

Метод прямого математического моделирования динамики контактных подвесок

С.В. ЕРОШЕНКО, аспирант; А.Т. ДЕМЧЕНКО, д.т.н., профессор; В.В. ТУРКИН, к.т.н., старший преподаватель

Российский государственный открытый технический университет путей сообщения, являясь крупным отраслевым учебно-методическим центром и обладая значительным научным потенциалом, вносит существенный вклад как в транспортную науку, так и в эффективность работы железнодорожного транспорта. Выполняемые силами ученых научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы направлены на улучшение организации и технологии перевозочного процесса, создание нового подвижного состава, разработку и внедрение прогрессивных технических средств и технологий, обеспечение безопасности перевозок и охраны труда, экономию топливно-энергетических ресурсов. Научные исследования рассматриваются как основа повышения качества учебно-методической работы, образовательного процесса в целом, подготовки молодых научных кадров, формирования высококвалифицированного профессорско-преподавательского состава и научных школ.

Российские условия эксплуатации предъявляют жесткие требования к отказоустойчивости контактной сети. Кардинальным решением данной проблемы является применение пространственной автокомпенсированной контактной сети (ПРАКС), разработанной учеными кафедры «Электроснабжение электрических железных дорог» под руководством д.т.н. профессора А.Т. Демченко.

Базовая конструкция ПРАКС состоит из двух несущих тросов и двух контактных проводов. Каждый несущий трос располагается сбоку от оси пути и крепится к горизонтальной консоли или жесткой поперечине через гирлянду изоляторов. Контактные провода крепятся к несущим тросам с помощью фиксирующих элементов. Между точками крепления контактные провода стягиваются шарнирными планками, образуя в горизонтальной плоскости ромбовидные фигуры.

Экспериментальные исследования показали высокую устойчивость ПРАКС к ветровым нагрузкам, что обеспечивается практически горизонтальным расположением проводов подвески.

ПРАКС практически не требует технического обслуживания. Опираясь на мнение эксплуатационного персонала, можно с уверенностью сказать, что ПРАКС — это необслуживаемая подвеска — подвеска, способная обеспечивать качественный токосъем в самых неблагоприятных

эксплуатационно-климатических условиях с минимальными затратами.

Основным способом изучения взаимодействия контактных подвесок с токоприемниками в настоящее время является математическое моделирование. Наивысшая степень детализации контактных подвесок достигается в моделях, разработанных с применением метода конечных элементов (МКЭ) [1], где подвеска представляется набором связанных между собой структурных элементов, а движение каждого элемента описывается обыкновенным дифференциальным уравнением. Разбиение контактной подвески на дискретные элементы упрощает расчеты, исключая необходимость решать дифференциальные уравнения в частных производных. В то же время отпадает необходимость использования каких-либо условных параметров, например приведенной массы контактной подвески. Иногда для приведения дифференциальных уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных уравнений используют метод конечных разностей [2, 3].

Перспективным направлением совершенствования методик исследования токосъема, использующих принцип МКЭ, является разработка новых численных алгоритмов на основе метода прямого математического моделирования (ПММ).

Рассмотрим особенности применения метода ПММ к задачам взаимодействия контактных подвесок с токопри-

емниками на примере пространственно-ромбовидной автокомпенсированной контактной сети (рис. 1). Существенное упрощение расчетов достигается при использовании плоской схемы замещения ПРАКС, которая состоит из контактного провода и несущего троса, связанных упругими элементами (рис. 2). В такой схеме к проводам подвески приложены натяжения T и K , равные удвоенным натяжениям несущего троса и контактного провода соответственно. Упругие элементы характеризуются жесткостью s , не зависящей от величины силы, приложенной к фиксатору, что, как показывают результаты экспериментов, вполне обоснованно [5].

Натяжение каждого из проводов будем считать постоянным, не зависящим от нажатия токоприемника, а нагрузку от веса контактных проводов — равномерно распределенной по длине пролета. Будем исходить из предположения, что все силы, действующие на контактный провод, известны. В этом случае задача сводится к установлению закона колебаний контактного провода под действием нескольких внешних сил. Полное решение подобной задачи дано в [4].

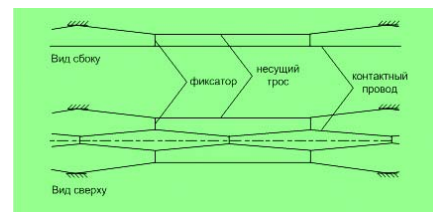


Рис. 1. Расположение элементов ПРАКС в пролете

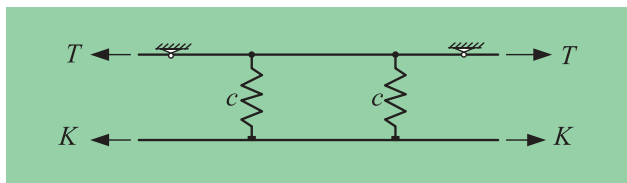


Рис. 2. Плоская схема замещения ПРАКС (один пролет подвески)

На рис. 3 показаны профили контактного провода, полученные в результате компьютерного моделирования. Здесь приложенная к контактному проводу сосредоточенная вертикальная сила величиной 120 Н перемещается в пролете длиной 9 м со скоростью 250 км/ч (69,44 м/с). Натяжение контактного провода 15 кН, линейная плотность 1,068 кг/м. Кривые $t_1 - t_4$ иллюстрируют положение контактного провода соответственно в моменты времени 0,0331 с, 0,0648 с, 0,0864 с, 0,1166 с.

До встречи с правой границей форма фронта волны близка к прямолинейной. Угол наклона этой прямой к оси x определяется соотношением скорости токоприемника и скорости распространения возмущений. Так, при равенстве этих скоростей, фронт волны представлял бы собой прямую, проходящую перпендикулярно оси x .

