сохранение старых железобетонных зданий и сооружений. Наступивший XXI век наверняка станет веком обследования и массовой реконструкции старых зданий и сооружений, прослуживших всего несколько десятилетий. Дело в том, что бетон исторически является молодым строительным материалом и поэтому мало изученным с точки зрения перерождения при его старении.

По некоторым литературным данным, в среднем возраст железобетона, работающего на открытом воздухе, составляет 60 лет. Инструкцией МПС этот возраст, иногда не совсем обоснованно, продлен до 70 лет. Указанные цифры не касаются бетона, находящегося в «санаторных» условиях при постоянном микроклимате внутренних помещений.

Многие тысячи инженерных сооружений и мостов уже достигли или достигают предельного возраста по долговечности.

С момента массового строительства зданий и сооружений из железобетона промышленного и гражданского назначения прошло уже 35–50 лет.

Вполне правомерна тревога руководителей железной дороги по поводу неясной перспективы дальнейшей эксплуатации путепроводов и виадуков.

Обоснованы повторные попытки решить судьбу старых сооружений с помощью обследовательских организаций. При этом возникает организационная научно-техническая и методическая проблема ускоренного обследования протяженных и массивных сооружений в неотложных условиях наступления предельного состояния по возрасту.

Перспективные вопросы обследования затрагивают проблему долговечности и изучения неизвестных свойств старого перерожденного бетона.

Обычно долговечность конструкций объясняют морозостойкостью и коррозией арматуры. Однако при этом мало обращают внимания на отрицательное действие карбонизации и других коррозий бетона на арматуру.

Карбонизация защитного слоя бетона — самое распространенное агрессивное воздействие на железобетон, находящийся на открытом воздухе. Углекислый газ, имеющийся в воздухе, взаимодействует с гидратом окиси кальция и едкими щелочами и снижает значение водородного показателя pH жидкой фазы бетона до 11,0 и ниже.

Процесс диффузии углекислого газа в бетоне приводит к потере электрохимической функции защиты бетона, арматура подвергается коррозии. Свойства старого бетона почти не изучены, т.к. старые конструкции только подходят к своему предельному возрасту. Поэтому старый карбонизированный бетон требует непосредственного изучения на пробных образцах, вырезанных из натурной конструкции или сооружения. В результате глубокой диффузии углекислого газа и карбонизации цементного камня бетон становится пористым.

Повышенный доступ кислорода усиливает коррозию арматуры. Продукты коррозии превышают объем основного металла в несколько раз. Они «взрывают» защитный слой бетона, что приводит к выпадению кусков защитного слоя весом 5, 10 и даже 50 кг (на примере путепровода на станции Пермь–1) и недопустимой коррозии арматурных стержней.

Разработанная автором совместно с его коллегами методика ускоренного исследования прочности и трещин при изучении протяженных и массивных сооружений была реализована при обследовании путепровода на станции Пермь–1 и виадука через р.Утку.

Обследование натурных сооружений и реализация разработанной автором методики происходили в условиях неопределенности вследствие отсутствия рабочих чертежей, выяснения не описанного в нормативных документах нового вида предельного состояния по долговечности, ограниченной возможности отбора пробных образцов в условиях эксплуатируемого сооружения.

В условиях ограниченной возможности отбора пробных образцов был применен комплексный подход, при котором прочность бетона определялась несколькими неразрушающими методами: склерометрическим, ультразвуковым и сейсмометрическим. Кроме того, интегральная средняя прочность бетона определялась исходя из статических и динамических испытаний. Были проведены сложные геодезические измерения взаимного пространственного расположения элементов моста и уточнена их геометрия (с помощью лазерных приборов).

Сложные статические расчеты, выполненные с помощью программного комплекса Лира — Windows, были использованы для сопоставления теоретических и опытных прогибов и в конечном счете — для получения интегральной средней прочности бетона.

К существующей нормативной методике расчета, включающей две группы предельных состояний, дополнительно были установлены два состояния: старение бетона вследствие карбонизации и коррозионный износ арматуры. Была составлена специальная методика для определения коррозионного износа стержневой арматуры.

Реализация разработанной автором методики в указанных выше обследованиях закончилась в 2000 г. В этих обследованиях, кроме автора данного отчета как научного руководителя, принимал участие большой коллектив научных работников и инженеров. Среди них: профессор, кандидат технических наук Б.П. Пасынков (динамика); доктор геол.-мин. наук М.М. Мухаметшина (сейсмометрия); доцент, кандидат технических наук Б.Г.Чернявский (геодезия); кандидат хим. наук А.Г. Мохов (химия); ст. науч.сотр. В.В. Бодин (томография); доценты, канд. техн. наук В.М. Янин, Ф.Е. Резницкий, а также инженеры В.Н. Соустин. И.Е. Кочешкова, А.В. Куршпель, А.Х. Ягофаров, О.А. Трофимова и др. Общим руководителем и организатором обследовательских работ был доц., канд. техн. наук Б.Г.Чернявский — декан строительного факультета УрГУПС.

2. СТРАТЕГИЯ УСКОРЕННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ И МАССИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДАВНЕЙ ПОСТРОЙКИ

Известна обширная литература по обследованию конструкций, где приводятся данные по результатам обследований. По признаку методологии они могут быть сведены в три основные группы [1]:

1 — группа методов на основе параметрического подхода (визуальный, контрольно-измерительный и т.д.);

2 — группа методов на основе вероятностной оценки (обработка результатов испытаний);

3 — группа методов на основе прогноза (сравнение результатов разных времен).

