

Разработка контактной сети для высокоскоростного движения на основе методов математического моделирования

Кудряшов Е. В.

ЗАО «Универсал – контактные сети», Санкт-Петербург, Россия

В нашей стране до последнего времени выбор параметров узлов контактной сети в процессе ее разработки осуществлялся на основе прикладных инженерных расчетов по упрощенным методикам и данным экспериментальных исследований [1, 2]. При повышении скоростей движения условия работы контактной сети существенно усложняются. Как показала практика проектирования контактной сети для скоростей более 200 км/ч и ее испытания на участке Калашниково – Лихославль Октябрьской железной дороги в 2005–2008 гг. [3], традиционные методы расчетов не позволяют определять параметры узлов высокоскоростной контактной сети с необходимой степенью достоверности. Например, усредненное расхождение результатов расчета эластичности контактной подвески и данных эксперимента составило более 15%, а для отдельных пролетов превысило 24%. Столь значительное расхождение объясняется тем, что в традиционных методах расчета использовались эмпирические зависимости и коэффициенты, значения которых имелись только для подвесок для обычных скоростей движения. Отметим, что проведение натурных экспериментов для уточнения эмпирических зависимостей является чрезвычайно дорогостоящим мероприятием.

Во всем мире для выбора рациональных параметров узлов высокоскоростной контактной сети все более широко применяются методы расчетов на основе комплексного математического моделирования [4]. При этом контактная сеть рассматривается как сложная электромеханическая система с распределенными параметрами, учитывается ее взаимодействие с внешней средой и другими системами, а также многовариантность исполнений узлов. Высокая степень детализации и учет большого количества факторов при построении математических моделей стали возможными благодаря развитию компьютерной техники и вычислительных методов в последние десятилетия.

Для выбора параметров узлов контактной сети в процессе ее разработки необходимо выполнение моделирования нескольких видов. Рассмотрим основные из них.

1. Моделирование токораспределения и нагрева элементов контактной сети осуществляется с целью выбора рациональных сечений проводов и токопроводящих струн, а также количества и местоположения электрических соединителей. Электрические и тепловые процессы в контактной сети моделируются при прохождении пакета высокоскоростных

поездов в расчетном режиме максимальной температуры с учетом дополнительного нагрева проводов солнечной радиацией.

В России к настоящему времени математические модели токораспределения и нагрева элементов подвески разработаны во ВНИИЖТ для контактной сети постоянного тока [3]. Для контактной сети переменного тока построение аналогичных моделей представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Значительные наработки в области моделирования тепловых процессов в контактной сети с учетом взаимодействия с токоприемниками имеются в Уральском государственном университете путей сообщения (УрГУПС) [5, 6]. В частности, в работе [6] предложена новая математическая модель для аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети на основе метода конечных элементов (МКЭ), в которой воздушный поток оказывает на провода одновременно силовое и конвективное охлаждающее воздействие.

2. Моделирование контактной подвески как механической системы в статике позволяет:

- рассчитывать длины струн;
- выполнять расчеты пространственного положения и натяжений проводов и струн;
- определять характеристики эластичности контактной подвески;
- оптимизировать параметры узлов по критериям минимизации неравномерности эластичности и выравнивания квазистатической траектории точки контакта;
- изучать чувствительность статических характеристик подвески к отклонениям монтажных параметров.

В компании «Универсал – контактные сети» (УКС) разработаны детальные статические модели контактной подвески при минимальном числе принятых допущений [7].

Модели УКС (рис. 1) построены на основе МКЭ. Решение задачи статики выполняется в пространственной нелинейной постановке, что позволяет учесть изменение натяжений проводов в пределах анкерного участка, а также упругое растяжение проводов.

При расчете натяжений элементов автоматически учитываются углы, под которыми соединены провода и струны, влияние реакций поворотных консолей и фиксаторов, влияние упругого растяжения проводов и другие факторы (рис. 2).

Адекватность моделей УКС подтверждена сравнением результатов расчета эластичности контактной подвески с экспериментальными данными, полученными на участке Калашниково – Лихославль специалистами Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС) в ходе испытаний 2006–2008 гг.

