

# Токо съем при высокоскоростном движении

**Высокие скорости движения требуют большой мощности и надежного ее подвода из контактной сети через токоприемники к тяговым агрегатам подвижного состава. Эксплуатационный опыт показывает необходимость дальнейшего совершенствования характеристик контактных подвесок, повышения точности расположения контактного провода, эффективности натяжных устройств и устойчивости струн контактной подвески к колебаниям. Кроме того, требуется улучшение характеристик токоприемников и разработка соответствующих стандартов.**

Для обеспечения высокоскоростного движения на железных дорогах Европы разработаны технические спецификации по эксплуатационной совместимости различных систем (TSI) и несколько европейских стандартов (EN).

Максимальная скорость движения на электрифицированных линиях переменного тока в последние годы возросла до 300 км/ч; для некоторых новых участков планируется скорость до 350 км/ч. Мощность, необходимая для современного высокоскоростного подвижного состава, требует повышения тяговых токов до 2000 А на переменном токе и до 4000 А на постоянном.

Максимальная скорость на линиях постоянного тока достигает 250 км/ч. Передача таких токов по контактным проводам и через контактные накладки токоприемников, контактная поверхность которых составляет всего лишь несколько квадратных миллиметров, при высокой скорости движения является сложной задачей, решение которой требует соответствующего качества контактной сети и в большинстве случаев нескольких токоприемников на одном поезде.

Все компоненты системы передачи мощности должны соответс-

твовать предъявляемым требованиям и подлежат тщательной проверке и испытаниям.

## Требования к контактной сети и токоприемникам

### Контактная сеть

Требования к контактным сетям высокоскоростных линий изложены в спецификации TSI Energie и стандарте DIN EN 50119. В соответствии с этими требованиями они должны обладать мощностными характеристиками, обеспечивающими их совместимость с другими системами и соответствие требованиям в отношении усилий нажатия в контакте и частоты образования электрической дуги. Так, максимальное ветровое отклонение контактного провода на прямых участках не должно превышать 400 мм. Эластичность контактного провода в середине пролета должна быть меньше 0,5 мм/Н, а ее равномерность в зависимости от конструкции цепной контактной подвески должна составлять от 10 до 40%. При этом эксплуатационная скорость не должна превышать 70% скорости распространения волны по подвеске.

### Токоприемники

В спецификации TSI Energie не содержится указаний в отношении наименьшего расстояния между двумя токоприемниками. Максимальное расстояние между двумя токоприемниками составляет 400 м. Если в поезде три токоприемника, они должны располагаться с шагом не менее 143 м.

В переработанной редакции спецификации TSI Energie дается минимальное расстояние, равное 200 м. Токоприемники должны соответствовать требованиям, определяемым скоростью движения на участке, и обеспечивать соблюдение предусмотренных предельно допустимых параметров при самом неблагоприятном расположении в составе поезда. При установлении зависящей от скорости движения средней величины сил нажатия в контакте  $F_m$  необходимо стремиться, с одной стороны, к обеспечению бесперебойного токо съема, с другой — к уменьшению износа контактного провода и контактных накладок токоприемников. Для выполнения этих требований необходимо, чтобы на тяговом подвижном составе можно было регулировать статические силы нажатия. Токоприемники должны передавать рабочие токи и токи короткого замыкания во всем рабочем диапазоне контактных накладок без чрезмерного их нагрева при любой скорости движения и во время стоянки. Геометрия полоза токоприемника должна соответствовать требованиям, предъявляемым к этому элементу европейскими нормами. При этом должны применяться угольные вставки.

## Технические условия токо съема

### Требования к контактной сети

Скользкий вдоль контактного провода токоприемник вызывает возникновение поперечных



Рис. 1. Измерительный поезд ICE-S на реконструированной линии Берлин — Гамбург (фото: DBAG, Яцбек)



Рис. 2. Измерение параметров контактной сети в поезде ICE-S на линии Франкфурт-на-Майне — Кёльн (фото DBAG, Буссе)

