

# Уровень разработок и анализ безопасности мехатронной ходовой части

*Безопасность железнодорожного подвижного состава является главным условием его допуска к эксплуатации. Для обычной ходовой части с пассивными компонентами имеется ряд инструкций, директив и стандартов, регламентирующих нормы безопасности.*

*Использование активных систем в так называемой мехатронной ходовой части компании Bombardier Transportation требует новых методов анализа и оценки, ориентированных на соответствующие европейские стандарты EN 50126, 50128 и 50129. Системный анализ должен охватывать результаты всех испытаний отдельных компонентов и экипажа в сборе, в том числе полученные на катковом стенде, в ходе динамических исследований на экспериментальных участках, а также в опытной эксплуатации на линии.*

## Проект «Мехатронная ходовая часть»

Главной задачей проекта «Мехатронная ходовая часть» компании Bombardier Transportation (отделения по производству тележек в Нетфене, Германия) является реализация системы активной радиальной установки колесных пар и стабилизации их движения (ARS). С ее помощью обеспечивается не только стабильность движения в колее на пути различного качества, но и возможность эксплуатации подвижного состава без снижения его эффективности на сетях с разными величинами подуклонки рельсов.

### Разработка мехатронной ходовой части

Прототипом ходовой части с ARS послужила уже известная тележка дизель-поезда VT 612, в которой реализована идея пассивной радиальной установки в кривых обеих колесных пар. Колесные пары соединены между собой боковыми шарнирными поводками, с помощью которых осуществляется их взаимное направление в кривой. Предварительные исследования показали, что индивидуальная установка обеих колесных пар имеет явное преимущество по сравнению с принудительно связанной, как у поезда VT 612. В связи с этим для каждой колесной пары был разра-

ботан активный направляющий механизм, который образован следующими компонентами:

- электромеханическое исполнительное звено (исполнительный привод, механизм которого, снабженный редуктором, установлен в раме тележки перпендикулярно ее продольной оси);
- две пары поводков, по одной на колесную пару. В каждой паре поводки соединены между собой торсионным валом и связаны с исполнительным приводом;
- блок управления с датчиками.

В первой серии испытаний на катковом стенде железных дорог Германии (DBAG) в Мюнхене (станция Мюнхен-Фрайман) была доказана устойчивость движения на основе результатов моделирования движения со скоростью до 300 км/ч при невысокой эквивалентной конусности. Однако было установлено, что значительная доля энергии регулирования исполнительного звена в системе ARS тратится в резьбовых соединениях торсионного вала и затрачивается на упругое деформирование резиновых опор.

В связи с этим во второй серии испытаний было решено отказаться от торсионного вала. Букса, расположенная со стороны, противоположной исполнительному приводу, была зафиксирована в продольном направлении. В результате исполнительный привод действовал только на вторую буксу этой же оси, расположенную на одной с ним стороне. Эта серия испытаний была проведена на катковом стенде в декабре 2003 г.

### Концепция регулирования

Индивидуальное управление обеими колесными парами выполняет две задачи:

- оптимальная установка каждой колесной пары в кривой. Это означает наличие зависящего от ситуации баланса между факторами, обусловленными минимальным углом набегания (уменьшение износа колеса и рельса и снижение уровня излучаемого шума при контакте гребня колеса с рельсом) и величиной поперечных сил в пути (уменьшение максимальной нагрузки на рельсошпальную решетку);
- компенсация дефектов положения пути уже на уровне колесных пар, позволяющая предотвратить возникновение колебаний рамы тележки.

В результате на ходовые качества оказывается активное воздействие, при котором сохраняется минимальная поперечная динамика, обеспечивающая равномерное распределение износа поверхностей катания, и не превышаются пределы устойчивости движения даже в диапазоне высокой скорости. Это достигается:

- с помощью обнаружения дефектов положения пути датчиками, установленными на подшипнике колесной пары;
- путем распознавания кривых с помощью соответствующих датчиков или на базе плана участка;
- расчетом параметров процесса возврата колесной пары при выходе из кривой.