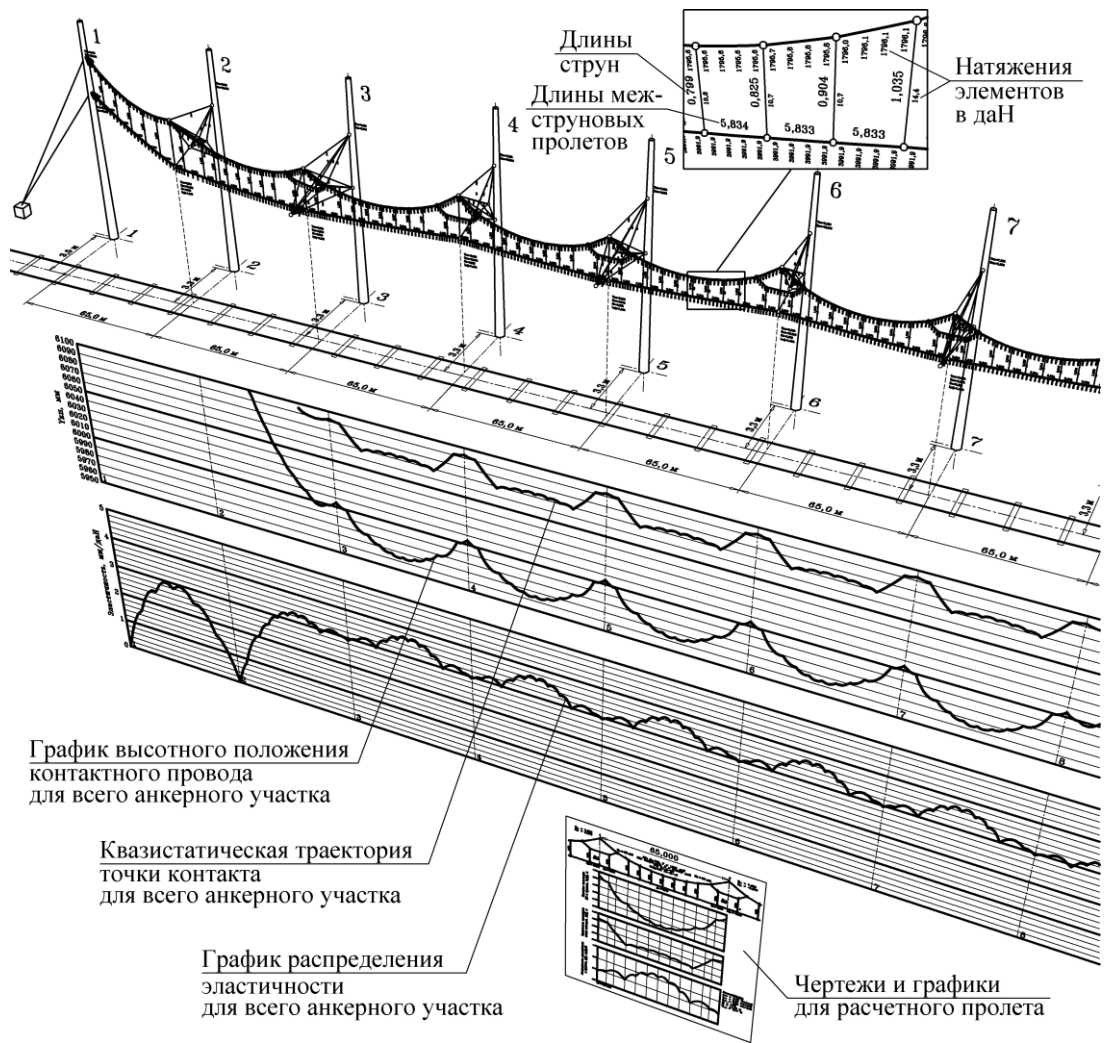


Рис. 1. Статическая конечноэлементная модель контактной подвески УКС

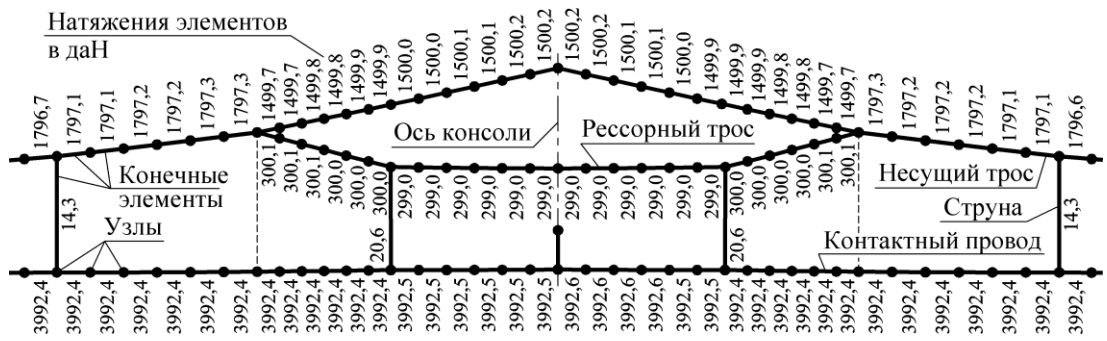


Рис. 2. Натяжения элементов в опорном узле контактной подвески КС-200-07

Сравнение результатов расчета и эксперимента для одного из пролетов приведено на рис. 3. Там же показано распределение эластичности, рассчитанное по ранее применявшейся методике, описанной в [1]. В расчете на основе модели УКС учитывается межструновая эластичность. Данные эксперимента и расчета по методике [1] имеются только под струнами, поэтому на графиках соответствующие точки соединены прямыми линиями. Для рассматриваемого пролета расхождение данных эксперимента и

расчета δ_{Σ} на основе модели УКС составило менее 2%. Расхождение с расчетом по ранее применявшейся методике превышает 24%.

