

От эксплуатационных измерений к оценке эксплуатационной прочности подвижного состава

На основании проекта «Безопасность подвижного состава», разработанного по поручению руководства холдинга железных дорог Германии (DB), Исследовательско-технологический центр DB Systemtechnik (Минден) самостоятельно занимается дальнейшим усовершенствованием активной и пассивной систем обеспечения безопасности на железной дороге. Задачей вспомогательного проекта «Эксплуатационная прочность подвижного состава» является оказание содействия в выполнении расчетов по эксплуатации и текущему содержанию перспективного подвижного состава. Кроме того, результаты проекта должны быть эффективно реализованы не только в новых разработках с учетом требований, указанных в технических условиях или договорах, но и на подвижном составе, находящемся в данное время на реконструкции и в ремонте.

Для выполнения данной задачи в первую очередь был проведен тщательный анализ нагрузок ряда единиц подвижного состава в прогнозируемых условиях эксплуатации на ближайшие годы. Поскольку срок службы железнодорожного подвижного состава DB рассчитан на 30 лет, то такого рода анализ является обязательным. Кроме того, должны проводиться достаточно затратные из-

мерительные поездки с целью определения спектров нагрузок для всех основных серий подвижного состава холдинга, при этом должны регистрировать не только отдельные взятые критические виды нагрузок, но и все обычные нагрузки, прогнозируемые на ближайшую перспективу. Кроме того, проектная группа должна предоставить возможность компаниям-перевозчикам использовать на-

грузки обновленного спектра, если даже в режимы работы подвижного состава будут позднее внесены изменения. Это также требует воспроизводимости результатов измерений, выполняемых в соответствии с рассматриваемой категорией эксплуатации. Для выполнения эксплуатационных расчетов требуется современная оценка эксплуатационной прочности подвижного состава, дополненная, например, оценкой усталостной прочности.

Так как ныне действующая инструкция уже давно требует внесения изменений, то это послужило поводом для того, чтобы проектная группа внесла свой вклад в решение данной проблемы.

Стратегия проекта и его реализация

Для реализации проекта с размерными затратами за основу была взята эффективная страте-



Рис. 1. Высокоскоростной моторвагонный поезд ICE 3 (фото: DB, Г. Язбек)



Рис. 2. Региональный моторвагонный поезд серии 612 из вагонов с наклоняемыми кузовами (фото: DB, К. Вебер)

гия со следующими этапами ее выполнения:

- выбор типичного подвижного состава в соответствии с программами его приобретения совместно с компаниями DB Fernverkehr (оператор дальних пассажирских перевозок), DB Regio (оператор региональных пассажирских перевозок) и DB Railion (оператор грузовых перевозок), согласование подготовительных работ для проведения измерительных поездок выбранного подвижного состава;

- воспроизведение точной картины эксплуатации выбранного подвижного состава на базе его фактического профиля эксплуатации;

- разработка концепции расположения точек измерения для компонентов подвижного состава конкретной серии после согласования данного вопроса с компанией-перевозчиком и консультации с компанией-изготовителем;

- выполнение измерительных поездок в соответствии с уточненным сценарием эксплуатации, сохранение и анализ результатов измерения;

- определение спектров нагрузок для компонентов подвижной единицы и их оценка (сравнение с данными действующих инструкций, определение степени нагрузки и запаса эксплуатационной прочности, подведение итогов

для использования полученных результатов при эксплуатации и техническом обслуживании, а также при оценке эксплуатационной прочности).

То, что такого рода притязательный проект холдинг DB может реализовать исключительно собственными средствами, объясняется поддержкой компаний, входящих в холдинг, и конструктивным сотрудничеством специалистов в области науки и промышленности, которое началось еще на этапе подготовки проекта. Так, уже с 2001 г. в рамках ежегодно проводимых совещаний для специалистов обсуждаются работы, выполненные проектной группой и ее партнерами по сотрудничеству в области современной оценки эксплуатационной прочности, рассматриваются результаты, необходимые для разработки дальнейших процедур исследовательского процесса.

