

Моторная тележка облегченной конструкции (проект НЕМВОТ)

Внедрение последних достижений техники на европейской сети железных дорог является обязательным условием увеличения объема перевозок и сокращения сроков доставки грузов. Одновременно с увеличением интенсивности и скорости движения поездов, а также весовых норм важную роль играет повышение надежности доставки грузов и комфортности пассажирских перевозок, а также снижение вредных воздействий железнодорожного транспорта на окружающую среду. Кроме того, в европейских сообщениях все большую роль играет совместимость систем и гибкость использования подвижного состава с целью повышения конкурентоспособности железных дорог на рынке перевозок.

С учетом этих требований 11 компаний в рамках европейского научно-исследовательского проекта НЕМВОТ (High Efficiency Motor Bogie for modern Trains) совместно разработали моторную тележку облегченной конструкции. Ее масса по сравнению с традиционной меньше на 14 %.

Моторная тележка НЕМВОТ предназначалась для эксплуатации на сетях железных дорог Италии (FS) и Германии (DBAG) в пассажирском сообщении со скоростью до 220 км/ч и в грузовом — до 160 км/ч. Ее масса снижена по сравнению с обычной тележкой с 18,3 до 15,3 т благодаря использованию современных компьютерных и экспериментальных технологий, применению облегченных конструкций, новых материалов и различных конструктивных подходов. Оборудованный этими тележками локомотив может использоваться как в пассажирском, так и в грузовом сообщении. Работы (рис. 1) проводились при тесном сотрудничестве предприятий-поставщиков, научно-исследовательских институтов и компаний-перевозчиков.

Этапы решения задачи

Измерения на базовом локомотиве

На базовом локомотиве были проведены измерения вертикальных и боковых сил между колесом и рельсом, а также ускорений в выбранных точках колесной пары и кузова вагона. Эти измерения проводились на различных участках сети FS общей протяженностью 250 км при движении с максимальной

скоростью от 150 до 250 км/ч. Результаты измерений служили, в частности, для определения расчетных нагрузок при проектировании моторной тележки облегченной конструкции, а в дальнейшем использовались для верификации результатов моделирования и в качестве базовых значений при проведении измерений на ней.

Уменьшение массы за счет использования облегченных конструкций

Выбранные компоненты тележки были исследованы с целью определения степени возможного снижения их массы без ухудшения функциональных свойств и прочностных характеристик. Этого нужно было достичь за счет замены материалов или изменения конструкции. Рассматривались такие компоненты, как рама тележки, ось колесной пары, тормозной диск, колесо, редуктор, двигатель, соединения с кузовом вагона, гасители колебаний, системы первичного и вторичного рессорного подвешивания. Институт Фраунхофера в Дармштадте (LBF), специализирующийся на изучении эксплуатационной прочности, выполнил соответствующий анализ с использованием метода конечных элементов (FEM).

Для уменьшения массы в заданных пределах были выбраны следующие мероприятия:

- упрощение конструкции тележки;
- замена стали легкими сплавами (например, для тормозных дисков и корпуса редуктора);
- объединение функций (например, интегрированный, полностью подрессоренный моторно-редукторный блок);
- согласование изначально завышенных параметров компонентов с реальными значениями.

Реализация этих мер позволила уменьшить массу тележки на 3 т. Наибольший выигрыш в массе получен для таких компонентов, как корпус редуктора, тормозные диски, тяговый двигатель и шкворневая балка рамы (табл. 1).

Аналитическое и экспериментальное подтверждение прочности на примере колеса локомотива

При оценке эксплуатационной прочности учитывают все изменяющиеся во времени нагрузки, возникающие в различных условиях эксплуатации.

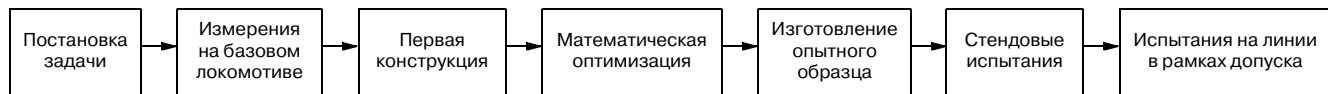


Рис. 1. Этапы разработки тележки НЕМВОТ

Для эксплуатационной прочности железнодорожных колес решающее значение имеют следующие расчетные случаи нагрузки: движение по прямолинейному участку, прохождение стрелочных переводов, вписывание в кривую, а также в отдельных случаях движение с высокой скоростью.