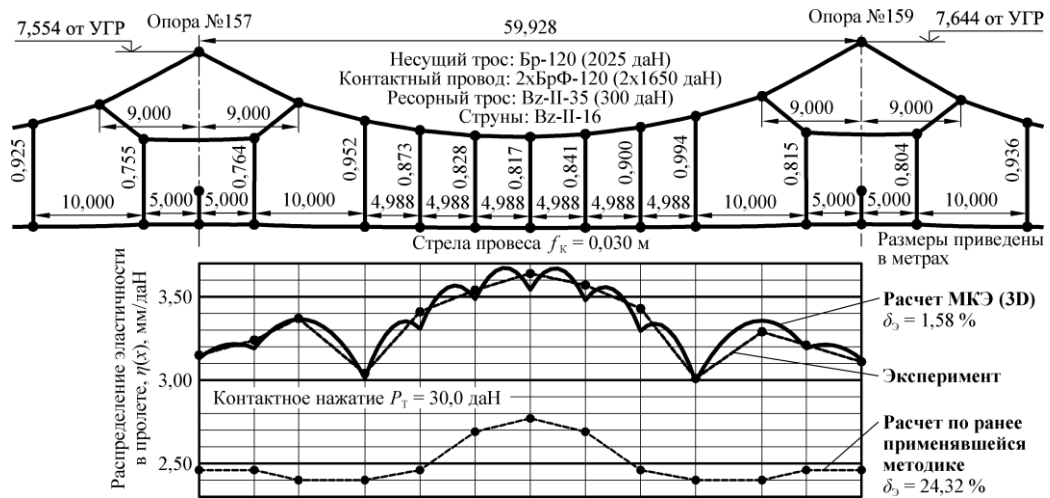


Рис. 3. Сравнение результатов расчета эластичности с экспериментальными данными для пролета 157–159 участка Калашниково–Лихославль

Анализ чувствительности относительной неравномерности эластичности U и размаха квазистатической траектории точки контакта A_T к варьированию конструктивных параметров подвески позволяет определять их наиболее рациональные значения. В качестве примера на рис. 4 показаны зависимости статических характеристик подвески КС-200-07 (32-07) к варьированию натяжения рессорного троса $H_{РТ}$. Как видно из графиков, по критерию уменьшения неравномерности эластичности натяжение рессорного троса имеет некоторое оптимальное значение (при прочих фиксированных параметрах).

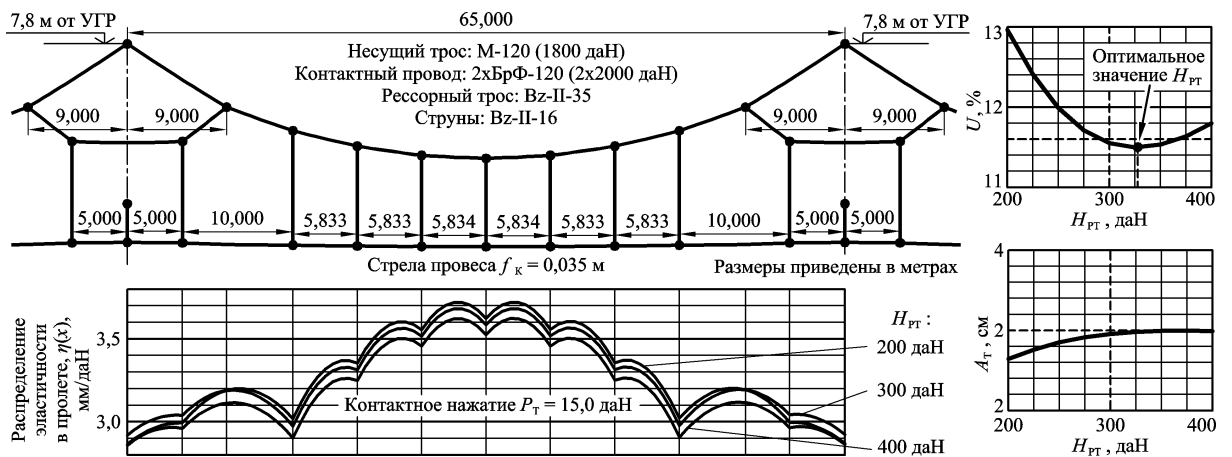


Рис. 4. Чувствительность статических характеристик контактной подвески КС-200-07 к варьированию натяжения рессорного троса $H_{РТ}$

Появление у разработчиков нового мощного инструмента в виде математических моделей позволяет переосмыслить некоторые принятые ранее технические решения по высокоскоростной контактной сети. Напри-

мер, на рис. 5а показано распределение эластичности и квазистатическая траектория точки контакта для контактной подвески КС-200-07 (32-07), предназначенной для скоростей движения до 250 км/ч.