Стратегия обследования зависит от общей цели, которая состоит в том, чтобы в результате комплексного изучения дать оценку эксплуатационной пригодности старых железобетонных путепровода и виадука и их грузоподъемности в неотложных условиях действующих магистралей, а также определить целесообразность их реконструкции.

С точки зрения стратегии методы обследования можно свести в четыре группы:

1) методы предварительного ознакомления и осмотра, включающие поиск, изучение и анализ проектно-технической документации, составление карты дефектов, геодезическую съемку, построение градуировочных кривых на пробных образцах и разработку схем для применения сейсмического профилирования и сейсмотомографии;

2) методы пространственного исследования, включающие сейсмометрическое профилирование для протяженных конструкций и сейсмотомографию для массивных сооружений, составление схем для дальнейшего локального исследования;

3) методы локального изучения на отдельных участках протяженного сооружения, включающие склерометрическое и ультразвуковое исследования. В третью группу входит электрохимический анализ для определения водородного показателя цементного камня, наличие потенциала между арматурой и бетоном, обнаружение блуждающих токов и оценка карбонизационного перерождения бетона;

4) методы интегральной жесткости конструктивных элементов для подтверждения адекватности измеренной и реальной прочности, включающие испытание статической и динамической нагрузками. Основание расчетной статической схемы сооружения. Сопоставление результатов статического расчета с экспериментальными данными.

На основе результатов комплексного исследования были подготовлены исходные данные для определения расчетного сопротивления бетона для производства проверочного расчета на прочность.

3. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ВИАДУКА ЧЕРЕЗ РЕКУ УТКУ

Железнодорожный мост на 1575 км, построенный в 1916–1919 г.г. представляет железобетонный шестипролетный виадук через р. Утку. Находясь на главной магистрали, он имеет большое стратегическое значение для обеспечения грузонапряженных перевозок.

Внушительные размеры этого виадука: около 200 м в длину и до 25 м в высоту — ставят его в ряд уникальных объектов инженерно-строительного искусства начала XX века (рисунки 1 и 2). Он достоин сохранения для будущих поколений и, несомненно, представляет памятник архитектуры.



Рисунок 1 — Общий вид виадука с южной стороны



Рисунок 2 — Общий вид виадука с северной стороны

Ореол архитектурной красоты и инженерной безупречности обусловлен тем, что проектирование рассматриваемого виадука, вероятно, осуществлялось на основе технических решений известного и авторитетного отечественного специалиста-мостовика профессора Г. П. Передерия. Прообраз этого виадука уже имел предшественников в виде аналогичных арочных сооружений, но с другими пролетами, построенными в других местах и вполне себя оправдавшими в эксплуатации.

Первое впечатление и беглый осмотр внушительного виадука может создать впечатление высокого качества строительных работ, выполненных давними строителями, надежности, незыблемости в грузоподъемности и долговечности старого сооружения.

Высокое мнение о качестве поддерживается выводами и заключениями из двух известных нам обследований: проектно-изыскательного предприятия «Стройтрест» 1990 г.; НИИ мостов ПИИТа, 1994 г.

На основе ранее проведенных исследований может сложиться предварительная положительная оценка об эксплуатационной пригодности виадука. Однако за прошедшие 5–6 лет, за вершиной предельного срока в 70 лет, произошло резкое ухудшение состояния бетона и арматуры в поверхностных слоях конструктивных элементов сооружения.

Результаты обследования показали, что на подходе к предельному возрасту состояние сооружения может резко ухудшаться за относительно короткий период времени. Кроме того, оценка эксплуатационной пригодности основывалась на средней (интегральной) характеристике прочности материала по всей длине пролета. Испытание под эксплуатационной нормативной нагрузкой всегда дает детерминированный результат, например, прогиб пролетного строения в см или мм. Но при этом прочность наиболее слабого поперечного сечения, по которому возможно разрушение, игнорируется. Поиск наиболее опасного поперечного сечения относится к методике расчета на прочность. Таким образом, при принятых и удобных для эксплуатационников испытаниях перспективные вопросы прочности материала, основанной на вероятностной (стохастической) природе свойств материала, не учитываются.

Оценку эксплуатационной пригодности в детерминированном виде иногда пытались распространить на вероятностную природу прочности. К сожалению, существующие инструкции МПС по осмотру и обследованию мостов реализуют отживший уровень науки и техники. В них не предусматриваются вопросы карбонизации, старения и перерождения бетона и снижения его вязкости, а также вопросы коррозионного износа арматуры.

В проблеме виадука не может не тревожить тот факт, что он достиг возраста более 80 лет при нормативном сроке службы железобетонных железнодорожных мостов 70 лет. Находясь на главной магистрали, виадук обеспечивает интенсивное движение тяжелых и чрезмерно тяжелых железнодорожных составов в осложняющихся условиях.