Дополнительно нагрузки могут быть вызваны различными явлениями, обусловленными параметрами системы колесо — рельс, такими, как износ обоих компонентов, обточка колес, возникновение некруглости колес (полигонизация), ползуны и пробоксовины, термические нагрузки, а также наложенные колебания на оси моторных колесных пар. Возникающие при таких расчетных режимах нагрузки на колеса (уровень, частота и распределение во времени) должны быть положены в основу надежного расчета параметров и оценки прочности.

Кроме того, необходимо учитывать редко встречающиеся пиковые нагрузки, обусловленные чрезвычайными происшествиями (например, сход с рельсов), которые могут привести к превышению предела текучести, деформации, а затем и к усталостному разрушению вследствие перераспределения внутренних напряжений.

Нагрузки на колеса, а также их соответствующее статистическое распределение для требуемого расчетного срока службы можно определить на основе измерений, проводимых на подвижном составе в ходе эксплуатации или расчетным путем.

В проекте НЕМВОТ железные дороги Италии проводили измерения только на своей сети, включая горные участки. Из результатов испытаний были получены величины действующих сил (табл. 2), определяющие эксплуатационные нагрузки на колесо локомотива при условии, что его полный пробег должен составить 3 млн. км. Полученные данные в дальнейшем использовали для следующего этапа испытаний, в ходе которых колесо после пробега 30 тыс. км в укороченные сроки должно было достичь такой же степени износа, как при пробеге 3 млн. км. После этого этапа испытаний требуемая эксплуатационная прочность была подтверждена в лабораторных условиях.

Как видно из табл. 2, приведенные в документе МСЖД 510-5 нагрузки, рекомендуемые для выполнения расчетов, применительно к данному случаю являются заниженными. Использование их в расчетах привело бы к значительным негативным последствиям.

В ходе дальнейших исследований на опытной колесной паре НЕМВОТ, изготовленной компанией

Таблица 1

Сравнение массы компонентов тележек, кг

Компоненты тележки	Тележка	
	Базовая (локомотив Е402)	НЕМВОТ
Рама	1880	1850
Оси колесных пар	960	930
Тормозные диски	640	320
Колеса	2680	1960
Корпуса редукторов	2200	1700
Тяговые двигатели	5140	4740
Соединения с кузовом	355	170
Рессорное подвешивание:		
первичное	655	330
вторичное	368	288
Гасители колебаний	140	100
Шкворневая балка	430	255
Передача	175	160
Всего	18 300	15 250

Таблица 2

Расчетные нагрузки

Вид нагрузки для разных режимов движения	Типичная эксплуатационная нагрузка, кН	$n = Q_{\max}/Q_s$ для тележки НЕМВОТ	Измеренная нагрузка, кН	Нагрузка по МСЖД-510-5 для НЕМВОТ, кН
Статическая осевая Q_s	100	—	—	—
Извилистое движение в прямой:	вертикальная	180	1,8	125
	поперечная	± 30	$\pm 0,3$	0
Движение в кривой:	вертикальная	170	1,7	125
	поперечная	100/–20	1/–0,2	70
Движение по стрелочному переводу:	вертикальная	200	2	125
	поперечная	100/–60	1/–0,6	42