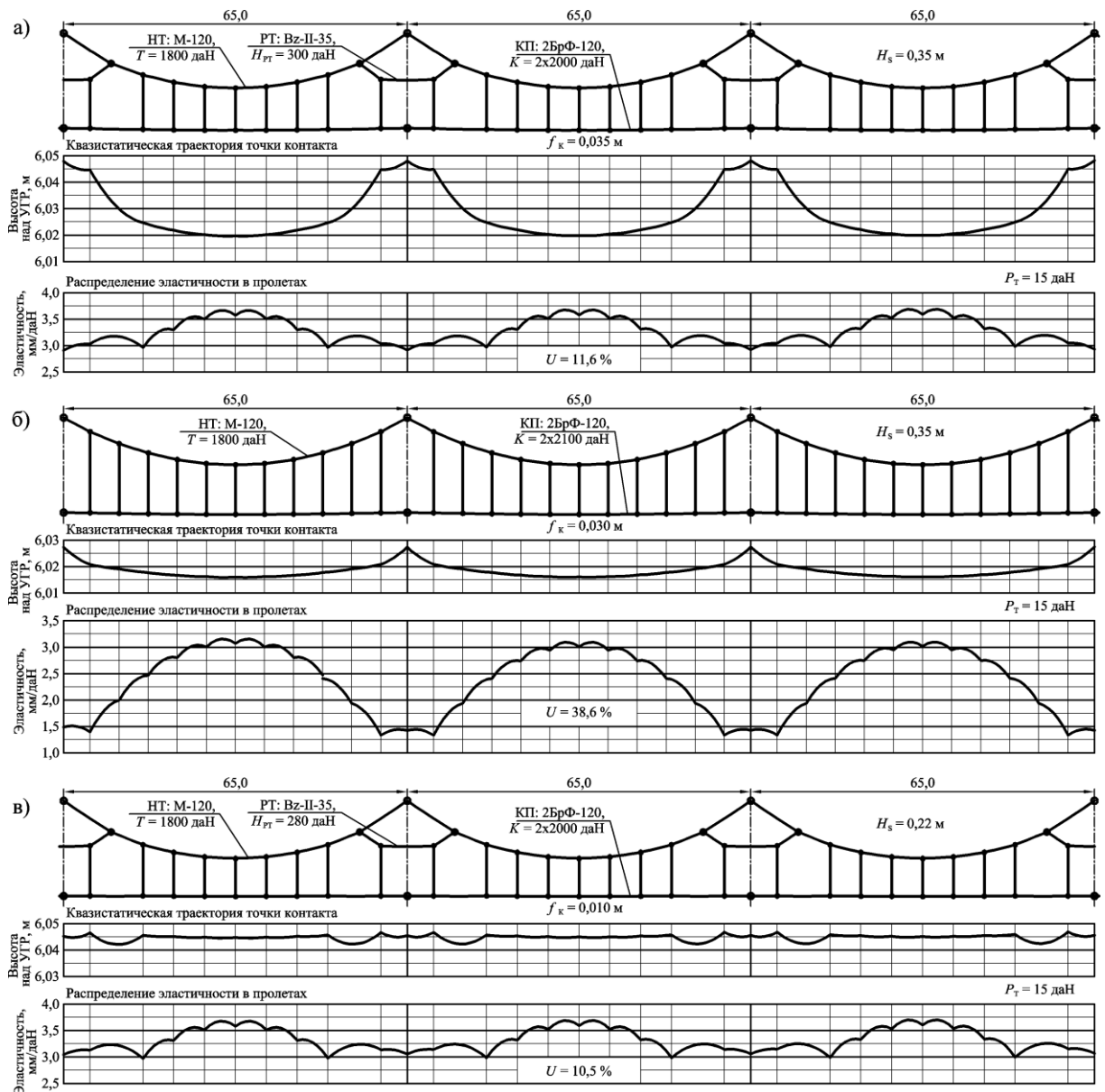


Рис. 5. Статические характеристики контактных подвесок:
 а) – КС-200-07 (32-07), б) – экспериментальный нерессорный вариант (XIII а.у. перегона Калашниково–Лихославль), в) – возможный вариант

На графике траектории точки контакта видны характерные «провалы» в районе опор, отрицательно сказывающиеся на взаимодействии подвески и токоприемников. Интересно, что аналогичная траектория для варианта нерессорной контактной подвески (такой вариант испытывался на участке Калашниково – Лихославль в 2006 г.) – более гладкая (рис. 5б). По мнению автора это явилось одной из причин, по которой в процессе испытаний не было выявлено преимуществ рессорной подвески по отношению к нерессорной, хотя в теории рессорная подвеска должна показывать луч-

шие результаты по качеству токосъема. Подбор более рациональных значений некоторых параметров схемы подвески КС-200-07 (32-07) позволяет выровнять траекторию точки контакта, улучшить неравномерность эластичности, т.е. обеспечить более благоприятные условия для токосъема (рис. 5в). В числе уточненных параметров – расстояние по вертикали от оси контактного провода в месте фиксации до центра шарнирного сочленения дополнительного фиксатора со стойкой H_S , стрела провеса контактного провода в пролете f_K , номер струны от которой начинается стрела провеса в пролете и натяжение рессорного троса H_{PT} .

Еще одна важная область применения статических моделей – изучение чувствительности статических характеристик подвески к отклонениям монтажных параметров с целью определения рациональных значений монтажных допусков и совершенствования технологии высокоточной регулировки контактной подвески [8]. В качестве примера на рис. 6 показано влияние точности задания параметра фиксатора H_S , варьируемого на опоре 2, на положение контактного провода в пролете контактной подвески КС-200-07 (32-07). Проектное значение $H_S = 0,35$ м. Отклонение задаваемого при монтаже параметра H_S от проектного значения приводит к появлению заметного перепада высот контактного провода на смежных опорах ΔH_0 , а также к изменению стрелы провеса контактного провода f_K .