В связи с этим понятны намерения по созданию вариантов его коренной реконструкции и даже предложение о новом строительстве. Однако эти намерения о дорогостоящих проектах не имеют предшествующего сопровождающего этапа по комплексному обследованию. Поэтому они мало обоснованы и, может быть, отчасти, обусловлены стремлением получить большие инвестиции. Таким образом, возникшая проблема долговечности виадука связана в первую очередь с вероятностной методикой расчета на прочность, с поиском наиболее опасного поперечного сечения вследствие карбонизационного перерождения бетона и коррозионного износа арматуры. Результаты испытаний под эксплуатационной нагрузкой имеют важное, но второстепенное значение. Они служат материалом для локального поиска наиболее слабого пролета, слабого участка бетона для определения величины расчетного сопротивления в расчетах на прочность.

Уже первые результаты осмотра виадука подтвердили наличие отдельных слабых мест в сооружении, не выявленных предыдущими эксплуатационными испытаниями. В первом береговом устое виадука на глубину до 15 см бетон оказался разрушенным. Его марка может быть принята 7 вместо 170. Во многих местах свода (особенно в пяте) защитный слой бетона разрушился, а обнаженная рабочая арматура диаметром 25 мм в основном корродирована на глубину 1 мм, а в некоторых случаях полностью повреждена и исчезла. Состояние других двух внутренних слоев рабочей арматуры в сводах обследовать, к сожалению, не удалось.

Исследование уникального инженерного сооружения потребовало применения комплексного подхода. Поэтому свойства бетона и железобетона планировалось изучить параллельно многими способами: сейсмометрическим, склерометрическим и ультразвуковым. Кроме того, косвенную оценку прочности бетона можно получить, как уже указывалось выше, из статических и динамических испытаний. Результаты натурных испытаний были сопоставлены с результатами глубоких и обширных статических расчетов.

4 ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПУТЕПРОВОДА НА СТАНЦИИ ПЕРМЬ–1

Другой важный исследованный объект — путепровод, расположеный в черте г. Перми по ул. Орджоникидзе, вдоль благоустроенной левобережной набережной р. Камы, где располагается речной вокзал и железнодорожная станция Пермь-1. Он построен над железнодорожными путями и обслуживает поверху автотранспортную магистраль города. Начало строительства путепровода относится к 1898–1989 гг. при строительстве железнодорожной линии Пермь–1 — Котлас под автогужевую нагрузку по нормам 1896 г.

Небольшой пролет путепровода, около 9 м, был вначале перекрыт металлическими клепаными балками двутаврового сечения с шагом 1,6 м. Роль устоев путепровода выполняли параллельные подпорные стенки из каменной кладки, облицованные тесаными камнями из песчаника.

В 1926–1931 гг. путепровод был реконструирован и

существенно расширен с 79 до 110 м. При относительно малом пролете, от 8,68 до 9,66 м, он был по существу превращен в туннель. Во время реконструкции металлические балки были заменены железобетонными монолитными тавровыми балками с полкой вверху. Общее количество балок — 58 шт. Высота поперечного сечения тавровых балок колебалась от 0,75 до 1,10 м. Ширина верхней полки — 1,6 м. Толщина верхней полки — в пределах 0,15–0,20 м. Верхние полки тавровых балок не имели швов омоноличивания между собой. Реконструкция путепровода и смена балок осуществлялась в три очереди. Это отразилось на внешнем виде многочисленных балок.

Несущие узлы путепровода со времен реконструкции (1926–1931 гг.) работали в условиях агрессивной среды (загазованности, увлажнения от верхних грунтовых вод), постоянно действующих динамических нагрузок как от автотранспорта, так и от подвижного состава в течение 70 лет. По экспертным оценкам специалистов, физический износ балок к настоящему времени составляет от 50 до 80% по несущей способности в целом, а отдельные узлы и детали эксплуатируются в стадии предразрушения (рисунки 3, 4). Ригели восточной и западной галерей могут в любой момент вызвать аварию с тяжелыми последствиями. Разрушение бетона в растянутой зоне балок достигло такой степени, что сопровождается выкрашиванием, отрывом и падением на железнодорожные пути бетонных кусков весом до 50 кгс, угрожая безопасности проходящим поездам и обслуживающему персоналу дистанции пути.

Высокая степень износа балок объясняется не только большой загазованностью, но и отсутствием водоотвода и гидроизоляции перекрытия. Повышенная влажность среды, более 70%, способствовала ускорению вредного влияния на бетон — карбонизации.

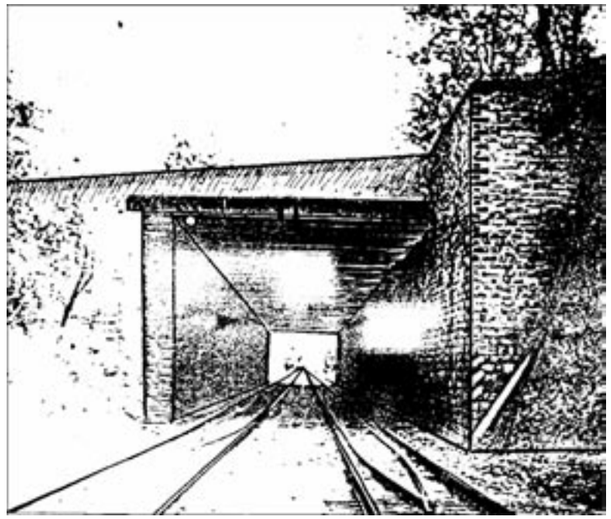


Рисунок 3 — Вход в тоннель путепровода

5. КЛАССИФИКАЦИЯ ТРЕЩИН И ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ПРИМЕРЕ ВИАДУКА ДАВНЕЙ ПОСТРОЙКИ

В качестве методологии для анализа дефектов и повреждений были использованы определения из известных нормативных документов — СНиП 3.06.07-86 [1], инструкций [2, 3], а также других литературных источников.