(вертикальных) импульсов, которые распространяются по контактному проводу со скоростью движения волн и отражаются от точек сосредоточения масс, а также от конечных точек. Для достижения необходимой разности между скоростью распространения волн и скоростью движения поезда необходимы большие усилия натяжения и высокая прочность контактного провода (от 420 до 520 Н/мм<sup>2</sup>), а также несущий трос с соответствующими прочностными характеристиками. Кроме того, необходимо также выполнение следующих условий:

- соответствие характеристик всех компонентов контактной сети предъявляемым требованиям;
- максимально равномерная эластичность контактной подвески и минимальные отклонения высоты расположения нижней поверхности контактного провода, которая является направляющей для скольжения контактных накладок или вставок токоприемников;
- высокая устойчивость к вибрациям компонентов контактной подвески, подвергающихся динамическим нагрузкам, таких, например, как струны;
- соблюдение допусков по положению контактного провода как при монтаже, так и в эксплуатации;
- проверка новых контактных сетей путем измерения высоты расположения и зигзага контактного

провода и определения сил прижатия токоприемников с использованием современной измерительной техники и технологий, предусмотренных стандартом EN 50317;

- использование средств технической диагностики, позволяющих своевременно устанавливать любые отклонения от заданных параметров.

#### Требования к токоприемникам

Токоприемники должны конструироваться в соответствии со спецификациями TSI и европейскими стандартами, а также испытываться в соответствии со стандартом EN 50317:2002. С экономической точки зрения контактная накладка токоприемника как быстроизнашивающийся элемент имеет преимущество перед контактным проводом, так как контактный провод даже при локальном износе должен заменяться на участке длиной 1400 м. Замена контактных накладок или вставок может производиться при инспекционной проверке подвижного состава. Опыт эксплуатации показывает, что контактные накладки даже после пробега 120 тыс. км еще имеют довольно большой резерв по сроку службы. В то же время контактный провод после 2 млн. проходов токоприемников изнашивается настолько, что требуется его замена. Для обеспечения высокого качества токоcъема необходимы следующие технические условия:

- хорошие динамические характеристики подвижного состава за счет малой величины неподдресованных масс;
- обеспечение требуемой средней величины сил нажатия в контакте, зависящей от характеристик системы контактная сеть—токоприемник и скорости движения, за счет регулируемости токоприемников;
- невосприимчивость к аэродинамическим воздействиям, обусловленным искусственными сооружениями, встречными поездами, числом, конструкцией и расположением токоприемников;
- использование сертифицированного измерительного оборудования и программ обработки данных при проведении проверок взаимодействия контактной подвески и токоприемников в соответствии со стандартом EN 50317;
- использование токоприемников, рассчитанных на длительный ток нагрузки не менее 500 А при скорости движения более 100 км/ч.

#### Взаимодействие контактной подвески и токоприемников

Для обеспечения в течение длительного времени высокого качества токоcъема наряду с условиями, перечисленными ранее, необходимы регулярные проверки сил нажатия в контакте при взаимодействии двух подсистем и оценка результатов в соответствии со стандартом EN 50317:2002. Для этой цели ис-

пользуются измерительные вагоны, с помощью которых на железных дорогах Германии (DBAG) контактная сеть магистральных линий проверяется через каждые 6 мес (рис. 1, 2). Однако рабочие токоприемники могут иметь характеристики, отличающиеся от характеристик измерительных токоприемников. В связи с этим предпочтительнее следует отдавать устройствам, которые постоянно контролируют рабочие токоприемники и контактную сеть. Результаты измерений, получаемых с помощью этих устройств, должны служить основой для диагностики и текущего содержания.

Для обеспечения надежного токоcъема важно также учитывать погодные условия и различные чрезвычайные ситуации. Слой льда толщиной в несколько миллиметров на контактном проводе способен привести к возникновению устойчивой электрической дуги, которая может повредить контактные накладки или угольные вставки. В связи с этим контактная сеть малодеятельных линий в регионах, где из-за погодных условий часто происходит обледенение контактного провода, должна быть оборудована устройствами для плавки гололеда.

Система аварийного опускания токоприемников при возникновении каких-либо отклонений от нормы могла бы предотвратить возникновение повреждений на подвижном составе и в контактной сети, а также помогла бы избежать нарушений габарита приближения строений.

