

Физические основы проектирования электротяговых сетей высокоскоростных железнодорожных магистралей



А. Т. Бурков,
д-р техн. наук,
профессор Петербургского
государственного
университета путей
сообщения Императора
Александра I (ПГУПС),
академик Российской
академии транспорта



В. В. Серонов,
канд. техн. наук,
доцент ПГУПС



Е. В. Кудряшов,
канд. техн. наук,
заместитель главного
инженера по НИОКР
АО «Универсал –
контактные сети»



О. А. Степанкая,
канд. техн. наук,
доцент ПГУПС

При повышении скорости движения поездов значительно увеличивается механическое и электрическое воздействие на устройства инфраструктуры железных дорог. В настоящее время нет подтвержденных опытом проектных значений основных параметров системы тягового железнодорожного электроснабжения для скоростей до 400 км/ч. В статье представлены обосновывающие материалы для принятия соответствующих норм и требований, которые использованы при разработке специальных технических условий для проектирования высокоскоростной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург.

Перед научным сообществом, проектировщиками и строителями нашей страны поставлена непростая задача по определению основных параметров устройств инфраструктуры будущих высокоскоростных магистралей (ВСМ). Сложность задачи обусловлена таким стратегическим показателем, как максимальная эксплуатационная скорость движения поездов – до 400 км/ч. В условиях коммерческой эксплуатации столь высокая скорость поездов не достигается ни в одной стране мира; предельные значения скорости на существующих ВСМ не превышают 350 км/ч. Как следствие, для скорости до 400 км/ч нет подтвержденных опытом

проектных значений основных параметров устройств инфраструктуры, в том числе устройств железнодорожного электроснабжения. При повышении скорости высокоскоростного электроподвижного состава (ЭПС) увеличиваются механические и электрические воздействия на элементы системы железнодорожного электроснабжения, причем основные нагрузки от этих воздействий испытывает электротяговая сеть. В таких условиях обязательно выполнение требований безопасности, определенных в [1]. Приоритетными задачами определения проектных параметров электротяговых сетей становятся следующие:

- реализация режимов передачи требуемого объема электроэнергии к движущимся высокоскоростным поездам с заданным уровнем напряжения;
- обеспечение надежного токоприема без отрывов токоприемника и дугообразования, с заданными параметрами нажатия контактирующих элементов, нормируемыми отжатыми контактного провода.

Передача электроэнергии к движущимся поездам с заданным уровнем напряжения

Электропотребление высокоскоростного ЭПС существенно больше, чем традиционного состава, движущегося со скоростью до 160 км/ч. Дополнительная энергия требуется для интенсивного



ФОТО: СЕРГЕЙ ТЮРИН

Таблица 1. Зависимость удельной мощности от значения интервала попутного следования

Интервал, мин	Расстояние между поездами, км	Удельная мощность, МВт/км
3	20,0	3,0
5	33,3	1,8
7	46,7	1,3
10	66,7	0,9
15	100,0	0,6
20	133,3	0,5
30	200,0	0,3

разгона до более высоких скоростей, а также для преодоления сил сопротивления движению на максимальных скоростях, при которых преобладает аэродинамическая составляющая. Для высокоскоростных линий с максимальной скоростью 250 км/ч и выше, характеризующихся малыми интервалами попутного следования поездов, удельная мощность электропотребления может достигать 2,5 МВт/км. Это более чем в два раза превышает электропотребление традиционных железных дорог [2].

Основные параметры электротяговых сетей определяют на основе известных воздействий на них электротяговой нагрузки. Последние можно получить с помощью расчетов электротяги. Эти расчеты представляют собой сложную инженерную задачу, для решения которой применяют специализированные программные комплексы. Один из наиболее распространенных – комплекс «КОРТЭС» (разработка ОАО «ВНИИЖТ»).

В результате электротяговых расчетов, выполненных в программном комплексе «КОРТЭС» методом математического моделирования движения ЭПС массой 700 т со скоростью около 400 км/ч установлено, что мощность его электропотребления может достигать

30 МВт (рис. 1). При этом особенность режима электропотребления на максимальной скорости до 400 км/ч состоит в мало зависящей от изменения профиля пути мощности электропотребления (см. кривую потребляемого ЭПС тока – около 1200 А – при питающем напряжении 25 кВ, 50 Гц).