Результаты анализа трещин приведены ниже в соответствии со следующей классификацией.

Силовые поперечные видимые трещины (a_{crc} > 50 мкм), возникшие от изгиба, наблюдались очень редко, только в наиболее слабом участке шестого пролета. Их редкое появление объясняется излишне большим запасом, заложенным при подборе сечений в процессе проектирования по старым нормам, основанным на элементарных формулах сопротивления материалов и устаревших допускаемых напряжениях. Опорное сечение свода испытывает от внецентренного сжатия напряжение порядка 30 кгс/см^2 по сравнению с проектной маркой 185 кгс/см^2. Максимальное напряжение в арматуре достигает 600 кгс/см^2 по сравнению с расчетным сопротивлением RS = 2000 кгс/см^2.

Смачивание поверхностей элементов виадука отмечалось в обследовании 1990 г. Спустя 10 лет отсутствие организованного водостока усугубило коррозию поверхностных слоев бетона и коррозионный износ арматуры.

Местное, глубокое разрушение бетона вокруг водоотводных трубок — на глубину до 10 см. Причины разрушения описаны выше. Это результат отсутствия организованного водостока и попеременное замораживание и оттаивание.

Высолы на нижних поверхностях свода наблюдаются вследствие систематической протечки воды из трубок и появления продуктов выщелачивания бетона на нижней поверхности всех сводов.

Сколы бетона и отпадение больших кусков поверхностных слоев (весом до 5 кгс) от верха балочного строения и балластного корыта вследствие замачивания и попеременного замораживания и оттаивания. Замечено до 10 кусков бетона, отколовшихся от верхних строений виадука. Это явление не было замечено в обследовании 1990 г., и оно еще раз свидетельствует об ускоренной потере резерва долговечности бетона при наступлении предельного возраста.

По обнаруженным дефектам и повреждениям можно сделать следующие выводы.

Конструкция пролетного строения и опор вследствие 100% коррозии тонкого защитного слоя и обнаженного нижнего ряда рабочей арматуры находится в условиях ускоренной потери резерва долговечности и приближается к аварийному состоянию.

Чаще всего по результатам детальных обследований производится уточнение критериев состояния железобетонных конструкций на основе нормативной методики, включающей две группы предельных состояний.

Определенной классификации существующих методов оценки состояния эксплуатируемых конструкций в настоящее время не имеется [4]. Это вполне объяснимо, если учесть, что старые конструкции приходится оценивать по двум новым предельным состояниям: старению бетона на основе карбонизации цементного камня и коррозионному износу арматуры.

С учетом результатов неразрушающих методов, статического и поверочного расчета можно заключить, что виадук находится в аварийном состоянии и требует усиления и реконструкции.

6. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СТЕПЕНИ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА РАБОЧЕЙ АРМАТУРЫ ПО ШИРИНЕ РАСКРЫТИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН В БЕТОНЕ

Основы оценки коррозионного износа рабочей арматуры даны в статье А.И. Васильева [4], в которой имеется ссылка на обширные эксперименты по изучению разрушения железобетона вследствие коррозии арматуры, проведенные в Мадридском институте строительных наук.

Известно, что точное определение степени коррозии может быть выполнено только путем извлечения образцов арматурных стержней для последующей их предыспытательной подготовки в лабораторных условиях. Потерю массы стержня по сравнению с первоначальной определяют после травления в ингибированной кислоте. Для учета статистического разброса неравномерности коррозии желательно извлечь порядка 10–15 образцов. Известно, что нарушение целостности конструкции в результате извлечения образцов приводит к снижению несущей способности и невозможности применения данного подхода. Количество обнаженных мест на поверхности конструкции в результате откола защитного слоя может быть мало и недостаточно для анализа коррозии арматуры.

Упомянутые выше условия обследования старых железобетонных сооружений заставляют обратиться к косвенным методам исследования с помощью внешних проявлений на поверхности бетона конструкций, т.е. посредством замера ширины раскрытия продольных трещин и толщины защитного слоя бетона. Этот подход позволил приближенно определить степень коррозии продольной арматуры.

7. НОВАЯ МЕТОДИКА УСКОРЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ В МАССИВНОМ И ПРОТЯЖЕННОМ СООРУЖЕНИИ

Поиск наиболее слабого сечения связан с определением характеристики элемента по первому предельному состоянию, т.е. по прочности, но не с определением прогиба. Поиск наиболее слабого сечения в протяженном сооружении является слишком трудоемкой проблемой и практически и экономически вряд ли целесообразен с помощью упомянутых выше методов.

При исследовании протяженных и массивных сооружений экономически целесообразно использовать сейсмометрическую измерительную технику лаборатории горной геофизики и сейсмики Института горного дела РАН (докт. геол.–мин. наук А.М. Мухатшин и ст. научн. сотр. В.В. Бодин) по изучению горных пластов.

Положительный результат при обследовании виадука и путепровода позволяет рекомендовать два следующих метода.

1. Сейсмометрическое профилирование вдоль протяженного сооружения с замером скоростей продольных и поперечных волн.