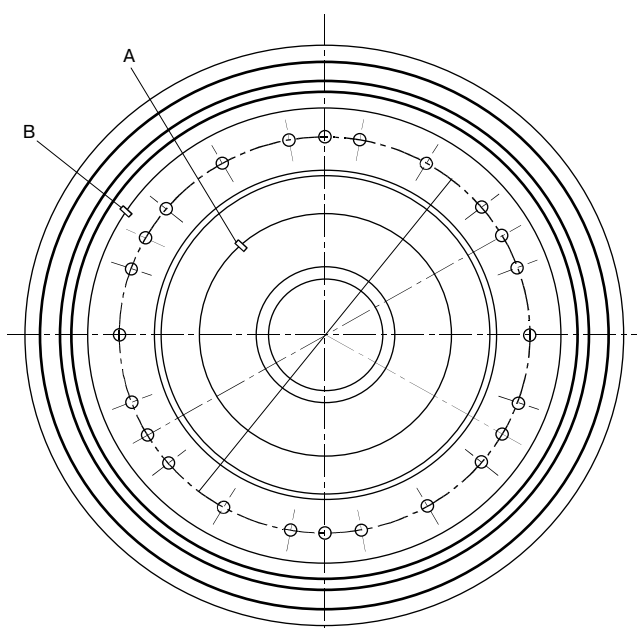


Рис. 2. Расположение тензометрических датчиков в исследуемых точках А и В

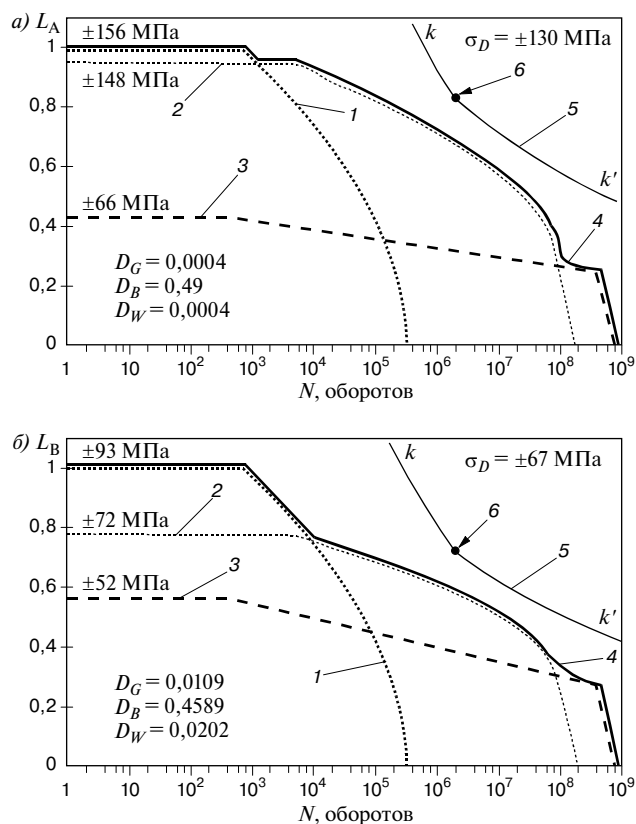


Рис. 3. Расчетные спектры нагрузок:

a — нагрузки для точки А; *б* — нагрузки для точки В; L_A, L_B — амплитуды напряжений в относительных единицах для точек А и В; N — число оборотов; 1 — прохождение по стрелочному переводу; 2 — движение в кривой; 3 — движение по прямолинейному участку; 4 — спектр измеренных нагрузок; 5 — линия Вёлера; 6 — требуемая вибропрочность; k, k' — коэффициенты Вёлера; D_G, D_B, D_W — повреждения для вариантов нагрузок соответственно при движении в прямой, кривой и по стрелочному переводу

Lucchini Sidermeccanica в Италии, с помощью метода конечных элементов были определены локальные напряжения. Полученные величины послужили в качестве основы для проведения компьютерного анализа с целью определения срока службы. При этом связь нагрузки и локальных напряжений была экспериментально проверена и подтверждена на стенде для испытаний колесных пар института LBF.

При выполнении компьютерного анализа цифровая модель колеса «обкатывается», как при испытаниях на катковом стенде. Для полученных максимальных значений различных расчетных режимов нагружения можно соответственно вывести их статистическое распределение применительно к любой точке колеса. Соответствующие расчетные спектры представляют собой основу для оценки его прочности, оптимизации конструкции и подтверждения эксплуатационного предела выносливости.