### **Повышение качества и надежности токоcъема**

#### *Эксплуатационный опыт*

Повышение скорости движения на линиях нередко приводит к усиленному дугообразованию. Наблюдаются также обрывы струн подвески в результате воздей-

ствия динамических нагрузок. В качестве одной из причин усиленного дугообразования было признано возникновение волнообразных колебаний контактного провода с амплитудой в десятые доли миллиметра. Компанией Siemens был проведен ряд исследований и испытаний, направленных на предотвращение этих явлений. Результаты указанных работ способствовали дальнейшему повышению надежности токоcъема при высокоскоростном движении.

#### *Использование контактного провода высокой прочности*

Как уже отмечалось ранее, для надежного токоcъема при высокоскоростном движении необходима высокая прочность контактного провода, который изготавливается из сплава меди с оловом или магнием или представляет собой биметаллический медный провод со стальным сердечником.

Международный опыт показывает, что для контактных проводов повышенной прочности характерна волнистость поверхности, выражающаяся в волнообразных отклонениях продольной оси провода от идеальной линии. Наряду с другими причинами это может приводить к усиленному дугообразованию: при отклонениях до 0,2 мм это воздействие проявляется незначительно, но при больших значениях дугообразование усиливается. Длина волн этих отклонений лежит в диапазоне от 100 до 990 мм.

Узкая плоскость скольжения, образующаяся на контактном проводе в первые годы эксплуатации, и малая в связи с этим площадь контакта еще больше усиливают дугообразование. В существующих стандартах отсутствуют нормы, определяющие допустимую величину волнистости контактного провода. Следует отметить, что электрическая дуга не приводит к ускоренному износу контактного провода и не вызывает снижения его прочности. Этот вывод получен на ба-

зе результатов исследований, проведенных в Японии.

В 2004 г. DBAG совместно с изготовителями контактных проводов провели исследования материалов, используемых для изготовления контактного провода, и способов его монтажа на сетях Германии и других стран, где существует проблема усиленного дугообразования. Все исследовавшиеся контактные провода соответствовали требованиям стандарта EN 50149. В отношении методов и технологии монтажа также не было обнаружено отклонений от действующих норм и правил.

В ходе исследований все участки контактной сети были распределены по группам в зависимости от интенсивности дугообразования, а также от типа контактного провода и способов его монтажа. Интенсивность образования дуги была соотнесена с материалом контактного провода и типом оборудования для его монтажа. Пример, приведенный на рис. 3, показывает зависимость между этими параметрами. Здесь дано сравнение интенсивности дугообразования для двух материалов (условно I и II) и четырех типов монтажного оборудования (1, 2, 3 и 4). Интенсивность дугообразования обозначена различными цветами: зеленым (слабая), желтым (умеренная), оранжевым (повышенная) и красным (сильная).

Для каждого из применявшихся типов монтажного оборудования имеются участки с малой интенсивностью образования дуги, но величина этих участков различна. При использовании контактного провода, изготовленного из материала II, участки с повышенным и сильным дугообразованием больше, чем в случае материала I. Неблагоприятное сочетание материала и типа монтажного оборудования значительно усиливает эффект дугообразования.

Проведенные наблюдения за частотой образования дуги и видеосъемка позволяют судить о влия-



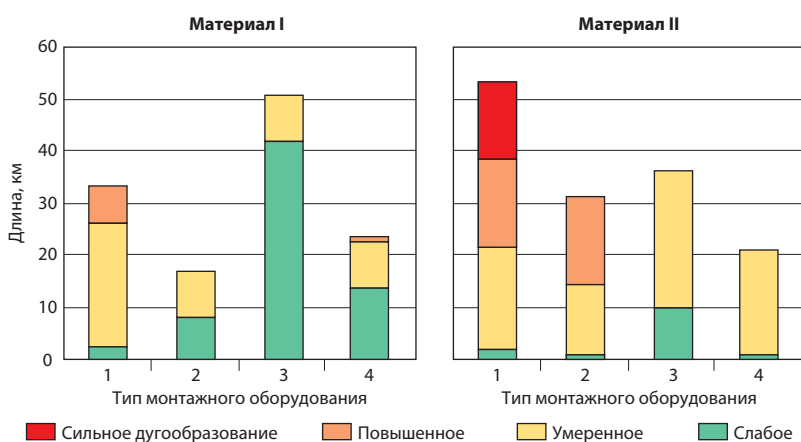


Рис. 3. Сравнение интенсивности дугообразования

нии токоприемников на этот процесс под входными порталами тоннелей, а также под мостами и при встрече поездов. Кроме того, на дугообразование оказывают влияние силы нажатия в контакте, величина тока и скорость движения.