То есть можно считать, что при такой высокой скорости режим электропотребления ЭПС близок к постоянному с мощностью, близкой к максимальной.

При таких нагрузках необходимо применять мощные системы тягового электроснабжения, чтобы обеспечить передачу требуемого объема энергии при поддержании заданного уровня напряжения на токоприемниках ЭПС [3]. В мировой практике высокоскоростного железнодорожного движения накоплен успешный опыт использования для таких целей подсистемы переменного тока 2×25 кВ, 50 Гц с автотрансформаторами. В частности, именно такая система использована на линии LGV EST (Франция), где был установлен действующий рекорд скорости на ВСМ – 574,8 км/ч.

Суммарная электрическая нагрузка на электротяговую сеть при движении на зоне питания нескольких высокоскоростных поездов определяется их

интервалом попутного следования. От значения этого интервала зависит удельная мощность, приходящаяся на 1 км электрифицированной линии. Если принять мощность высокоскоростного ЭПС равной 30 МВт при движении со скоростью 400 км/ч, то с помощью расчетов для двухпутной ВСМ можно определить значения удельной мощности электропотребления в зависимости от интервалов попутного следования поездов (табл. 1).

По представленным в таблице значениям можно заключить, что для ВСМ на скорости до 400 км/ч применима норма Международного союза железных дорог, установленная для линий со значениями скорости 300–330 км/ч. На основании указанной нормы рекомендовано рассчитывать мощность устройств тягового электроснабжения по уровню максимальной удельной мощности потребления энергии на тягу, равной 3 МВА/км [4].

Значения удельной мощности потребления на тягу поездов, приведенные в табл. 1, а также предварительно выбранные значения длины межподстанционных зон (МПЗ) – исходя из возможных мест расположения тяговых подстанций по результатам проектных изысканий – позволяют определить требуемую мощность трансформаторов тяговых подстанций (табл. 2).

На основании приведенных в табл. 2 данных выполняются уточняющие расчеты с помощью специализированных программных комплексов. В результате расчетов определяются значения параметров подстанций, а также основных электрических параметров элементов электротяговой сети (количество и сече-

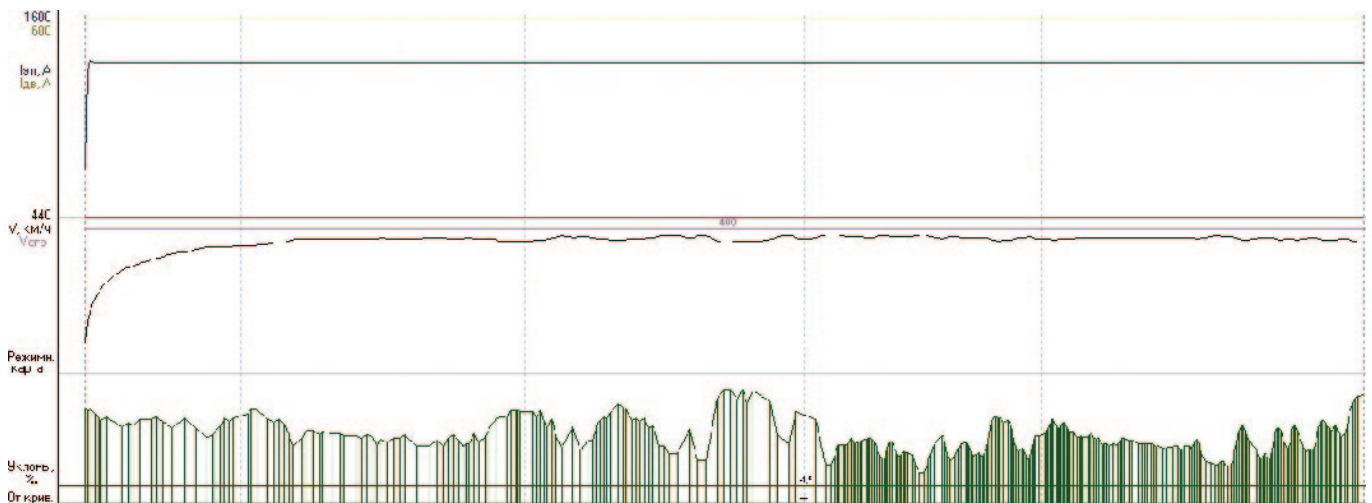


Рис. 1. Результаты расчета электротяги для электроподвижного состава массой 700 т:

$I_{эл}$ – ток, потребляемый ЭПС; V – скорость движения ЭПС

Таблица 2. Зависимость мощности нагрузки трансформаторов тяговых подстанций от значений интервала попутного следования электроподвижного состава и длины межподстанционных зон

Интервал, мин	Длина МПЗ, км	Максимально возможное количество поездов на одной МПЗ	Максимальная мощность нагрузки трансформаторов тяговых подстанций, МВА
3	50	6	180
	60	6	180
	70	8	240
5	50	4	120
	60	4	120
	70	6	180
7	50	4	120
	60	4	120
	70	4	120
10	50	2	60
	60	2	60
	70	4	120
15	50	2	60
	60	2	60
	70	2	60

Таблица 3. Мощности межподстанционных зон

Длина межподстанционной зоны, км	Мощность			
	$\Theta = 6$ мин		$\Theta = 15$ мин	
	Средняя часовая, МВА	Удельная, МВА/км	Средняя часовая, МВА	Удельная, МВА/км
38	69,1	1,82	28,7	0,75
70	108,2	1,55	48,4	0,69
69	105,6	1,53	47,5	0,69
70	106,4	1,52	47,9	0,68
68,3	106,6	1,56	47,2	0,69

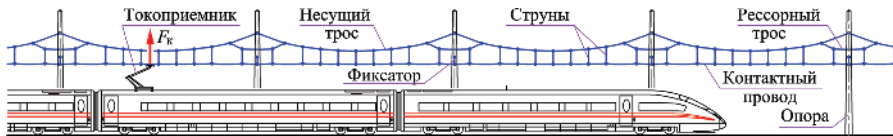


Рис. 2. Электроподвижной состав, контактная подвеска и ее основные элементы

ние проводов питающих и отсасывающих линий, проводов контактной сети, мощности дроссель-трансформаторов) с учетом недопустимости перегрузки (перегрева) оборудования и соблюдения требуемых уровней напряжения на токоприемниках ЭПС.

Такие расчеты также выполнены с использованием программного комплекса «КОРТЭС» для участка с заданным профилем пути протяженностью 315,3 км (рис. 1). Для расчетов принята система переменного тока 2x25 кВ, 50 Гц с размещением тяговых подстанций, установленная мощность трансформаторов 100 МВА (по 50 МВА на каждое плечо питания), длина МПЗ выбрана произвольно. Схема питания электротяговой сети – параллельная, узловая, электротяговая сеть типа VzII-120 + CuMg-150 + M-150 (пит.) + A-150 (экр.) + 2P-65. Расчеты выполнены для равномерного графика движения поездов с двумя различными интервалами попутного следования Θ : 6 и 15 мин. Полученные

значения мощности МПЗ представлены в табл. 3.

Из результатов расчетов также следует, что для принятых параметров электротяговой сети при интервале попутного следования 6 мин на большинстве МПЗ не выдерживаются требования к минимальному уровню напряжения на токоприемнике: наблюдается уровень напряжения ниже 19 кВ. На подстанциях происходит кратковременная перегрузка силовых трансформаторов по мощности на 1- и 10-минутном интервалах. Температурный режим работы трансформаторов близок к предельному, в отдельных случаях зафиксировано превышение допустимых значений температуры обмоток и масла. С увеличением интервала попутного следования до 15 мин минимальные значения напряжения на токоприемнике устанавливаются в пределах нормированных требований, не ниже уровня 21 кВ. Перегрузок и перегрева трансформаторов при этом не наблюдается.

Таким образом, полученные результаты совпадают со значениями параметров, приведенными в табл. 1 и 2, что позволяет использовать их при обосновании норм и требований к устройствам тягового электроснабжения при проектировании и строительстве ВСМ со скоростями до 400 км/ч.

Обеспечение надежного токосъема

Одна из наиболее сложных инженерных проблем, которую необходимо решить при проектировании электротяговой сети ВСМ, – обеспечение надежного токосъема при передаче электрической энергии через скользящий контакт между токоприемником ЭПС и контактным проводом (рис. 2). При отрывах токоприемника от контактного провода или при недостаточной силе контактного нажатия F_k возникает электрическая дуга, что приводит к усиленному электрическому износу контактирующих элементов и ухудшает работу тягового оборудования ЭПС. При слишком сильном нажатии увеличивается механический износ, возникает опасность серьезных повреждений вследствие отжатия контактного провода на недопустимую высоту и зацепления токоприемником элементов конструкции контактной подвески.