Вследствие различного локального воздействия расчетных случаев нагрузки и в зависимости от рассматриваемой зоны колеса (рис. 2) получают разные формы нагрузочных спектров. В данном примере, анализируя кривые (рис. 3, *a* и *б*), можно увидеть, что расчетный спектр для позиции А (диск колеса) является более «выпуклым», чем для позиции В (бандаж колеса). Это вызвано более высоким по сравнению с другими расчетными режимами нагружения максимальным значением случайной величины в выборке для режима движения в кривой в зоне точки А (см. рис. 2, *a*). Отсюда следует, что к материалу диска и точности изготовления должны предъявляться повышенные требования. Путем оптимизации критических зон можно добиться более высокого качества конструкции в целом.

Вследствие больших перепадов напряжений в колесах, а также циклических изменений напряженно-состояния по всем осям наклон кривой усталости k (линии Вёлера) этого элемента конструкции будет лежать в пределах от 4,5 до 6 в зависимости от материала и уровня напряжений. В связи с этим в процессе конструирования следует следить за тем, чтобы из-за пиковых нагрузок и особых режимов нагружения не превышался условный предел текучести материала детали.

С помощью компьютерного или экспериментального анализа напряжений можно во многих случаях уже на ранней стадии проектирования выполнить точный расчет конструкции колеса с учетом влияния износа, изменения системных параметров и условий окружающей среды.

На рис. 4 дано сравнение амплитуды напряжений для точек А и В при различных расчетных режимах нагружения (сопоставление результатов компьютерного и экспериментального анализа напряжений). Полученные результаты в значительной степени совпадают.

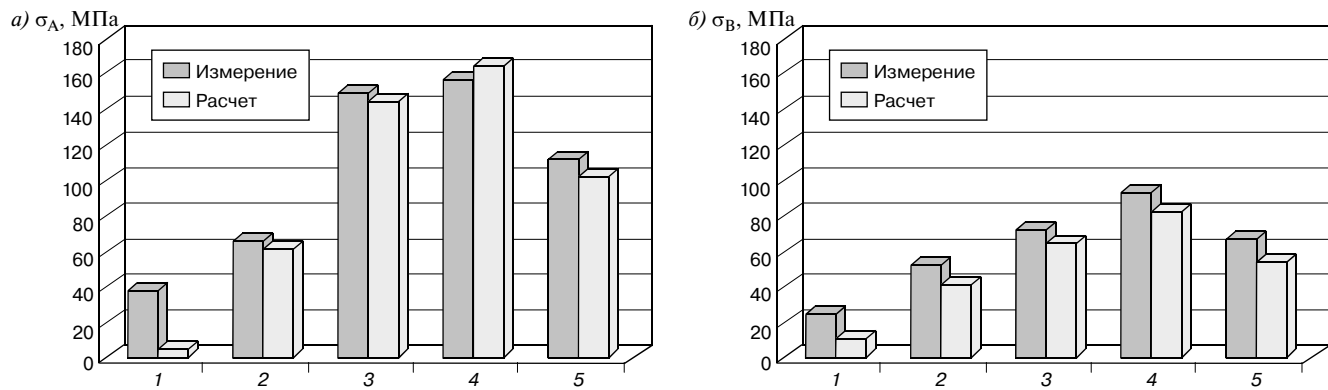


Рис. 4. Сравнение измеренных и расчетных напряженных состояний в точках А и В:

а — сравнение напряжений в точке А; б — то же, в точке В; σ_A, σ_B — напряжения соответственно в точках А и В; 1 — статическая нагрузка; 2 — движение на прямолинейном участке; 3 — движение в кривой; 4 — проезд по стрелочному переводу; 5 — расчетная вибропрочность

Если с помощью предварительной оценки, осуществляемой путем последовательной оптимизации, можно определить срок службы колеса, то экспериментальный метод позволяет получить подтверждение эксплуатационной прочности, которая является составляющей такого параметра, как надежность. При этом может обнаружиться не учтенное при расчетах влияние на прочность и надежность условий производства, которые в свою очередь также влияют на срок службы.