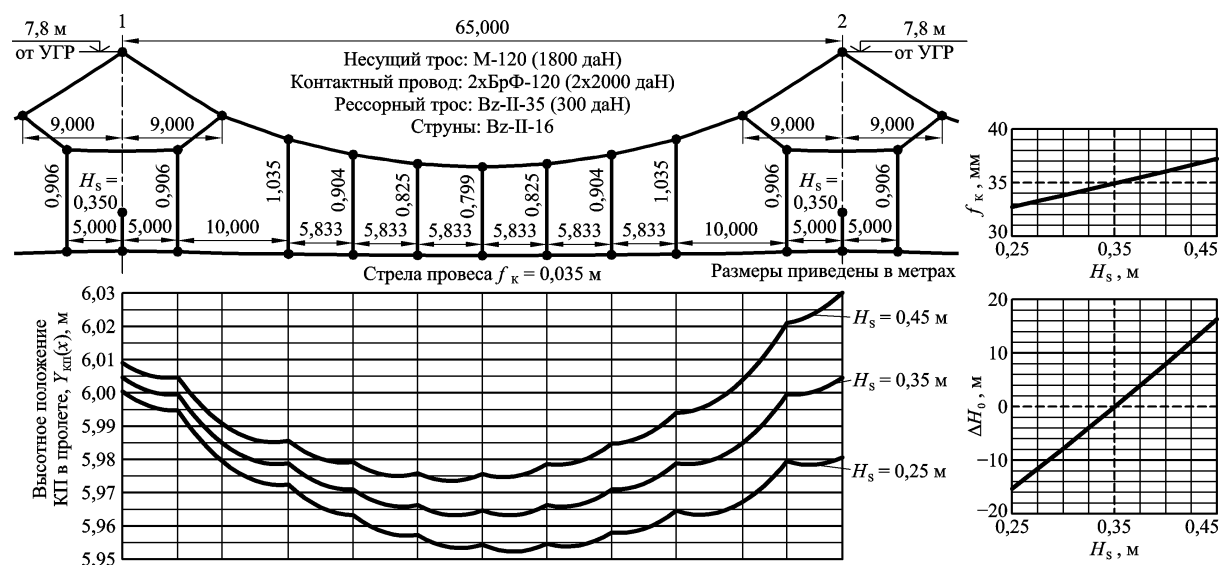


Рис. 6. Чувствительность параметров регулировки контактного провода подвески КС-200-07 (32-07) к точности задания параметра H_S на опоре 2

Проекты КС-200-07 и 37-07 не содержат допусков на возможный разброс значений H_S . На практике проектное значение H_S часто не соблюдается, что заметно даже невооруженным глазом (рис. 7). Очевидно, это является одной из причин неудовлетворительной регулировки скоростной контактной подвески, которая имеет место на реальных участках. С другой стороны, как показывают проведенные автором исследования, многие монтажные допуски, указанные в проектах, являются чрезмерно жесткими.

Их послабление позволило бы сократить время, затрачиваемое на регулировку контактной подвески, без оказания влияния на конечный результат.



Рис. 7. Различные значения параметра H_S на опорах одного анкерного участка (перегон Саблино–Тосно Октябрьской железной дороги, реконструкция 2006 г.)

На базе разработанных математических моделей и вагона-лаборатории испытаний контактной сети (ВИКС) возможно создание экспертной системы, которая на основе измерений геометрических параметров регулировки контактной подвески на реальном участке сможет выдавать конкретные рекомендации по устранению нарушений регулировки.

3. Моделирование поведения контактной подвески при изменении внешних воздействий выполняется с целью проверки параметров узлов в различных условиях эксплуатации с учетом влияния климатических факторов (изменение температуры, воздействия ветра и гололеда), а также износа контактного провода.

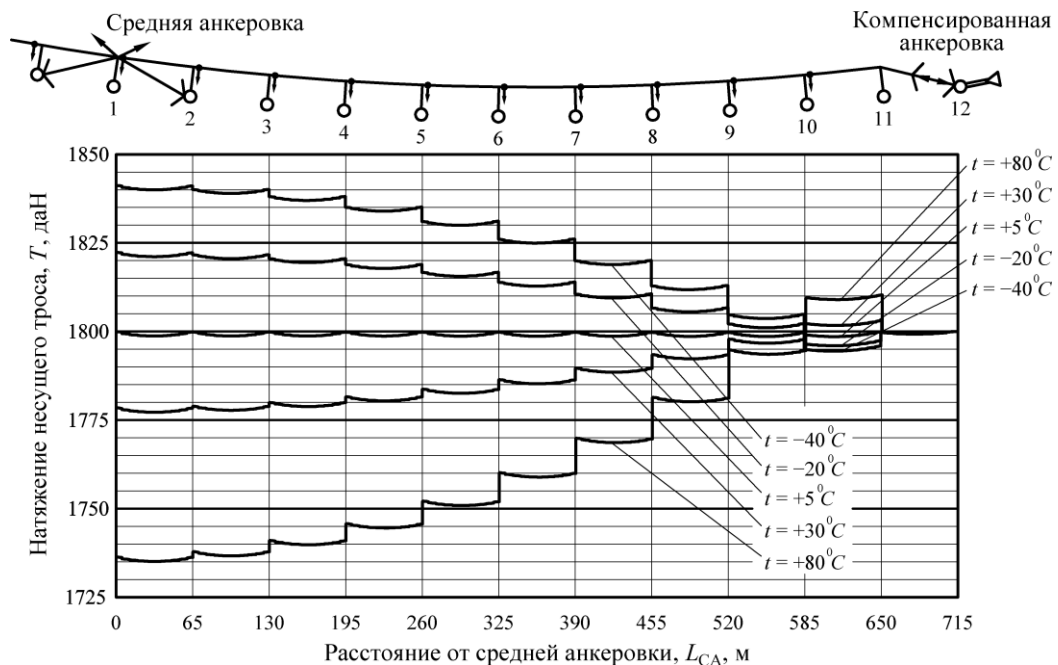


Рис. 8. Расчет натяжения несущего троса контактной подвески КС-200-25 при различной температуре проводов t на внешней стороне кривой радиусом 2000 м