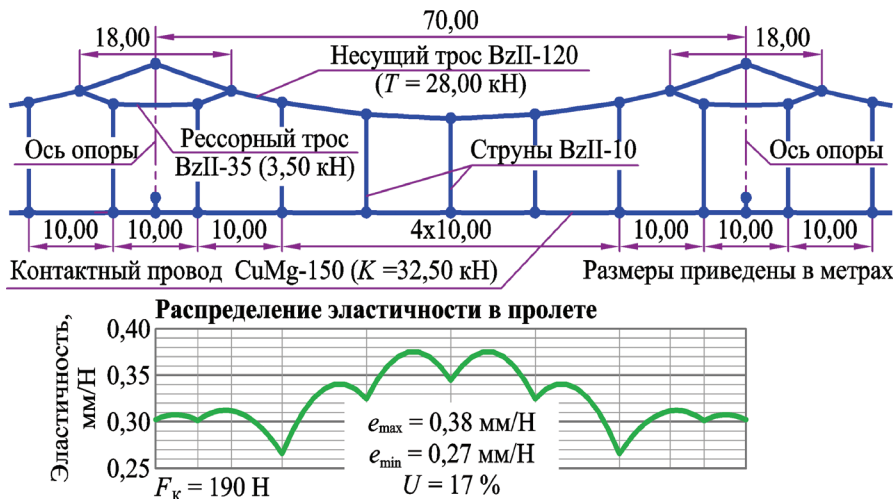


Рис. 3. Схема пролета контактной подвески и кривая распределения эластичности

При высокой скорости движения сила контактного нажатия F_k меняется во времени в широких пределах из-за знакопеременной динамической составляющей, зависящей от приведенных масс и вертикальных ускорений элементов токоприемника и контактной подвески. Чтобы уменьшить разброс силы F_k , необходимо решить задачу о механическом взаимодействии токоприемника и контактной подвески при заданных значениях скорости ЭПС.

На первом этапе данная задача обычно рассматривается в квазистатическом приближении. Воздействие токоприемника заменяется силой постоянной величины, действующей на контактный провод снизу вверх. Под действием силы F_k контактный провод поднимается на высоту Δh_k , значение которой меняется в разных точках пролетов. Величину $e = \Delta h_k / F_k$ называют эластичностью контактной подвески в данной точке. Для оценки неравномерности эластичности используют величину

$$U = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\max} + e_{\min}} \cdot 100\%,$$

где e_{\max} и e_{\min} – значения максимальной и минимальной эластичности в пролете, соответственно.

На рис. 3 приведена кривая изменения эластичности в пролете одного из вариантов контактной подвески, рассматриваемого для применения на участке Москва – Казань ВСМ Москва – Казань – Екатеринбург. Подвеска состоит из бронзового несущего троса сечением 120 мм² с натяжением $T = 28$ кН, контактного провода из сплава CuMg0,5 сечением 150 мм² с натяжением $K = 32,5$ кН и струн из гибких мелкожильных бронзовых тросов. Для вы-

равнивания эластичности в зоне опор используются рессорные тросы сечением 35 мм². Максимальная длина пролета составляет 70 м.

Считается, что чем равномернее кривая распределения эластичности в пролете, тем ближе к прямолинейной траектория движения полоза токоприемника при взаимодействии с контактной подвеской и, следовательно, тем меньше разброс силы F_k . К сожалению, квазистатическое приближение дает приемлемую оценку только при малой скорости движения. На высокой скорости из-за возрастающей роли колебательных и волновых процессов при взаимодействии токоприемника и контактной подвески не прослеживается однозначной зависимости между неравномерностью эластичности подвески и качеством токосъема. Поэтому важнее второй этап решения задачи – в динамической постановке.

В динамике контактная подвеска должна рассматриваться как система с распределенными параметрами. При возмущающих воздействиях от токоприемника по контактной подвеске распространяются поперечные волны. Если упрощенно представить подвеску как бесконечную однородную натянутую гибкую нить, то из волнового уравнения гибкой нити можно определить скорость распространения поперечной волны:

$$V_0 = \sqrt{H/m},$$

где H и m – соответственно, натяжение и погонная масса нити.