Экспериментальное подтверждение эксплуатационного предела прочности

Для надежного определения предела прочности при эксплуатационном режиме нагружения необходимо в качестве важнейшего требования обеспечить в условиях стендовых испытаний реальную деформацию колеса, т. е. аналогичную той, которая возникает в условиях эксплуатации. Кроме того, должны быть смоделированы все упоминавшиеся ранее расчетные режимы нагружения с соответствующей корреляцией отдельных нагрузок. В заключение необходима программа испытаний, в которой должны быть реализованы:

- максимально возможное уменьшение длительности испытаний;
- эквивалентность условиям эксплуатации (с точки зрения повреждений) и близкое к условиям эксплуатации чередование нагрузочных циклов.

В случае применения упрощенных методов испытаний, используемых для обычных стальных колес, эти требования почти не соблюдаются, и многие зоны колес остаются недоступными для контроля.

При использовании новых методов конструирования, базирующихся, например, на применении бандажных колес с резиновыми амортизаторами или колес из легких сплавов, а также предусматривающих новые способы изготовления, высокие центробежные силы и частота вращения могут привести к ослаблению некоторых соединений и вызвать повышенный износ контактных поверхностей.

На специально разработанном испытательном стенде обеспечиваются уже упоминавшиеся требования максимального снижения длительности испытаний и обеспечения условий их проведения, аналогичных эксплуатационным. Здесь можно моделировать такие режимы, как следование по прямолинейному участку со скоростью до 350 км/ч, движение в кривой и прохождение по стрелочному переводу. Благодаря этому может быть проведена быстрая и точная проверка новых вариантов конструкций и способов их изготовления, а также новых материалов.

Для локомотивного колеса НЕМВОТ разработана программа испытаний, учитывающая указанные расчетные режимы нагружения. Длина выбранного для моделирования участка составила 300 км. В результате реализуемого программой 100-кратного прохождения поезда по этому участку обеспечивается общий пробег 30 тыс. км. В этой программе были предусмотрены все основные факторы возникновения повреждений, такие, как высокие пиковые нагрузки на стрелочных переводах, могущие вызвать пластические деформации; переменные напряжения при прохождении кривой и следовании по прямолинейному участку; большое число нагрузочных циклов, способствующих образованию фрикционной коррозии; воздействия средних нагрузок, связанные с возникновением центробежных сил.

Полученные в ходе натурных испытаний повреждения при экспериментальном спектре нагрузок приблизительно соответствуют повреждениям расчетного спектра (рис. 5). Требования к испытаниям были повышены в связи с эквивалентностью повреждений для расчетного срока службы с пробегом $3 \cdot 10^6$ км и с учетом статистической оценки при проведении испытаний в меньшем объеме, в данном случае при $L > 30\,000$ км.

Оценка эксплуатационной прочности выполнялась с помощью трех (как минимум) испытаний, причем одно из них проводилось на более длинном (на 50 %) опытном участке и предназначалось для

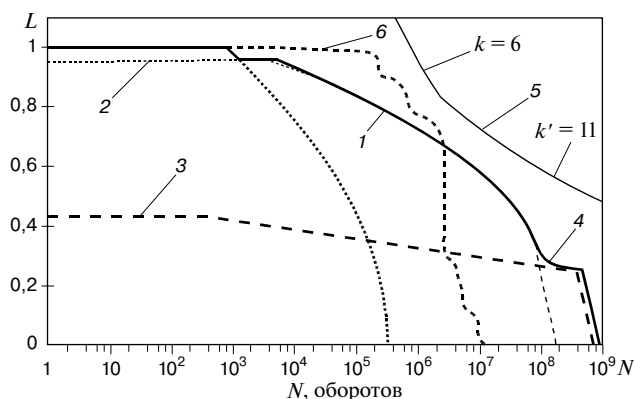


Рис. 5. Расчетные (пробег $3 \cdot 10^6$ км) и измеренные (пробег $3 \cdot 10^4$ км) спектры нагрузок колеса локомотива:
 1, 2, 3 — обозначение позиций, как на рис. 3; 4 — спектр измеренных нагрузок для пробега $3 \cdot 10^6$ км; 5 — фиктивная линия Вёлера; 6 — измеренные значения для пробега 30 тыс. км; L — амплитуда напряжений в относительных единицах; N — число оборотов

определения резервов колеса, контроля и регистрации сверхнормативного развития усталостных трещин. На основании результатов этих испытаний были составлены рекомендации по контролю качества и другим проверкам. В сочетании этих данных с результатами неразрушающих испытаний, например ультразвуковой дефектоскопии, можно определить допустимые погрешности в различных зонах колеса.