Анализ полученных результатов исследования позволил разработать следующие мероприятия по снижению интенсивности дугообразования:

- уменьшение волнистости контактного провода;
- обеспечение силы нажатия в контакте токоприемника с проводом в соответствии со спецификацией TSI Energie;
- устройство скошенных порталов тоннелей;
- дальнейшее совершенствование токоприемников.

Оценка результатов наблюдений послужила также основой для разработки следующих мероприятий по уменьшению волнистости контактного провода:

- повышение качества материалов для изготовления контактного провода, например за счет введения верхнего предела прочности;
- метрологический контроль при изготовлении, позволяющий оценивать волнистость;
- совершенствование монтажного оборудования;
- применение устройств для правки контактного провода;
- метрологический контроль положения контактного провода при его монтаже.

За счет правильного выбора исходного материала для изготовления контактного провода, совершенствования монтажного оборудования и внедрения новых устройств для правки контактного провода с помощью роликов удалось уменьшить волнистость до величины менее 0,1 мм. В стандартах и регламентирующей документации по монтажу и приемке должны быть определены допустимые пределы микроволнистости, которые служили бы нормой при изготовлении провода, его монтаже и приемке готовой подвески.

#### Новые натяжные устройства

Сила натяжения и точность положения контактного провода и несущего троса зависят от эффективности натяжных устройств. Низкая эффективность вызывает провисание контактного провода в середине пролета при повышении темпе-

ратуры, а при понижении температуры—его подъем, что может приводить к экстремальным значениям сил нажатия в контакте и в связи с этим к образованию электрической дуги. Применяемые на высокоскоростных подвесках новые храповые натяжные устройства с передаточным числом 1:3 и 1:1,5 могут создавать натяжение до 40 кН (рис. 4). В них используются подшипники, не требующие смазки. Высокая эффективность этих натяжных устройств в течение всего срока службы позволяет с достаточной точностью поддерживать заданную высоту расположения контактного провода над УГР.

#### Струны с повышенной устойчивостью к вибрации

В недалеком прошлом на линиях DBAG и других европейских компаний при скорости движения 200 км/ч и выше имели место случаи усталостных обрывов струн цепной подвески вследствие автоколебаний. Струны обычно изготавливают из гибкого медного или бронзового троса сечением 10 или 16 мм<sup>2</sup>. Струновые зажимы и соединительные детали оказывают значительное влияние на усталостную прочность. Уже в 1990-е годы бывшие Государственные железные дороги ФРГ (DB) совместно со строительными компаниями провели испытания, на основании результатов которых удалось повысить качество струн контактной подвески. Компания Siemens продолжила в 2004 г. испытания, целью которых была оптимизация струн контактных подвесок для высокоскоростных участков в отношении их прочности на растяжение при изгибе.

С помощью моделирующей программы взаимодействия контактной сети и токоприемников были рассчитаны перемещения и переменные нагрузки струн контактной подвески в диапазоне скорости движения до 350 км/ч. Параллельно с этим вели наблюдение за процессами колебания струн, контактного

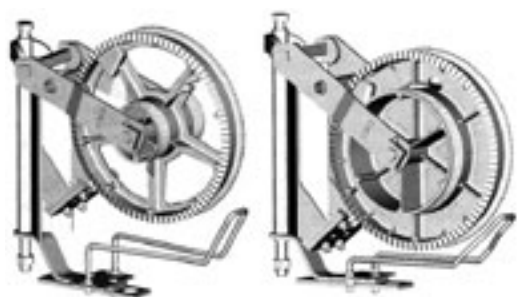


Рис. 4. Храповые натяжные устройства с передаточным числом 3:1 (слева) и 1,5:1 (справа)

провода и несущего троса, используя быстродействующие инфракрасные видеокамеры. Результаты наблюдений использовали для проверки результатов моделирования. При прохождении токоприемника (рис. 5) происходит подъем контактного провода и нижней клеммы крепления струны, при этом им сообщается определенное ускорение. Так как несущий трос и, следовательно, верхняя клемма крепления струны из-за инерции масс не сразу приходят в движение, происходит изгиб струны под действием продольной осевой нагрузки. В результате этого возникающие встречные колебательные движения контактного провода и несущего троса приводят к воздействию на струну растягивающей нагрузки, которая возрастает с увеличением скорости движения поезда.