Для практических расчетов в качестве натяжения H обычно принимается суммарное натяжение несущего троса и

контактного провода, а в качестве массы m – их суммарная погонная масса. При приближении скорости движения к скорости распространения волны V_0 качество токосъема резко ухудшается. Скорость V_0 – недостижимая физическая граница для скорости движения ЭПС по условию токосъема (подобно тому, как скорость звука является недостижимой границей скорости для несверхзвуковых самолетов).

Чтобы увеличить скорость распространения волны по контактной подвеске, приходится повышать удельное натяжение проводов – использовать высокопрочные провода из специальных бронзовых сплавов. Согласно международным нормам, максимальная эксплуатационная скорость движения ЭПС должна составлять не более 70 % скорости распространения волны по контактной подвеске [5]. Для рассматриваемого варианта контактной подвески скорость распространения волны V_0 равна 573 км/ч. Максимальная скорость движения ЭПС 400 км/ч составляет 69,8 % от V_0 .

Реальная конструкция контактной подвески существенно сложнее однородной натянутой нити. Волны, распространяющиеся по проводам, многократно отражаются от струн, фиксаторов, анкерных и других элементов подвески, поэтому качество токосъема зависит не только от удельного натяжения проводов, но и от других параметров контактной подвески и ее узлов (длины пролетов, числа и расположения струн и т. д.).

Для расчетов реальных колебательных и волновых процессов и оценки качества токосъема приходится строить достаточно сложные математические модели контактной подвески на основе метода конечных элементов. В России такая модель, названная UKS-Dynamic, разработана АО «Универсал – контактные сети» в сотрудничестве с кафедрой «Прикладная математика» СПбГПУ [6]. Модель позволяет исследовать динамику взаимодействия контактной подвески с одним или несколькими токоприемниками.

На рис. 4 приведены результаты моделирования взаимодействия двух токоприемников высокоскоростного ЭПС и рассматриваемой контактной подвески на скорости 350 км/ч. Данные, характеризующие качество токосъема, снимались в пяти расчетных пролетах между опорами 11–16. На рис. 4 пред-