2. Сейсмотомография поперечных сечений массивного элемента с построением картины изменений равных скоростей продольных волн.

Интерпретация этих двух сейсмометрических методов применительно к прочности и структуре бетона полностью выполнена автором.

Для определения величин скоростей распространения сейсмических волн в конструктивных элементах виадука применялась двенадцатиканальная сейсмостанция «Агат-05».

Сейсмический сигнал распространялся в диапазоне частот от 5 до 4000 гц. Возбуждение колебаний выполнялось ударным способом с использованием металлических молотков массой от 0,3 до 1,5 кг. Сейсмические колебания фиксировались сейсмоприемниками электродинамического типа СВ-1-ЮП и СГ-10, которые крепились к конструктивным элементам.

В целом сплошное сейсмометрическое профилирование дает интегральную оценку по сводам сооружений для определения характеристики по второму предельному состоянию, т.е. по прогибам (жесткости).

Если на протяженной конструкции сейсмоприемники расположить с шагом 4–5 м, то можно по величине скоростей распространения волн получить наиболее слабые участки вдоль продольной оси (рисунок 6). Их можно далее подвергнуть более детальному исследованию с помощью упомянутых выше традиционных методов для поиска наиболее опасного сечения. Это позволило определить прочность протяженной конструкции действительно по наиболее опасному сечению.

Для повышения достоверности оценки сейсмических скоростей производились многократные записи сейсмограмм и определялись средние интервальные периоды времени прихода колебаний.

Было перспективно разработать интерпретацию соотношения поперечных ($Уз$) и продольных ($Ур$) волн для выяснения структуры бетона, т.е. наличия продольных и поперечных микро-, мезо- и макротрещин, что и было сделано.

Результаты применения двух интегральных (сейсмических) методов сопоставлены и подтверждены результатами испытаний сооружения под статической и динамической нагрузками, которые дают также интегральную оценку.

Трудности в применении метода сейсмического профилирования заключались в установлении тарировочной



Рисунок 4 — Корродированные продольные и горизонтальные нижние стержни в балке по оси 40. Защитный слой отсутствует

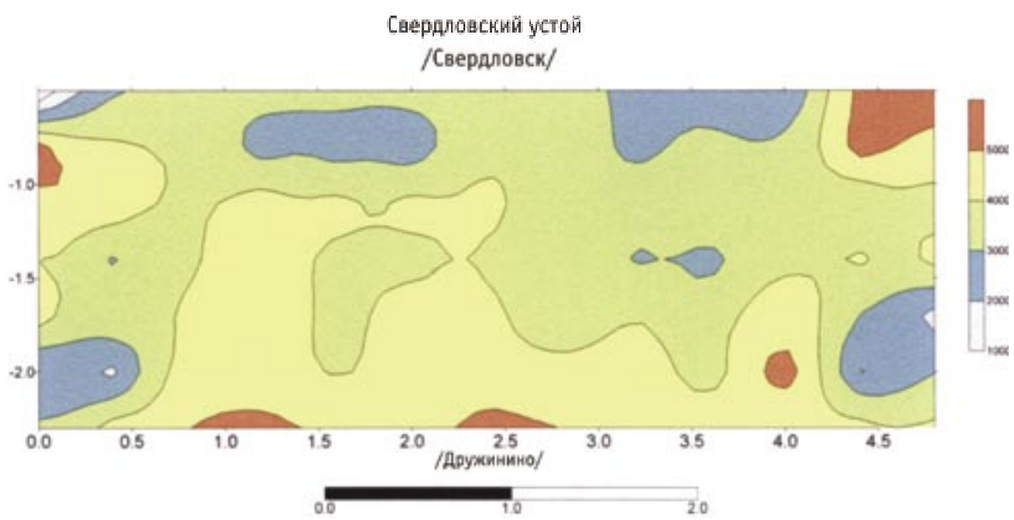


Рисунок 5 — Изолинии скоростей продольных волн (м/с) в поперечном сечении опоры № 7

зависимости (кривой) между скоростью продольных волн и прочностью бетона в натурном сооружении.

Для получения этой тарировочной зависимости из менее напряженных участков виадука и путепровода были вырезаны бетонные образцы — призмы, которые были испытаны по специальной программе.

Проверку адекватности результатов, полученных неразрушающим (сейсмометрическим) методом, осуществляли путем сравнения с результатами, полученными из статических и динамических испытаний.

Синтез результатов различных исследований (статических, динамических, геодезических, сейсмометрических) отдельно по пролетам и по опорам представлен на рисунке 6.

Результаты испытаний статической и динамической нагрузками в основном подтвердили выводы из сейсмических исследований, особенно в отношении наиболее аварийных и опасных пятого и шестого пролетов.

Так, для пятого пролета низкая прочность бетона R = 70; 85 и 120 кгс/см^2 соответственно для участков 0-4, 4-6 и 6-10 подтверждается наименьшими величинами частоты сводных колебаний, логарифмического декремента затухания, частот вынужденных колебаний, скоростей продольных волн, а также наибольшими величинами прогибов, амплитуд свободных колебаний и амплитуд вынужденных колебаний.