В качестве примера на рис. 8 приведен расчет изменения натяжения несущего троса компенсированной контактной подвески КС-200-25 в пре-

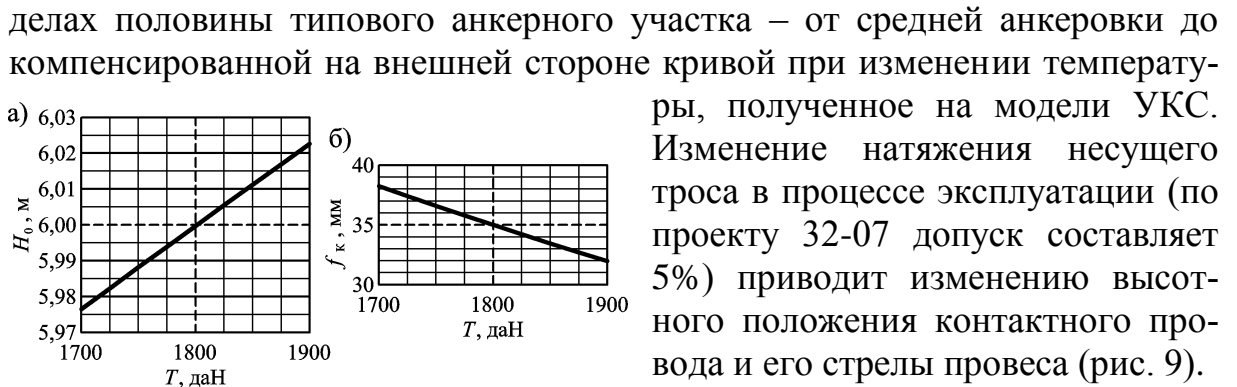


Рис. 9. Графики чувствительности номинальной высоты (H_0) и стрелы провеса контактного провода (f_k) к изменению натяжения несущего троса T

делах половины типового анкерного участка – от средней анкеровки до компенсированной на внешней стороне кривой при изменении температуры, полученное на модели УКС. Изменение натяжения несущего троса в процессе эксплуатации (по проекту 32-07 допуск составляет 5%) приводит к изменению высотного положения контактного провода и его стрелы провеса (рис. 9).

В качестве другого примера на рис. 10 показано рассчитанное на модели отклонение в плане проводов подвески КС-200-07 (32-07) при действии поперечного ветра,

а также зависимость высотного положения контактного провода в пролете от скорости ветра V . Из-за разносторонних фиксаторов высотное положение контактного провода в пролете становится несимметричным при воздействии ветра, так как на одном из фиксаторов при воздействии ветра возникает вертикальное усилие, направленное вверх, а на другом – вниз.

Эффект изменения высотного положения контактного провода и появления перепадов высот ΔH_0 на смежных опорах может проявляться при измерениях параметров регулировки подвески ВИКС с опущенным токоприемником в ветряную погоду. При этом данные изменений будут свидетельствовать о худшей регулировке, чем она есть в действительности.

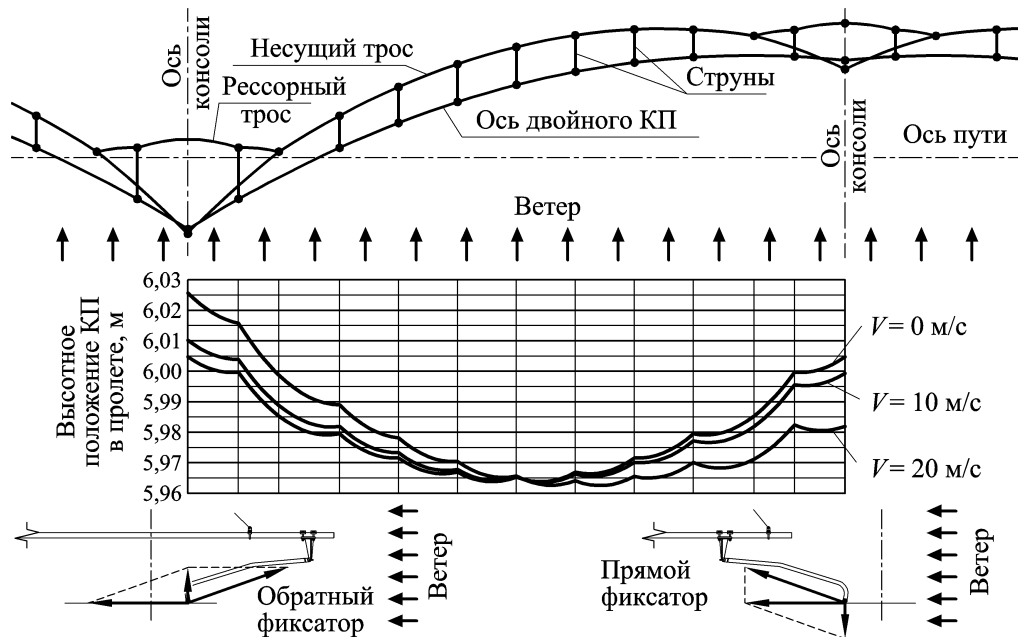


Рис. 10. Отклонение контактного провода подвески КС-200-07 (32) при воздействии поперечного ветра

4. Моделирование динамики контактной подвески как отдельной системы выполняется с целью уточнения ее ключевых физических параметров, таких как скорость распространения волны, а также для определения спектра собственных частот и резонансных скоростей движения.