Выбор подвижного состава и определение спектра нагрузок

По договоренности с компаниями, входящими в холдинг DB, для выполнения эксплуатационных измерений были выбраны следующие виды подвижного состава:

- высокоскоростной моторвагонный электропоезд серии 403 (ICE 3), показанный на рис. 1. Для измерений назначен пробег 12 900 км. Объекты измерения: концевой моторный вагон восьмивагонного поезда и следующий за ним трансформаторный вагон;

- региональный моторвагонный поезд-экспресс серии 612 (рис. 2) из вагонов с наклоняемыми кузовами. Назначенный для измерений пробег составляет 8 619 км, объектом измерения является В-вагон, расположенный впереди;

- региональный двухэтажный челночный поезд-экспресс с локомотивом серии 146 (рис. 3), вагоном с кабиной управления серии DBpbzfa 766 (RE 160, является объектом измерений), двумя балластными вагонами серии Vm 235 и измерительным вагоном. Для выполнения измерений назначен пробег 5323 км;

- грузовой поезд с локомотивом серии 185 (рис. 4) и грузовыми вагонами Falns, Eans и Hbillns (объекты измерения);

- моторвагонные поезда серии 423 региональной/городской железной дороги (рис. 5). Объектами измерения являются вагон с кабиной управления (впереди) и прилегающий к нему промежуточный вагон.



Рис. 3. Региональный двухэтажный поезд-экспресс с локомотивом серии 146 и вагоном с кабиной управления (фото: DB, Г. Вагнер)



Рис. 4. Электровоз серии 185 с грузовым поездом (фото: DB, Г. Вагнер)



Рис. 5. Моторвагонные поезда серии 423 городской железной дороги Мюнхена (фото: DB, Й. Кирше)

От уточнения сценария эксплуатации — к измерительной поездке

За выбором типа подвижного состава следует этап определения стратегии проекта, показанной в данном случае на примере исследования регионального моторвагонного поезда-экспресса серии 612, составленного из вагонов с наклоняемыми кузовами.

В качестве базы для планирования и оценки измерительных поездок, а также с целью сохранения возможности воспроизводить спектр нагрузок взяли все имеющиеся отношение к нагрузкам параметры участков и тяговых средств, которые также были документально зафиксированы и отображены в виде уточненной таблицы эксплуатации. Эта таблица, отражающая основные сценарии эксплуатации, включает для данного типа поезда следующее:

- относительную распространенность (статистическое распределение) параметров участка на старых, реконструированных и новых линиях с кривыми, уклонами и элементами трассирования (стрелочными переводами, мостами и переездами);

- параметры движения поезда (загруженность, скорость), процентные доли времени работы в режимах тяги и торможения, скрещения поездов.

Данная эксплуатационная картина измерительных поездок скорее отразила условия работы 90% парка подвижного состава, нежели его среднестатистические показатели. Для этого увеличили частоту событий, вызывающих высокие нагрузки, а пробег вагонов выбрали таким образом, чтобы только 10% парка подвижного состава имели несколько больший пробег. Таким образом, компании-перевозчику была гарантирована на будущее большая свобода действий. Если в течение срока службы подвижного состава придется изменить его категорию эксплуатации, то тогда можно будет выбрать комбинацию параметров разных эксплуатационных сценариев в соответствии с их составляющими. На основе выбранной концепции определения точек измерения и с учетом специфичных для конкретного сценария эксплуатации особенностей данной единицы подвижного состава (здесь такой особенностью является наличие системы наклона кузова) бы-

ли составлены схемы размещения точек измерения, включающие все необходимые места, где следует измерять ускорения, относительные удлинения, силы и перемещения на выбранных компонентах поезда (рис. 6).

Являясь базой для выбора измерительной и оценочной техники, параметры схемы измерений служат также основой для подготовки процессов измерения на компонентах подвижного состава. На заключительном этапе размещение всех измерительных тензодатчиков было зафиксировано документально.

Измерительные поездки на поезде серии 612 проводились с пробегом 8619 км и прохождением кривых при включенной и отключенной системе наклона кузовов вагонов. При этом осевая нагрузка порожнего поезда составляла 12,5 т и полностью населенного 14,2 т. Все результаты измерительных поездок с указанием параметров линии и характеристик тяговых средств были занесены в протокол.

Определение спектров нагрузок

В определение спектров нагрузок входят спектры нагружения и напряжения в отобранных компонентах единицы подвижного состава. Определение всего спектра нагрузок осуществляется следующими этапами:

- предварительная обработка измерительных сигналов (приведение их в соответствие с техническими требованиями) и проверка на достоверность (устранение помех и колебаний среднего значения);

- формирование матриц Райнфлюу для специальных частичных спектров;

- наложение частичных спектров и расширение их до типичных суммарных нагрузок для всего срока службы согласно уточненному сценарию эксплуатации (здесь общий пробег за 30 лет составляет $7,5 \cdot 10^6$ км);

• извлечение результатов расчета двух диапазонов из матриц Райнфлюу всего спектра нагрузок.