На основе результатов моделирования был разработан испытательный стенд для одновременного испытания на вибропрочность девяти струн. При частоте колебаний до 10 Гц могут моделироваться реальные ускорения струн в диапазоне скорости до 350 км/ч. Величину динамических растягивающих усилий при этом можно увеличивать до 500 Н.

Струны, используемые в настоящее время на DBAG, соответствуют спецификациям. Случаи преждевременного выхода из строя могут иметь место лишь при сочетании нескольких неблагоприятных факторов. В качестве таких факторов можно назвать чувствительность бронзовых струн к изгибным нагрузкам, а также к перегибам в области наибольших переменных нагрузок. На основе полученных результатов были внесены усовершенствования в конструкцию струн (рис. 6), для изготовления которых стали использовать трос, устойчивый к изгибным нагрузкам.

Как показали испытания, усовершенствованные струны менее подвержены колебаниям и менее чувствительны к нагрузкам при

изготовлении, монтаже и эксплуатации. Их качество обеспечивается соблюдением специальных инструкций при изготовлении и проверке, стандартов предприятия и инструкций по монтажу. С 2005 г. они проходят эксплуатационные испытания на сети DBAG.

#### Результаты испытаний токоприемников

Результаты испытаний послужили также основой для усовершенствования токоприемников в следующих направлениях:

- соблюдение требований в отношении средних значений сил нажатия в контакте независимо от направления движения и расположения токоприемников в составе поезда;
- обеспечение как можно меньшего аэродинамического воздействия на силу нажатия в контакте со стороны искусственных сооружений и встречных поездов;
- управление силами в контакте с целью точного выполнения требований спецификации TSI Energie в отношении параметров, зависящих от скорости движения, например 175 Н при скорости движения 300 км/ч и 131 Н при 250 км/ч [1];
- использование конструктивных элементов, оптимизированных с точки зрения аэродинамики;
- обеспечение достаточной мощности по току и устойчивости к электрической дуге во всем диапазоне использования контактных накладок.

Измерение сил прижатия в контакте и температуры на рабочих токоприемниках при помощи датчиков с последующей обработкой результатов измерений в процессе эксплуатации или внедрение токоприемников с активным регулированием могут значительно снизить расходы на текущее содержание.

Для дальнейшего повышения качества токоприемников требуется выполнение следующих условий:

учет современного опыта в отношении высокопрочных контак-

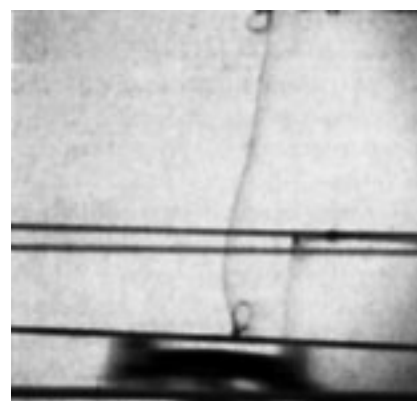


Рис. 5. Прохождение токоприемника под струной со скоростью 300 км/ч



Рис. 6. Оптимизированная струна подвески типа SICAT

ных проводов и струн цепной подвески при доработке стандартов (например, EN 50119);

- последовательное выполнение требований спецификации TSI Energie и европейских стандартов;
- расширение сотрудничества как в государственном, так и в международном масштабе между железнодорожными компаниями и предприятиями железнодорожной промышленности при дальнейшем совершенствовании компонентов системы токоcъема и условий их взаимодействия.

H. Schmidt, A. Schmieder. *Elektrische Bahnen*, 2005, № 4–5, S. 231–236; материалы концерна DBAG.