Динамическая модель контактной подвески на основе МКЭ разработана УКС совместно с кафедрой «Прикладная математика» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ).

В процессе расчета предварительно определяется равновесное состояние контактной подвески, для чего используется рассмотренная выше пространственная статическая модель, затем модели контактной подвески

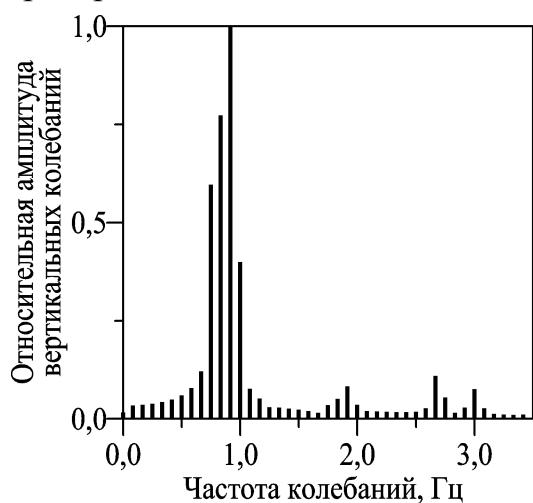


Рис. 11. Спектр собственных частот контактной подвески КС-200-25

сообщается возмущающее воздействие в виде оттягивания и отпускания контактного провода в заданном месте (либо – удара по контактного проводу). После этого для выбранного узла конечноэлементной сетки снимаются зависимости вертикальных и поперечных колебаний от времени и выполняется спектральный анализ.

В качестве примера на рис. 11 показан спектр собственных частот контактной подвески КС-200-25, рассчитанный на модели УКС-СПбГПУ. Основная собственная частота колебаний

подвески составляет 0,92 Гц, а резонансная скорость движения электроподвижного состава – 215 км/ч. Близость резонансной скорости к расчетной эксплуатационной (200 км/ч) является нежелательным фактором, который может отрицательно сказываться на качестве токосъема. Целесообразно было бы изменить некоторые параметры узлов контактной подвески (например, натяжение несущего троса), чтобы увеличить разницу между резонансной и эксплуатационными скоростями.

5. Моделирование динамического взаимодействия токоприемников и контактной подвески позволяет изучать влияние параметров этих систем непосредственно на качество токосъема, которое оценивается на основе статистического анализа изменения контактного нажатия и траектории точек контакта. В соответствии с мировым опытом, модели взаимодействия «токоприемники – контактная подвеска» являются основным инструментом при разработке и совершенствовании контактной сети для высоких скоростей движения.

В России детальные динамические модели взаимодействия токоприемников и контактной подвески разработаны в УрГУПС [5], а также в 2011 г. в УКС, совместно с СПбГПУ.

В качестве примера на рис. 12 показаны результаты моделирования взаимодействия типового европейского скоростного токоприемника и контактной подвески КС-200-25 на модели УКС-СПБГПУ при скорости 250 км/ч. (Отметим, что подвеска КС-200-25 рассчитывалась на скорости 200-230 км/ч). Почти все параметры, характеризующие качество токосъема, даже при такой скорости укладываются в нормируемые международными стандартами значения, за исключением статического минимума контактного нажатия, которое составило меньше рекомендуемых 40 Н.