При изображении спектра в виде характеристик (подсчетов) двух диапазонов (измерения) за основу была взята динамическая составляющая нагрузок или напряжений. Статическую составляющую и ее среднее значение напряжений не учитывали. Для определения частичных спектров в расчет брали весь выделенный для испытаний пробег. Для этого была выполнена разбивка всей измерительной поездки на различные частичные спектры нагрузок, которые различались направлением движения, осевой нагрузкой и категорией участка. Что касается поезда серии 612, то в ходе испытаний, помимо всего, также учитывали включенное или выключенное состояние системы наклона кузовов вагонов в кривых.

Большое количество данных, накопленных компанией DB Systemtechnik в ходе измерительных поездок, может в интересах компаний-перевозчиков использоваться для дальнейшего применения, прежде всего для расчета параметров прочности и современной оценки эксплуатационной прочности. В качестве примера для

определения спектров нагрузок была выбрана показанная на рис. 6 измерительная точка с тензодатчиком DMS 11. Эта точка находится на нижнем поясе продольной балки рамы поддерживающей тележки в области опирания первой ступени рессорного подвешивания. Спектры нагрузок для данной точки измерения показаны на рис. 7.

Оценка спектров нагрузок

В противоположность компании — изготовителю подвижного состава, владеющей конструкторской документацией, компания-перевозчик лишь в немногих случаях может сравнить реально измеренные нагрузки с проектными нагрузками конструкции. В связи с этим для оценки установленных спектров используют инструкции, пригодные для расчета некоторых параметров. В качестве основных принципов оценки спектров напряжения и относительного удлинения можно использовать рекомендации Международного института сварки (IIW), инструкцию DS 952 и стандарт DIN 15018. На основе рассматриваемого далее примера сравниваются между собой установленные степени нагрузки.

Пример оценки для точки DMS 11

Полный спектр в виде характеристик двух диапазонов измерения в точке DMS 11 для суммарного пробега $7,5 \cdot 10^6$ км, приведенный на рис. 7, определен с учетом исследуемых осевых нагрузок 12,5 и 14,2 т. Для каждого спектра на диаграмме также нанесены кривые амплитуд, эквивалентных повреждению. Последние были определены с помощью специального расчета на разрушение. Использовалась модификация расчетного метода, основанная на параметрах кривой Вёлера.

С помощью полученных результатов измерений и последующей их обработки найдены параметры для общей нагрузки в течение срока службы подвижного состава (общий пробег, его доли с осевыми нагрузками 12,5 и 14,2 т) и полный спектр для двух диапазонов измерений в точке DMS 11. К последним относятся:

- число классов нагрузки — 100;
- диапазон изменения классов нагрузки — ± 80 МПа;
- максимальные значения при осевой нагрузке 12,5 т — 28 МПа;
- то же, 14,2 т — 45,6 МПа;

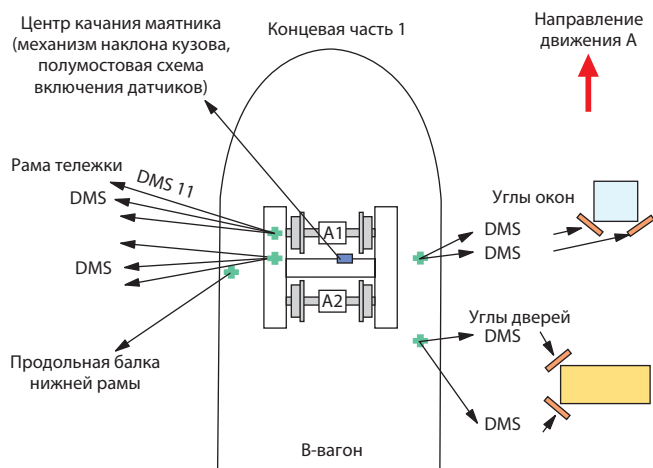


Рис. 6. Схема расположения точек измерения относительных удлинений в вагоне поезда серии 612

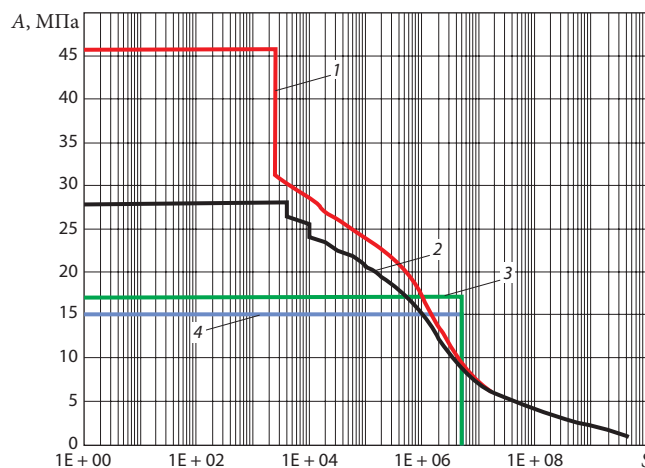


Рис. 7. Спектры нагрузок для точки измерений DMS 11: A — амплитуда; S — суммарная частота воздействий; 1 — осевая нагрузка 14,2 т; 2 — то же, 12,5 т; 3, 4 — амплитуды, эквивалентные повреждению при осевой нагрузке 14,2 и 12,5 т

- эквивалентные амплитуды при осевой нагрузке 12,5 т — 15,07 МПа;
- то же, 14,2 т — 17,07 МПа.