Нагрузочные программы можно адаптировать к любой трассе железнодорожной линии, причем эксплуатационные нагрузки можно определить не только на основе накопленных в эксплуатации статистических данных, но преимущественно на основе результатов измерений. Такая адаптация выполняется на базе многоэлементной модели.

Оптимизация первичного и вторичного рессорного подвешивания с помощью многоэлементной модели

В качестве базы для расчета реакций подвижного состава, воздействующих на путь, институт LBF разработал многоэлементную модель, представляющую собой систему многих тел и адаптированную к характеристикам и особенностям моторной тележки облегченной конструкции. Для компьютерного моделирования были необходимы реальные данные о состоянии линии. При этом для прямолинейных отрезков, кривых и стрелочных переводов были определены и заданы в модели возможные погрешности поло-

жения пути. Величина моделируемых погрешностей косвенно зависит от скорости движения подвижного состава, так как, например, на высокоскоростных железнодорожных линиях допускаются лишь незначительные отклонения от заданного положения. С помощью такого моделирования было исследовано влияние показателей жесткости и демпфирования систем первичного и вторичного рессорного подвешивания новой моторной тележки облегченной конструкции и затем в соответствии с документами МСЖД 518 и 513Е проанализировано с точки зрения:

- безопасности движения;
- усталостной прочности рельсов;
- плавности хода.

Посредством вариаций этих параметров удалось оптимизировать показатели жесткости и демпфирования элементов тележки. Соответствие реальных значений жесткости заданным величинам проверено и подтверждено в ходе испытаний опытного образца тележки на стенде.

Для компьютерного моделирования движения тележки в кривой потребовались (согласно МСЖД 518) все комбинации следующих параметров:

- скорость движения;
- недостаток возвышения рельса;
- радиус кривой.

Это позволяет моделировать самые неблагоприятные условия. Если подвижной состав предназначен для международного сообщения, необходимо проведение его испытаний на пути с подуклонкой рельсов 1:20 и 1:40. В соответствии с документом МСЖД 518, предписывающим применение методов моделирования, был сконструирован испытательный участок с погрешностями положения пути. Для учета отклонений, встречающихся в действительности, недостаток возвышения рельса варьировался от -25 до $+10$ %. Это показано в табл. 3, составленной для случаев прохождения кривой радиусом 250 м со скоростью 80 км/ч.

Для расчета реакций экипажа в пути, в данном случае локомотива с тележками НЕМВОТ, была разработана многоэлементная модель, состоящая из четырех колесных пар, двух рам тележек и кузова. Параллельно соединенные линейные рессоры и нелинейные демпферные элементы служат для описания первичного и вторичного рессорного подвешивания.

Особый интерес представляло моделирование демпферов разворота. Оно было реализовано с помощью последовательно соединенных упругого эластомерного и демпферного элементов. Условия в контакте колесо — рельс оказывают значительное влияние на динамику движения рельсового подвижного состава. При моделировании описание этой зоны давалось для линейных исследований через эквивалентную конусность, а для нелинейных использовали упрощенную нелинейную теорию Калкера.

Таблица 3

Данные для математического моделирования движения в кривой

Длина переходной кривой, м	Недостаток возвышения, м	Некомпенсированное ускорение, м/с ²
45	0,1125	1,23
	0,15	0,99
	0,165	0,89

При исследованиях с помощью методов моделирования сначала были изучены модальные характеристики (собственные состояния и собственные частоты) постепенно расширяющейся структуры модели с различными параметрами тележек и пути. На следующем этапе в исследования включили погрешности положения пути. В результате получили параметры для расчета различных компонентов и данные для экспертной оценки безопасности движения, степени нагружения пути и динамики исследуемого локомотива.