На основании этого выбирают один из двух параметров регулирования — установочный момент или угловое положение колесной пары в кривой.

### *Динамический расчет*

Условием для реалистического воспроизведения ожидаемой динамики движения единицы подвижного состава, оборудованной ARS, стало подробное трехмерное моделирование с учетом механических и электрических характеристик используемого исполнительного привода. Включение различных алгоритмов регулирования в процесс моделирования многоэлементных систем с помощью программы MEDYNA позволило оценить эффективность различных оптимизирующих технологий, а также определить максимальное и среднее значения необходимой мощности исполнительного привода при движении подвижного состава по участкам с различным качеством пути с учетом предельно измеренных параметров.

Были получены результаты, позволившие сделать следующие выводы:

- возможна активная стабилизация движения в диапазоне скорости вплоть до максимальной (было выполнено моделирование для скорости движения до 450 км/ч) пассивно устанавливающейся в кривых ходовой части, неустойчивой при скорости движения 100 км/ч;
- максимальная нагрузка исполнительного привода менее 1 кВт, средняя мощность при этом значительно ниже.

В ходе исследований можно простейшими способами многократно моделировать утрату отдельных функций, что имеет большое значение применительно к такой важной с точки зрения безопасности движения системе, как ARS. Это позволяет исследовать надежность выбранного метода и способность возврата системы в состояние нормального функционирования.

Исследовали следующие сценарии отказов:

- работает только один исполнительный привод, второй находится в режиме фиксированного положения колесной пары;

- регулируется только один исполнительный привод, а второй находится в режиме электрического демпфера (короткое замыкание обмотки двигателя);

- регулируется только один исполнительный привод, а второй нефункционален, так как не оказывает никакого влияния на соответствующую колесную пару, если не учитывать влияния его вращательного момента инерции.

Результаты, полученные при многократном моделировании, были подтверждены на катковом стенде, а также позже при эксплуатационных испытаниях.

### *Результаты испытания компонентов на катковом стенде и в опытной эксплуатации*

Для детального исследования работы исполнительных приводов в свое время были проведены их испытания на специальном стенде для проверки двигателей завода компании Bombardier Transportation в Зигене (Германия). Эти испытания подтвердили заявленные изготовителем заводские характеристики двигателей, позволили уточнить параметры двигателей в сборе с циклоидальными редукторами. Полученные данные были необходимы для построения реалистической модели, на которой проводились рассмотренные ранее исследования.

Первые испытания на катковом стенде железных дорог Германии (DBAG), проведенные в 2002 г. по упрощенному варианту регулирования крутящего момента и с первоначальной схемой (вспомогательные приводы соединены торсионным валом), подтвердили наличие большого потенциала активной индивидуальной стабилизации обеих осей тележки, выявленное на этапе моделирования. Так, при заданной эквивалентной конусности, равной 0,1, движение колесной пары оставалось устойчивым до скорости 300 км/ч.

В ходе второго этапа испытаний по схеме одностороннего воздействия исполнительного привода на колесную пару (без торсионного вала) и с использованием улучшенного алгоритма регулирования устойчивость движения удалось реализовать уже в диапазоне до 400 км/ч.

Ходовые испытания планировалось провести осенью 2003 г. на испытательном полигоне Вегберг-Вильденрат компании Siemens, однако они были сдвинуты на лето 2004 г.

### *Экономический эффект*

Использование ARS, помимо обеспечения безопасности движения, необходимо также для снижения эксплуатационных затрат на подвижной состав и путь за счет следующих факторов:

- уменьшения износа колес и рельсов за счет более благоприятных условий вписывания колесных пар в

кривые, обеспечивающих повышение срока службы колес;

- отказа от гасителей колебаний виляния, которые используются для стабилизации движения на высокоскоростном подвижном составе с обычными тележками.