Сейсмический способ позволил в недоступных местах с помощью скалолазов произвести замеры скоростей распространения волн для надсводчатых стоек на высоте около 25 м. Из шестидесяти надсводных стоек только в 39 стойках бетон удовлетворяет требованиям прочности R = 180 кгс/см^2. Шестнадцать стоек имеют прочность, R = 45–65 кгс/см^2. Пять стоек находятся в аварийном состоянии, их прочность только R = 45–65 кгс/см^2. Осмотр стоек показал, что почти все они в местах примыкания к сводам или к плите балластного корыта имеют поперечные сквозные трещины отрыва. Эти трещины, скорее всего, результаты низкокачественного бетонирования. Все стойки нуждаются в усилении в случае реконструкции моста.

Неожиданно оказалось, что средние величины прочности бетона из сейсмометрических и статических испытаний в целом по виадуку совпали: R = 182,2 и R = 181,7 кгс/см^2 соответственно. Это говорит в пользу доказательства адекватности примененных методов исследования. Интересно отметить, что средняя величина полученной прочности R = 182,2 кгс/см^2 почти совпадает с проектной R = 185 кгс/см^2, примененной для виадука аналогичного типа (по Г.П. Передерию).

8. ПОПЫТКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ОТНОШЕНИЯ ВЕЛИЧИН СКОРОСТЕЙ ПОПЕРЕЧНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН (V_s/V_p)

Измерение величин скоростей продольных и поперечных волн было произведено на участках длиной 4 м в сводах и на участках длиной 5 м в промежуточных опорах (см. рисунок 6). Надсводчатые стойки прозвучивали полностью по всей их высоте.

По различию в величинах скоростей продольных и поперечных волн все пролеты виадука можно условно разделить на две группы. К первой группе можно отнести три первых пролета, начиная от первого берегового участка. Для них величины скоростей продольных и поперечных волн отличались статистическим постоянством: V_p = 4,005 км/с ± 0,048 и V_s = 2,488 км/с ± 0,039.

Отношение величин скоростей поперечных и продольных волн составило: V_s/V_p = 0,621 ±0,008.

Во вторую группу можно также отнести три пролета: четвертый, пятый и шестой. Для них величины скоростей продольных волн близки между собой, но в целом ниже, чем для первой группы: V_p =3,711 км/с ± 0,060. Это снижение в величинах скоростей небольшое, всего 8%, но падение в прочности бетона, согласно градуировочной кривой, достигает существенной величины — 33%.

Для второй группы сводов отношение величин равно V_s/V_p = 0,559 ± 0,16, т.е. ниже на 10%, чем для первой группы сводов.

Уменьшение величины скоростей поперечных волн составило 20%. Это говорит о том, что в сжатых сводах развились продольные микротрещины, мезотрещины, инициированные главными сжимающими напряжениями, но незамеченные.

Упомянутые соотношения скоростей V_s/V_p=0,621 и 0,559 почти совпадают по величине со второй параметрической точкой по О.Я. Бергу [5]. Вторая параметрическая точка R_T^V/R_B соответствует относительному напряжению в бетоне, при котором возникает лавинное образование микротрещин и их слияние в необратимые мезотрещины, ведущие к нелинейным псевдопластическим деформациям.

О.Я. Бергом предложена следующая формула для подсчета относительных сжимающих напряжений в бетоне:

$$R_T^V/R_B = 0{,}35\ lg\ R_B - 0{,}175, \qquad (1)$$

где R_T^V — уровень развитого микротрещинообразования; R_B — призменная прочность бетона, кгс/см^2.

Относительно высокое отношение V_s/V_p = 0,621 говорит о том, что поперечные волны не встречают на своем пути слишком много продольных микротрещин ($a_{crc} \cong 0{,}1$ мм, а длина порядка $l_{crc} \cong 1$ мм).

Выше предела V_s/V_p = 0,621 микротрещины сливаются в мезотрещины ($a_{crc} \cong 0{,}05$ мм и $l_{crc} \cong 1$ см). На отношение V_s/V_p влияет прочность (класс) бетона. Высокое отношение V_s/V_p = 0,621 характерно для высокопрочных бетонов при R_B > 20 МПа. Однако эта же высокая величина может встретиться и на участках с бетоном с относительно низкой прочностью, например: на участке 18-22 первого пролета и на участке 22-26 второго пролета. Причина заключается в снижении величины скорости продольных волн вследствие наличия поперечных трещин от изгиба и пустот, возникших во время производства работ.

Для первой и второй групп пролетов в соответствии со скоростями продольных волн V_p = 4,005 и 3,711 км/с,