Для оценки безопасности движения, нагрузок на железнодорожный путь и динамических характеристик (безопасность и плавность хода) с помощью нелинейного моделирования движения были рассчитаны характеристические параметры. Для этого использовали реальные параметры пути, предварительно задававшиеся при исследованиях воздействий на экипаж погрешностей положения пути, кривых и недостатка возвышения рельса. При этом также учитывали нелинейность соединительных элементов, оказывающую значительное влияние на ходовые качества.

Устойчивость движения и плавность хода

Полученные компьютерным методом динамические характеристики демпферов разворота и поводков были оптимизированы. Результаты моделирования динамики дали основания ожидать высоких показателей безопасности движения и плавности хода, что было подтверждено измерениями на реальной тележке НЕМВОТ в рамках процедуры допуска.

Для оценки плавности хода в соответствии с документом МСЖД 513Е с помощью многоэлементного моделирования был выполнен трехмерный анализ ускорений в зоне кресла машиниста локомотива. В зависимости от участка пути показатели плавности хода изменялись от 2 до 6 по шестибальной шкале. У базового локомотива Е402В эти показатели изменяются в пределах от 1 до 5.

Измерения в рамках допуска к эксплуатации

Новая тележка НЕМВОТ была опробована на локомотиве серии Е402В. С целью получения допуска Государственные железные дороги Италии провели многочисленные испытания на своей сети. Было предусмотрено измерение сил в контакте колесо — рельс, ускорений и величины прогиба надбуксовых рессор, а также оснащение измерительными датчиками других мест измерения, например на полом валу тяговой передачи тележки.

На рис. 6 представлены значения отношения Y/Q , позволяющего оценить уровень безопасности движения. Эти данные получены при измерениях в рамках допуска в соответствии с документом МСЖД 518 для

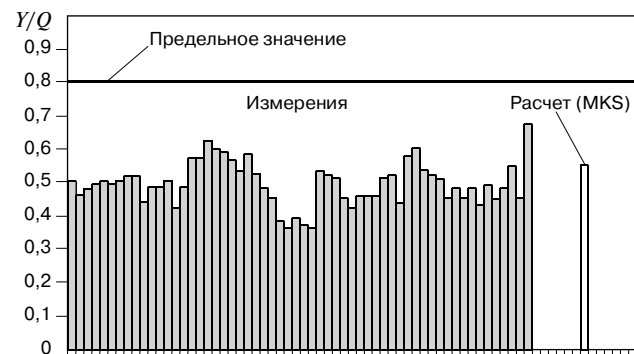


Рис. 6. Сравнение значений отношения сил Y/Q , полученных в результате измерений и рассчитанных на многоэлементной модели (MKS):

Y — поперечная сила; Q — вертикальная сила

варианта движения в кривых малых радиусов (250 — 400 м). Для сравнения приведен результат расчета этого отношения на многоэлементной модели (MKS). Следует заметить, что все значения находятся значительно ниже предельного значения, равного 0,8. Значение, полученное методом многоэлементного моделирования, не выходит за пределы диапазона разброса результатов измерений.

Испытания показали, что в целом новая тележка отвечает всем требованиям, предписываемым документом МСЖД 518. В дальнейшем планировалось проведение испытаний с изношенным профилем колес.

Выводы

Метод компьютерного моделирования был успешно внедрен в процесс разработки моторной тележки облегченной конструкции. При этом удалось получить как качественную, так и количественную оценку эксплуатационной прочности, уровня излучения шума, стабильности и безопасности движения, а также плавности хода. Обобщая, следует особо подчеркнуть следующие моменты:

- снижение массы тележки было достигнуто благодаря использованию современных методов проектирования и применению облегченных материалов;
- для проектирования, оптимального с точки зрения расходов и времени, большое значение имеют согласование и подбор методов расчета, измерений и испытаний;
- динамические свойства тележки при взаимодействии подвижного состава и рельсового пути могут быть исследованы с точки зрения выполнения критериев допуска уже на ранней стадии разработки;
- расчет параметров и оптимизация отдельных компонентов или модулей с помощью аналитических (компьютерных) методов также могут быть выполнены на раннем этапе проектирования.