Углубленный анализ экономической эффективности, проводившийся параллельно с разработкой системы, показал, что экономия, полученная за счет некоторых конструктивных изменений, в дальнейшем позволит компенсировать дополнительные затраты на исполнительные приводы и регулируемую электронику. Указанная экономия достигается:

- упрощением механики ходовой части;
- снижением массы ходовой части;
- снижением массы и упрощением конструкции кузова благодаря отказу от усиления жесткости конструкции в зоне установки гасителей колебаний виляния;
- уменьшением необходимого уровня акустической изоляции благодаря естественному снижению уровня шума за счет отказа от гасителей колебаний виляния, являвшихся акустическими мостиками между тележками и кузовом.

Очевидно, что значительное сокращение срока окупаемости дополнительных затрат на изготовление подвижного состава будет достигнуто также за счет экономии эксплуатационных затрат.

### **Безопасность**

Если при разработке обычных систем фактор безопасности обеспечивают путем выбора соответствующих коэффициентов запаса прочности деталей и узлов, то внедрение мехатронных принципов требует новых подходов, причем не только от разработчиков, но также от компаний-операторов и, не в последнюю очередь, от служб, осуществляющих допуск подвижного состава к эксплуатации.

Как показывает опыт внедрения современных систем на других видах транспорта, в частности в авиации, такое изменение подходов возможно, если привлекать к сотрудничеству все заинтересованные стороны еще на стадии проектирования с обязательным представлением доказательств надежности предлагаемых разработок. Последнее требование реализуется с помощью независимой экспертной комиссии ISA, контролирующей ход и результаты разработок.

Работа такой комиссии гарантирует, с одной стороны, анализ соответствия уровня безопасности находящейся на стадии проектирования системы требованиям европейского стандарта, а с другой — возможность своевременного внесения поправок в процесс конструирования. Кроме того, уже на раннем этапе включаются сертификационные центры, которые благодаря этому имеют достаточно времени для

ознакомления с новыми процессами и условиями их протекания, а также получают возможность воздействовать на факторы, которые в дальнейшем трудно изменить.

### **Сопроводительная экспертиза безопасности**

Обычно комиссия ISA впервые включается в проект, когда система должна пройти допуск к эксплуатации в стране и центру сертификации требуются результаты независимой экспертизы.

В случае мехатронных систем выгодным считается раннее включение ISA, т. е. еще на этапе разработки концепции. Задачей ISA является наблюдение за процессом конструирования и производства, а не поиск доказательств надежности системы. Комиссия может заблаговременно указать разработчику и изготовителю на организационные или технические проблемы, с которыми можно столкнуться в процедуре допуска к эксплуатации. В конечном итоге это сокращает интервал времени между началом и завершением проекта.

Обязанности ISA в проекте компании Bombardier Transportation «Мехатронная ходовая часть» исполняет Союз работников технического надзора (TÜV) Intertraffic в Кёльне.

#### *Проверка концепции (первый этап)*

На стадии разработки концепции исследовали реализуемость системы и оценивали ее безопасность (степень риска). Далее обсуждали различные сценарии и предлагали соответствующие технические решения. Уже на этом этапе обычно предлагаются структурированные меры, не препятствующие творчеству разработчиков, но ставящие перед ними конкретные задачи по обеспечению безопасности.

Результатом такой проверки концепции явился промежуточный отчет о готовности к сертификации мехатронной ходовой части с рассмотренной системой электронного управления и подтверждением соответствия требованиям безопасности в количественном и качественном выражении.

#### *Независимая экспертиза (второй этап)*

Европейские стандарты CENELEC EN 50126 и EN 50129 требуют, чтобы любая разработка велась в соответствии с моделью V. Это значит, что необходимо провести анализ рисков в соответствии с нормами и составить требования обеспечения качества и безопасности, такие, как стандартный процесс верификации и валидации (V&V), спецификация требований, планы проекта в целом и мероприятий по технике безопасности, перечень опасных отказов.