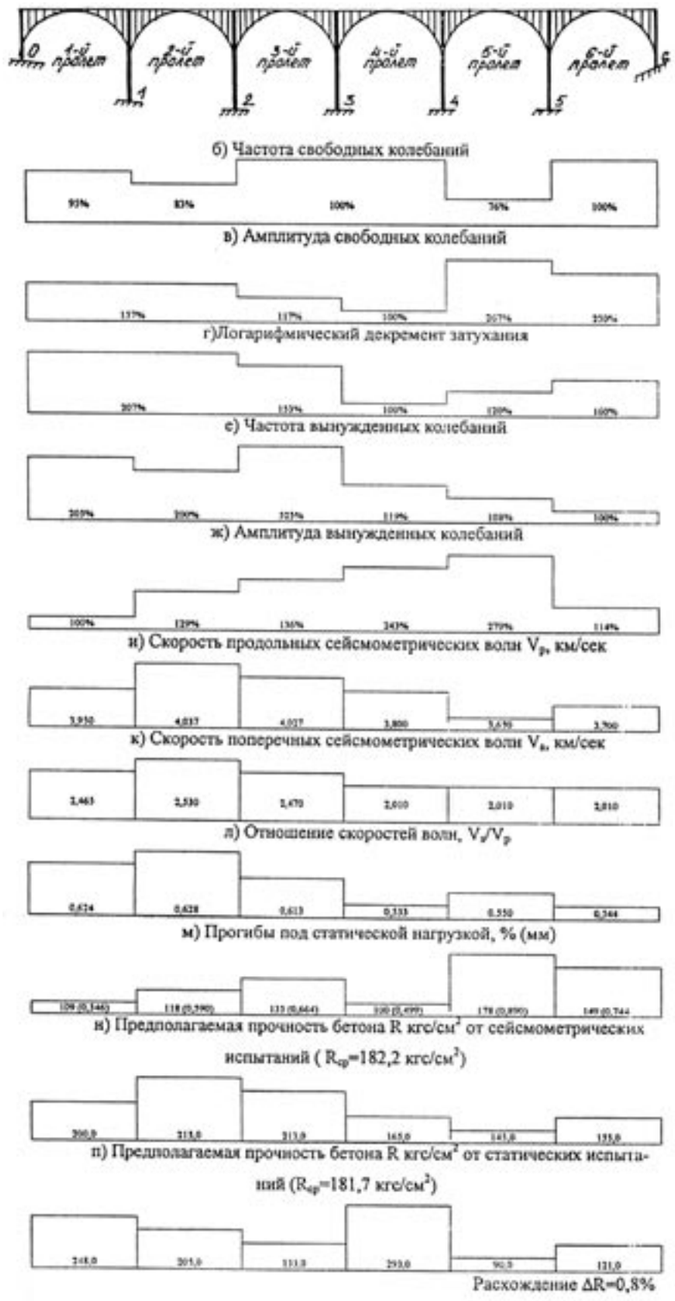


Рисунок 6 — Интегральные прочностные и жесткостные характеристики сводов виадука

средние величины прочности, согласно рисунку 6, равны $R_{куб}$ = 208 и 156 кгс/см².

Для перехода от кубиковой к призменной прочности используем формулу Ю.П. Гущи [6]

$$R_B = (0{,}85 — 0{,}00015 \times R_{куб}),\ кгс/см^2. \qquad (2)$$

Вычисления по формуле (2) дали следующие результаты: R_B = 173 и 129,0 кгс/см². Эти результаты соответствуют второй параметрической точке при R_T^V/R_B = 0,606 и 0,563. Последние дают среднюю величину 0,585, почти совпадающую со средней величиной отношения скоростей сейсмических волн V_s/V_p = 0,559. Различие между величинами R_T^V/R_B и V_s/V_p составляет менее одного процента. Это совпадение представляет определенный научный интерес с точки зрения перспективы развития сейсмометрического метода исследования для анализа напряженного состояния и выяснения прочностной структуры бетона массивных железобетонных конструкций.

С точки зрения продольных волн четвертый свод мало чем отличается от пятого и шестого. Большую жесткость четвертого пролета, по-видимому, можно объяснить благоприятным воздействием обеих примыкающих опор, их наклоном в сторону центра четвертого пролета.

Синтез величин скоростей продольных V_p и поперечных V_s волн и отношение скоростей V_s/V_p показали, что верхние части всех промежуточных опор разбиты динамическим воздействием подвижных составов. Их продольная вертикальная жесткость намного выше вертикальной жесткости сводов посередине пролетов. Это различие в жесткости обуславливает восприятие большего динамического удара на опоры. Прочность бетона в верхних частях опор колеблется в пределах R = 40–65 кгс/см². Судя по высокому соотношению V_s/V_p = 0,628–0,852 верхние части колонн пронизаны продольными вертикальными трещинами.

Что касается бетонов 1-го и 2-го береговых устоев, то их прочности можно определить на картине томографии (рисунок 5). Условная средняя прочность для 1-го устоя может быть принята как R = 100 кгс/см², а для 2-го устоя R = 150 кгс/см². Учитывая их массивность, можно заключить, что прочность их достаточна. Однако поверхностные слои устоев разрушены: в первом устое на 20–25 см и на втором устое — на 2–4 см глубиной. Без применения метода томографии невозможно обследовать массивные конструкции, если их поверхностные слои разрушены.

ВЫВОДЫ

1. Комплекс исследований, включающий сейсмометрическое профилирование протяженных конструкций и сейсмографию массивных сооружений, позволяет решить проблему ускоренного обследования натурных объектов в неотложных условиях наступления предельного возраста эксплуатации и подготовить реальные данные для производства поверочных расчетов на прочность.

2. Сейсмометрическое профилирование не только дает интегральную оценку, но и позволяет выявить наиболее слабые участки конструкции для более детального последующего локального изучения склерометрическим и ультразвуковым методами.

3. Сейсмотомография позволяет получить в поперечном сечении картину изолиний равных скоростей продольных волн и среднюю прочность бетона независимо от наличия разрушения в поверхностном слое.