Кроме того, определяли частоту возникновения напряжений при обоих значениях осевой нагрузки, а также параметры кривых Вёлера.

Для оценки степени нагружения рамы тележки в рассматриваемой точке принятые допустимые значения напряжений сравнивали с полученными величинами эквивалентных амплитуд для обеих осевых нагрузок. Результаты оценки степени нагружения, выполненной в соответствии с рекомендациями института IIW, инструкциями DB и стандартами для кранового оборудования, были сведены в общую таблицу.

Анализ результатов оценки показал, что в соответствии с рекомендациями Международного института сварки степень нагружения рамы тележки в точке DMS 11 составляет 60,3% для осевой нагрузки 12,5 т и 68,3% для 14,2 т. Если исходить из инструкции DS 952 железных дорог Германии, то можно видеть, что величины нагружения составляют соответственно для обеих осевых нагрузок 28,4 и 32,2%. Близкие к этим величинам значения дает стандарт DIN 15018, разработанный для кранового оборудования: соответственно 28,7 и 32,5%.

Выводы

Рассмотренный пример для точки DMS 11 показывает, что со стороны эксплуатации и текущего содержания подвижного состава не требуются никакие дополнительные действия. В то же время различные заданные в технической документации параметры обнаруживают явную потребность в их уточнении. В частности, возникает необходимость в выработке единых правил для оценки эксплуатационной прочности, в том числе на основе измеряемого спектра

нагрузок. В связи с данной ситуацией требуется принятие определенных директивных документов, дающих возможность производить на практике с минимальными трудозатратами оценку эксплуатационной прочности подвижного состава.

Выгоды, получаемые компаниями-операторами

Оценка спектров нагрузок дает компании-оператору дополнительные знания относительно фактических нагрузок своего подвижного состава и открывает перед ней возможность получения надежной оценки эксплуатационной работы, объема и качества технического обслуживания подвижного состава:

- в общем низкая степень нагружения указывает на резервы эксплуатационной прочности, что является потенциалом усовершенствования конструкций. При существующих нормах степень нагрузки, превышающая 100%, может быть реальной, однако это потребует определения срока службы для каждого отдельного элемента конструкции;
- существующие профили нагрузок можно использовать для разработки обоснованных технических требований, предъявляемых к подвижному составу и его компонентам при проектировании нового подвижного состава;
- знание существующих профилей нагрузок единиц подвижного состава и их компонентов можно использовать для оптимизации при изменении их конструкции;
- установленную степень нагружения компонентов и единицы подвижного состава в целом можно использовать для оптимизации технического обслуживания и ремонта, например, с целью увеличения межремонтных интервалов и, соответственно, сокращения эксплуатационных затрат.

Оценка эксплуатационной прочности и составление инструкций

Приведенный пример оценки с использованием трех инструкций, разработанных для разных промышленных отраслей, выявляет большие различия в оценке степени нагружения конструкций. Явно более высокую степень нагрузки, получаемую в соответствии с рекомендациями IIW, можно уменьшить путем учета при оценке таких факторов, как возможность уменьшения внутренних напряжений или использования стального листа другой толщины.

Строго говоря, в перспективе не предусмотрено определение степени нагрузки с помощью метода эквивалентных напряжений, положенного в основу расчета срока службы. Разумеется, определение степени нагрузки только с помощью максимальных значений спектра, как того требуют правила оценки усталостной прочности, также нерацionalmente, поскольку в этом случае результат зависит лишь от отдельного события или продолжительности измерения. С увеличением продолжительности измерения возрастает измеренное максимальное значение спектра, что обусловлено применением статистических методов оценки. В действующих инструкциях отсутствуют указания для оценки результатов эксплуатационных измерений, однако перед согласованием параметров с данными инструкциями следует проверить их влияние на существующие и будущие параметры путем выполнения большого числа примерных расчетов. С целью совершенствования методов конструирования тележек специальная группа DIN-FSF приступила к разработке нового стандарта «Измерение прочности, расчетные нагрузки».

W. Wolter, S. Jenne. *Eisenbahningenieur*, 2007, № 1, S. 42–47.