*Проведение экспертизы проекта*

Начало проекту «Мехатронная ходовая часть» было положено на совместном заседании группы ISA и проектно-конструкторской группы ВТ. На нем обсуждались проблемы, связанные с необходимостью переноса философии норм CENELEC на разработку механических узлов, что возможно лишь в ограниченном масштабе, поскольку эти нормы в первую очередь относятся к электронным системам. Применительно к подвижному составу эти нормы могут использоваться при разработке системы обеспечения безопасности движения, но, например, не для электронной системы автоматического управления торможением (ABS).

На заседании обсуждались следующие общие вопросы:

- структура и использование стандартов CENELEC;
- V- модель;
- спецификация требований и архитектура системы;
- методы проведения анализа рисков;
- определение интегрированного уровня безопасности (SIL);
- составление перечня опасных отказов;
- организационная структура обеспечения безопасности;
- составление сертификата безопасности в соответствии с нормами CENELEC.

Второе совещание, на котором в качестве наблюдателя принимала участие комиссия ISA, было проведено внутри группы ВТ. На этом совещании обсуждались специальные вопросы разработчика:

- спецификация требований, предъявляемых к мехатронной ходовой части;
- изменение концепции;
- взаимодействие между различными подразделениями, занятыми в данном проекте;
- результаты анализа рисков;
- план обеспечения и повышения безопасности.

Вместе с комиссией ISA был согласован ряд вопросов, в частности перечень документов, которые необходимо представить для проверки на следующем совещании.

*Что дает сопроводительная экспертиза?*

В целом доказано, что для всех участвующих сторон проведение сопроводительной экспертизы выгодно, потому что до начала разработки конструкции утверждаются все необходимые для нее технические требования (спецификации), в которых в достаточной мере учитывается аспект безопасности. Все рабочие группы имели возможность совместного обсуждения возникавших проблем и вариантов их решения. Комиссия ISA также имела возможность участвовать в обсуждениях и представлять свое по-

нимание безопасности в отношении предлагавшихся решений.

Весь процесс разработки и допуска к эксплуатации был оптимально синхронизирован процедурой сопроводительной экспертизы. Риски и время, затраченное на разработку, были минимизированы, поскольку удалось избежать дорогостоящих изменений конструкции, дополнительной работы с документацией, непредусмотренных затрат на проверки.

**Результат независимой экспертизы обеспечения техники безопасности**

Проведение экспертизы комиссией ISA гарантировало четкую проработку и анализ критических с точки зрения безопасности мест в системе ARS. Проводившаяся в соответствии с требованиями SIL оценка надежности и функциональных возможностей контроля позволила создать надежную в работе и безопасную конструкцию.

Надежность обеспечивается резервированием компонентов, предусмотренным концепцией системы и охватываемым:

- программное и аппаратное обеспечение регулятора для каждого отдельного исполнительного привода, который также связан с датчиками второй системы ARS данного ходового механизма и находится в режиме горячего резерва, готового в любой момент взять на себя управление;
- всесторонний самоконтроль с помощью датчиков, регулирующей техники и системы привода, который также включает информационную проверку на достоверность;
- обеспечение рабочего режима с полным использованием мощности вплоть до момента планового завершения поездки даже при наличии одного выявленного отказа. При этом соответствующее предварительное извещение, посылаемое в локомотивное депо и содержащее данные о типе ошибки и затронутых компонентах или модулях, обеспечивает быструю их замену, а значит, оперативное восстановление уровня резервирования.

Проведение сопроводительной экспертизы безопасности проекта комиссией ISA способствует снижению числа отказов системы за счет высокого уровня резервирования и надежности ее компонентов. При этом особое внимание уделяется таким компонентам, которые не могут иметь полного резервирования (например, исполнительным приводами системы ARS).

*G. Himmelstein, J. Gülker. Glasers Annalen, Tagungsblatt SFT, 2004, Graz, S. 166 – 171.*