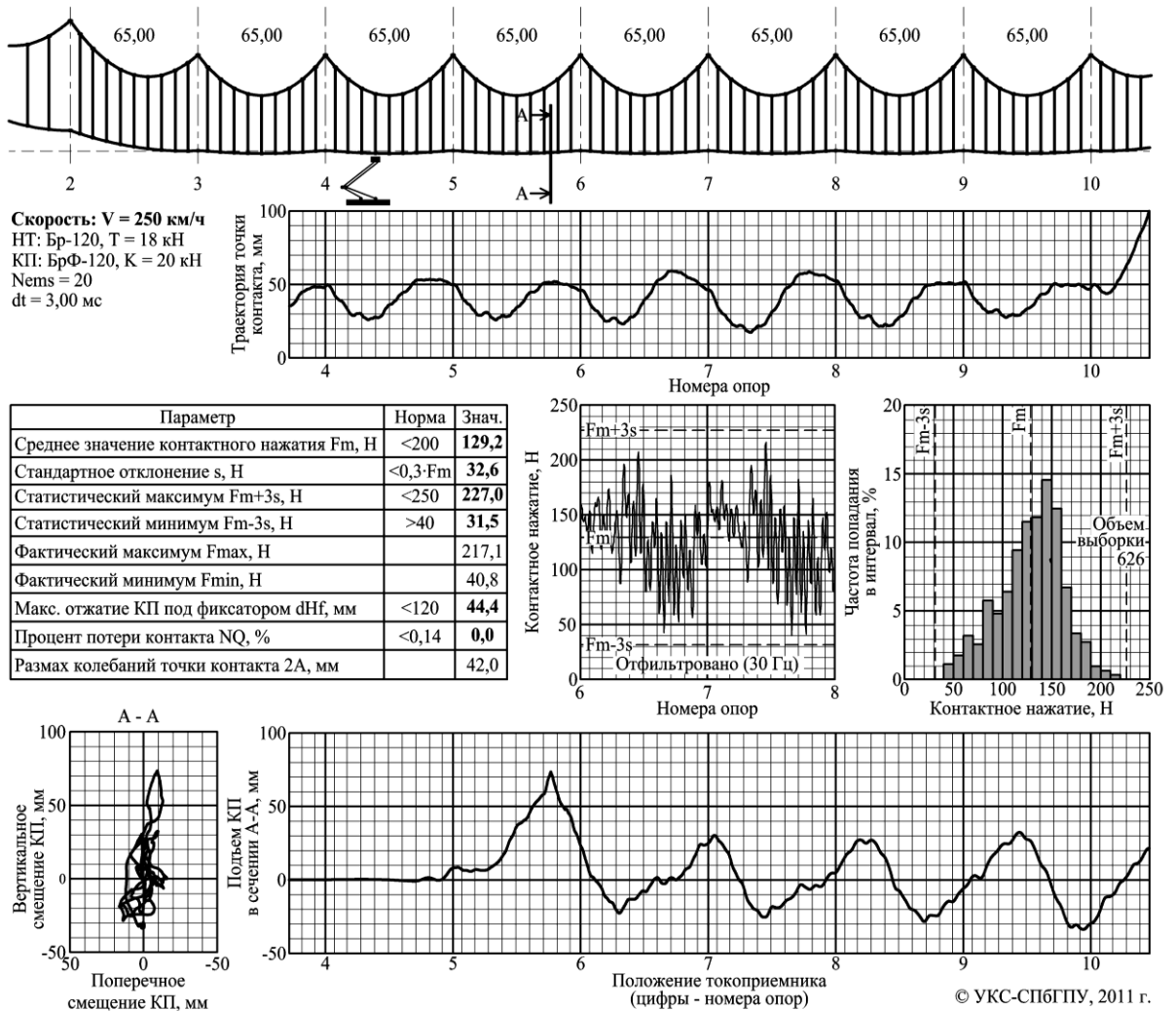


Рис. 12. Результаты динамического моделирования взаимодействия токоприемника и контактной подвески КС-200-25 при скорости 250 км/ч

Для валидации модели взаимодействия УКС-СПБГПУ было выполнено сравнение результатов расчета динамического взаимодействия эталонных моделей подвески и токоприемника в соответствии с европейским стандартом EN 50318 [7]. Результаты моделирования полностью соответствовали стандарту.

Более подробно динамические модели УКС-СПБГПУ рассмотрены в отдельном докладе.

Заключение

Внедрение современных методов математического моделирования в процесс разработки контактной сети для высоких скоростей движения дает возможность выполнения всего спектра необходимых инженерных расчетов на качественно новом уровне. Повышение точности расчетов и расширение числа учитываемых факторов позволяет повысить надежность работы узлов, улучшить качество токосъема, снизить капитальные вложения и увеличить срок службы контактной сети. На сегодня в России уже создано большинство математических моделей, необходимых для разработки скоростных и высокоскоростных контактных сетей, в том числе – контактной сети выделенных высокоскоростных магистралей (ВСМ).

Исследования на моделях ранее разработанных контактных сетей КС-200-06-К, КС-200-07 (32-07) и КС-200-25 показывают, что их эксплуатационные характеристики могут быть существенно улучшены за счет выбора более рациональных значений параметров некоторых узлов, а также за счет уточнения требований к регулировке и технологии монтажа.

Список литературы

1. **Фрайфельд А. В., Брод Г. Н.** Проектирование контактной сети. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.
2. **Марквардт К. Г.** Контактная сеть: учеб. для вузов ж.-д. трансп. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 335 с.
3. Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» под ред. к.т.н. Н. В. Мироноса и П. Г. Тюрнина. – М.: Интекст, 2010. – 192 с.
4. **Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E.** Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Second Edition. – Wiley, John & Sons, 2009. – 994 p.
5. **Паранин А. В.** Математическое моделирование тепловых процессов при взаимодействии токоприемника и контактного провода // Транспорт Урала. – 2009. – №4. – С. 85 – 88.
6. **Паранин А. В.** Совершенствование аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 25.03.10: утв. 08.07.11 / Паранин Александр Викторович – Екатеринбург, 2010. – 193 с.
7. **Кудряшов Е. В.** Совершенствование механических расчетов контактных подвесок на основе статических конечноэлементных моделей: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 17.12.10: утв. 10.06.11 / Кудряшов Евгений Владимирович – СПб., 2010. – 187 с.
8. **Кудряшов Е. В.** Требования к регулированию контактной подвески для скоростей движения 200–250 км/ч // Материалы пятого международного симпозиума «Элтранс-2009» – СПб., ПГУПС, 2010. – С. 290–299.
9. **Галкин А. Г.** Теория и методы расчетов процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07: защищена 22.11.02 : утв. 05.12.03 / Галкин Александр Геннадьевич – Екатеринбург, 2002. – 370 с.
10. **EN 50318:2002.** Railway applications – Current collection systems – Validation of simulation of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. – European Standard, CELENEC, 2002.