4. При приближении к предельному возрасту (60–70 лет) эксплуатации для сооружений, работающих на открытом воздухе, характерны ускоренный прирост эрозии бетона и коррозии арматуры за сравнительно короткий промежуток работы (около 5 лет). Поэтому необходимо выяснение наличия карбонизации бетона и степени пассивности арматуры к коррозии. Дополнительно к нормативной методике расчета следует ввести два предельных состояния: эрозию бетона и коррозию арматуры.

5. Для обеспечения адекватности прочности, полученной неразрушающими методами, и реальной прочности пробные образцы необходимо выпиливать от единичного объема бетонирования, за который принимается либо отдельный конструктивный элемент (стойка, плита и т.п.), либо участок между швами бетонирования в протяженной или массивной конструкции.

6. Вследствие неоднородности старого бетона адекватность и правомерность результатов сейсмических, ультразвуковых, склерометрических измерений и прямых испытаний пробных выпиленных образцов должны быть подтверждены величинами прочности, вычисленными из интегральных, суммарных значений жесткости в ходе статических и динамических испытаний.

7. Проведенные комплексные исследования с учетом новых методик применительно к бетону давних сооружений были использованы для составления концепции реконструкции путепровода и виадука.

Литература

1. СНиП 3.06.07-86. Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. — М.: Госстрой СССР, 1987. — 41 с.

2. Инструкция по содержанию искусственных сооружений. — М.: Транспорт, 1999. — 10 с.

3. Инструкция по проведению осмотров мостов и труб на автомобильных дорогах. — ВСН-4-81. — М.: Минавтодор РФ, 1990. — 36 с.

4. Васильев А.И. Оценка коррозионного износа рабочей арматуры в балках пролетных строений автодорожных мостов // Бетон и железобетон. — 2000. — № 2. — С. 20–22.

5. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. — М.: Стройиздат, 1971. — 208 с.

6. Гуща Ю.П., Ларичева И.Ю. Коэффициенты призменной прочности обычного и мелкозернистого бетонов // Бетон железобетон. — 1994. — № 8. — С. 37–38.

ПРАВИЛА НАПИСАНИЯ СТАТЕЙ

1. В редакцию направляется текст статьи с информацией об авторах, шифром УДК, двуязычной аннотацией, списком литературы, графиками, рисунками и таблицами. К тексту прилагается сопроводительное письмо и одна фотография каждого автора в цветном исполнении размером 10х15 см, подписанная простым карандашом на обороте. Фотографии должны быть контрастными, в качестве подложки иметь плотную глянцевую бумагу без заломов и повреждений. В редакцию необходимо прислать распечатку статьи в двух экземплярах (один из экземпляров подписывается всеми авторами, содержит их полные фамилию, имя и отчество, место работы и должность, научные звания, почтовый и электронный адреса и контактные телефоны) и электронный вариант на дискетах 3,5 дюйма CD или ZIP-носителях.

2. Текст статьи объемом не более 12–14 страниц представляется в формате *.doc, *.rtf (Microsoft Word). Формат страницы А4, шрифт Times New Roman Cyr, 14 кегль, полуторный интервал. Все поля по 2 см.

3. Рисунки представляются в оригинале и в электронном виде в форматах *. tiff , * . jpeg (Adobe Photoshop). Рисунки выполняются черной тушью на плотной белой бумаге. Электронные версии рисунков должны быть сохранены с разрешением не менее 300 dpi. Редакция не несет ответственности за возможные искажения информации, представленной только в электронном виде.

4. Схемы и графики представляются в оригинале и в электронном виде в формате *.xls (Microsoft Exel) .

5. Таблицы располагаются непосредственно после абзаца, содержащего упоминание о данной таблице. Все таблицы в тексте необходимо пронумеровать, озаглавить. Кегль внутри таблиц — 11, расположение текста — по ширине, расстановка переносов обязательна, междустрочный интервал одинарный.

6. В тексте статьи отмечаются места расположения дополнительного материала (фотографий, рисунков, графиков и т.д.), представленного в других файлах и в оригинальном виде. На обороте мест расположения дополнительного материала простым карандашом указываются фамилии авторов, номер иллюстрации.

7. Весь материал статьи печатается одноцветным.

8. Каждое наименование в списке литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-84 «Библиографическое описание документа» и должно содержать фамилию автора (инициалы указываются после фамилии), название произведения, место издания (город и издательство), год издания, том, выпуск и страницы. Список должен содержать не более 10 источников. Ссылки на источники даются в тексте в квадратных скобках, в соответствии с нумерацией в списке литературы.

9. Помимо целиком сохраненного в едином файле материала, каждый иллюстративный материал (таблица, рисунок, график, схема) сохраняется ОТДЕЛЬНЫМ ФАЙЛОМ с соответствующим названием.

Научно-технический журнал «Транспорт Урала». Издание зарегистрировано в Уральском территориальном управлениии МПТР РФ. Рег. № ПИ 77-18098 от 1 июня 2004 г.
Адрес редакции: Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66. Тел. (343) 245-31-88, e-mail: VSay@nis.usurt.ru
Учредитель: Уральский государственный университет путей сообщения.
Редакция журнала не несет ответственности за предоставленные рекламные материалы

лазурь ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ

©ИД «Лазурь», 2004, фото на обложку, дизайн, верстка. г. Екатеринбург. Тел.: (343) 213-26-19. www.idlazur.ru
Отпечатано в типографии «Лазурь» (г. Реж). Заказ № 805. Тираж 1000 экз. Подписано в печать 10.06.04