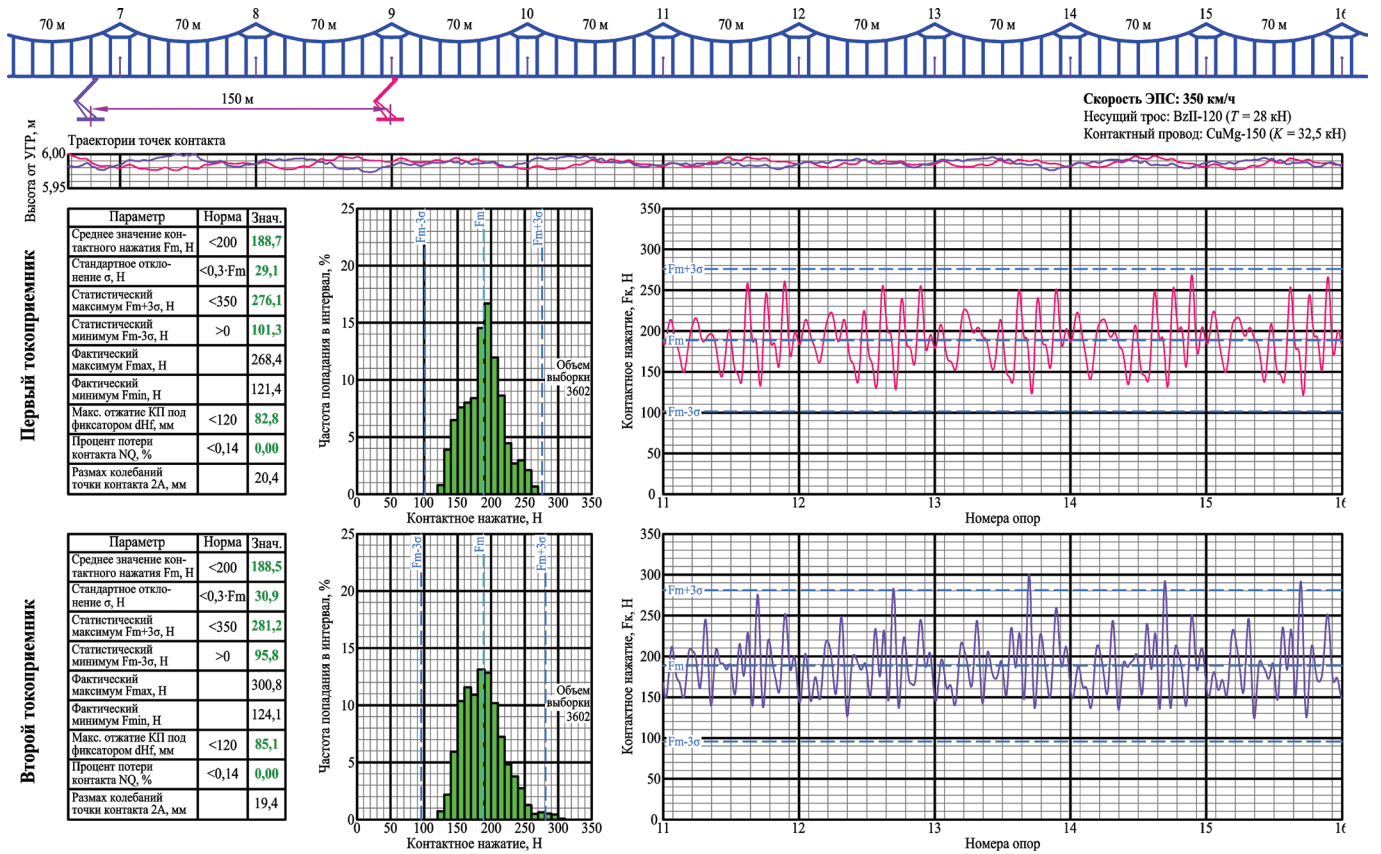


Рис. 4. Результаты моделирования динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески, предлагаемой для реализации на участке Москва – Казань ВСМ Москва – Казань – Екатеринбург

ставлены результаты расчета для каждого токоприемника: траектории точек контакта полозьев с контактным проводом, кривые изменения контактного нажатия в расчетных пролетах, гистограммы контактного нажатия, таблицы значений основных интегральных параметров, характеризующих качество токосъема, в сравнении с нормируемыми значениями по международным стандартам.

Основной результат моделирования – зависимость силы контактного

нажатия F_k от времени (или положения токоприемника). Статистический анализ распределения силы F_k позволяет наиболее объективно оценивать качество токосъема. Степень разброса контактного нажатия относительно среднего значения F_m характеризуется стандартным отклонением σ . Согласно международному стандарту IEC 60913, качество токосъема считается удовлетворительным, если статистический минимум контактного нажатия $F_m - 3\sigma$ положителен, а статистический

максимум $F_m + 3\sigma$ не превышает 350 Н (при скорости до 350 км/ч) [5]. Дополнительно контролируются процент искрения и отжатие контактного провода токоприемником под фиксатором. Из результатов, приведенных на рис. 4, видно, что у токоприемников ЭПС при взаимодействии с контактной подвеской на скорости 350 км/ч качество токосъема удовлетворительное.

Один вычислительный эксперимент на модели позволяет судить о качестве токосъема только при заданном значении скорости. При других значениях могут возникать нежелательные резонансные явления с ухудшением качества токосъема, поэтому моделирование необходимо выполнить многократно для всего диапазона значений эксплуатационной скорости. Результаты такого расчета удобно представить в виде графиков зависимости статистических параметров контактного нажатия (среднего значения F_m , статистического максимума $F_m + 3\sigma$ и статистического минимума $F_m - 3\sigma$) от скорости ЭПС. Такие зависимости для рассматриваемой контактной подвески в диапазоне значений скорости от 300 до 420 км/ч приведены на рис. 5 (моделирование выполнялось с шагом 5 км/ч). Как вид-