На основании данных, полученных путем моделирования колебаний гибкой нити под действием сосредоточенной силы, объясняется одно из явлений, наблюдаемых на практике: установлено, что с ростом скорости движения токоприемника точка максимального отжатия контактного провода смещается по направлению движения. Легко заметить, что траектория точки контакта близка к прямой до момента встречи с фронтом волны, отраженной от правой границы (кривые t_1 и t_2). В этот момент начинается резкое

снижение точки контакта (кривые t_3 и t_4), вызванное наложением отраженной волны. Поэтому чем выше скорость движения, тем дальше перемещается токоприемник до момента встречи с фронтом отраженной волны и тем ближе точка наибольшего отжатия к правой границе.

Рекуррентные соотношения метода ПММ устанавливают закон совместного движения полоза и контактного провода. Если на каком-либо этапе регистрируется отрыв, то величина нажатия принимается равной нулю. С этого момента колебания полоза токоприемника и контактного провода моделируются независимо. Касания контактного провода ползком токоприемника отслеживаются по величине зазора. Как правило, вступление в контакт сопровождается внедрением токоприемника в контактный провод, которое характеризуется отрицательным зазором. Для компенсации внедрения в точке контакта должно возникнуть дополнительное «раздвигающее» усилие, определяемое из условия равенства нулю зазора в конце шага моделирования.

На рис. 4 показаны профили контактного провода, взаимодействующего с токоприемником. Токоприемник представлен традиционной системой с двумя степенями свободы. Масса полоза — 16,7 кг, масса системы подвижных рам, приведенная к верхнему шарниру, — 15,8 кг. Жесткость верхнего узла — 6,0

кН/м. Статическое нажатие — 120 Н. В момент времени $t=0$ токоприемник находился под левой опорной точкой ($x=0$) и имел начальную скорость 250 км/ч, которая оставалась постоянной на протяжении всего моделирования.

Очевидно, что использование при расчетах модели токоприемника вместо постоянной сосредоточенной силы приводит к существенному изменению результатов по сравнению с рассмотренным ранее случаем (рис. 3). Так, нап-

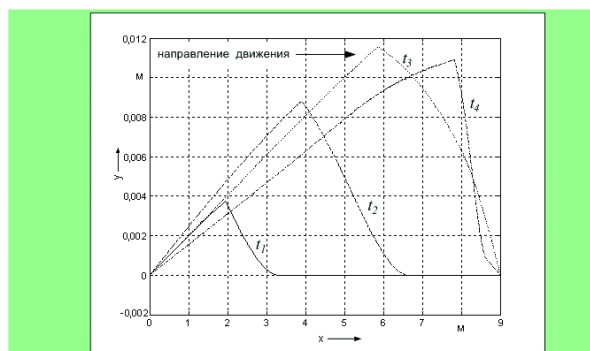


Рис. 4. Распространение возмущений в контактном проводе, вызванных воздействием токоприемника

пример, на форму фронтов существенное влияние оказывает масса токоприемника, а отклонение контактного нажатия от статического сказывается на величине максимального отклонения контактного провода.

Применение ПММ для решения задач динамики контактной сети дает широкому кругу инженеров возможность создавать математические модели с учетом реальных характеристик элементов контактной подвески: контактного провода, несущего троса, струн и фиксаторов, а также изучать особенности взаимодействия контактных подвесок с несколькими токоприемниками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фишер В. Цепная контактная подвеска и токоприемник при высоких скоростях движения // Железные дороги мира. — № 7. — 1978.
2. Petri K., Wallachek J. Modelling the Dynamic Behaviour of Catenary-Pantograph Systems for High Speed Trains // Proceedings of Cable Dynamics. — 1995.
3. Petri K., Wallachek J. Analytical Models for the Dynamics of Catenary-Pantograph Systems // Proceedings of ICIAM 95, issue 4: Applied Sciences, Especially Mechanics. — 1996. — November.
4. Шорр Б.Ф., Мельникова Г.В. Расчет конструкций методом прямого математического моделирования. — М.: Машиностроение, 1988.
5. Демченко А.Т. Пространственные контактные подвески. — М.: Транспорт, 1991.

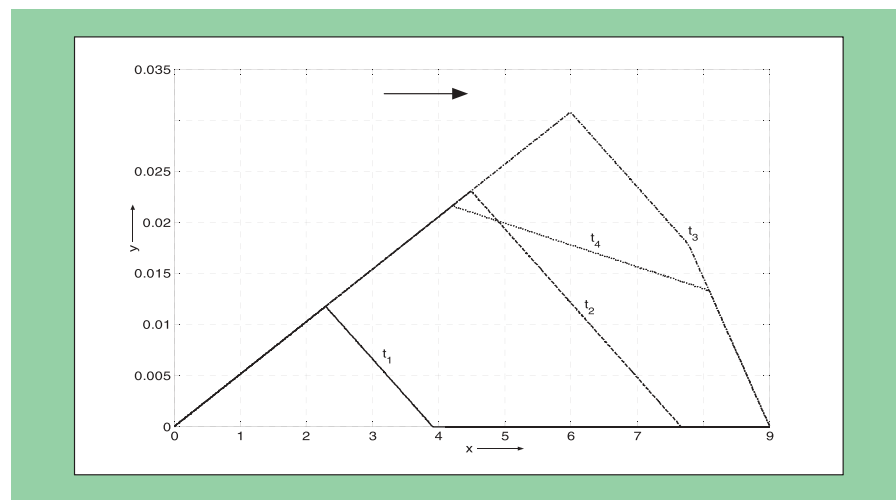


Рис. 3. Гибкая нить под действием подвижной нагрузки