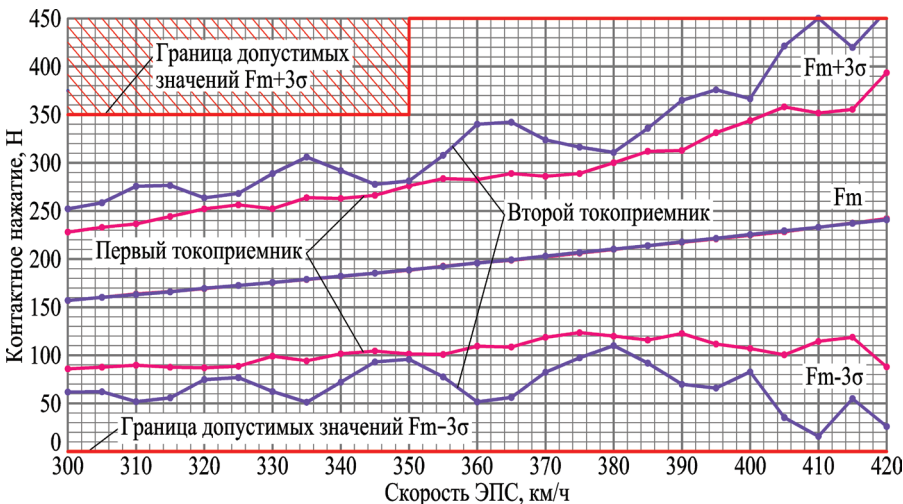


Рис. 5. Зависимость параметров контактного нажатия от скорости

но, при значениях скорости около 410, 360 и 335 км/ч наблюдаются локальные резонансы для второго токоприемника с некоторым ухудшением токосъема. Волна, возбуждаемая первым токоприемником, при указанных значениях скорости доходит до второго токоприемника в неблагоприятной фазе и ухудшает условия его работы. Тем не менее, в диапазоне значений до 410 км/ч параметры токосъема остаются в нормируемых пределах.

Чтобы убедиться в приемлемом качестве токосъема при различных условиях, результаты, аналогичные показанным на рис. 5, необходимо получить для всего диапазона значений длин пролетов, которые могут быть приняты при проектировании. При этом должны рассматриваться не только промежуточные пролеты, но и переходные пролеты на сопряжениях анкерных участков, зоны средней анкеровки, воздушные стрелки и другие узлы контактной подвески. В процессе такого многофакторного анализа варьируются и подбираются наиболее рациональные значения параметров контактной подвески и ее узлов.

Предварительные исследования по подбору параметров контактной подвески для российских ВСМ выполнены в рамках предпроектных работ по обоснованию инвестиций в строительство и по разработке специальных технических условий для проектирования ВСМ Москва – Казань – Екатеринбург. Предложенный вариант контактной подвески (см. рис. 3) обеспечивает удовлетворительное качество токосъема при скорости движения до 400 км/ч. На стадии проектирования контактной сети ВСМ предстоит уточнить результаты исследований с учетом фактических параметров тех токоприемников, которые будут устанавливаться на высокоскоростном ЭПС.

Литература

1. Технический регламент Таможенного Союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»: утв. решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710.
2. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: Общий курс: учеб. пособие. В 2 т. / И. П. Киселёв и др.; под ред. И. П. Киселёва. Т. 1. М.: Учеб.-метод.

центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2014. 308 с.

3. Специальные технические условия «Железнодорожное электроснабжение участка Москва – Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Казань – Екатеринбург. Технические нормы и требования к проектированию и строительству»: утв. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М. 46 с.
4. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. Сооружения и устройства. Подвижной состав. Организация перевозок. В 2 т. / под общ. ред. В. И. Ковалёва. Т. 2. СПб.: Выбор, 2003. 448 с.
5. IEC 60913. Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines, 2013.
6. Григорьев Б. С., Головин О. А., Викторов Е. Д., Кудряшов Е. В. Математическое моделирование механического взаимодействия токоприемников и контактной подвески для скоростных электрифицированных железных дорог // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. № 4. С. 155–162.



МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
InterLogistika
КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ В ТРАНСПОРТЕ И ЛОГИСТИКЕ

InterLogistika – форум профессионалов!

8-11 сентября 2015
Россия. Москва.
МВЦ «Крокус Экспо»



Организаторы:



Международный выставочный центр

Тел./Факс: +7 (495) 961 22 62
E-mail: interlog-expo@mediaglobe.ru
www.interlog-expo.ru





**Транспорт.
Экспедирование.
Логистика.**



**Складская
логистика**



**Транспортно-
логистическая
инфраструктура**



**IT-технологии
в логистике**



**Городская
логистика**



**Логистика в
электронной
торговле**



**Логистика
в таможене
и ВЭД**



**Стандартизация.
Сертификация.
Услуги**



**Образование
в логистике**