

С. Н. КОЛЕСОВ, д-р техн. наук, профессор, ДИИТ (Украина)

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКИ И НА ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ТОКОПРИЕМНИКОМ

Для збільшення швидкості руху потрібно застосування нових матеріалів з поліпшеними експлуатаційними властивостями. Показано, що основні динамічні параметри контактних підвісок залежать від природи використовуваних матеріалів.

Для увеличения скорости движения требуется применение новых материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Показано, что основные динамические параметры контактных подвесок зависят от природы используемых материалов.

An increase in the speed of movement by electric railways requires the application of new materials with the improved performance properties. It is shown that the basic dynamic parameters of contact lines depend on a nature of used materials.

Обеспечение движущегося электроподвижного состава (ЭПС) качественным токосъёмом является одной из сложных задач в цепи электроснабжения. Опыт эксплуатации высокоскоростных магистралей за рубежом показал, что обеспечение надежного взаимодействия движущегося токоприёмника и контактной подвески является такой же сложной технической задачей, как и обеспечение надежного взаимодействия движущегося экипажа с рельсами. Надёжность и требуемое качество токосъёма определяются скоростью движения ЭПС и конструктивными параметрами контактной подвески и токоприёмника, а их взаимодействие представляет собой сложный колебательный процесс, влияющий не только на качество токосъёма, но также на интенсивность механического и электрического изнашивания контактного провода и токосъёмных элементов. На этот колебательный процесс, в котором участвуют разнородные колебательные системы, оказывают влияние колебания кузова локомотива и автоколебания («пляска» и вибрация) проводов контактной подвески. Все эти накладываемые друг на друга колебательные процессы имеют различные амплитуды и спектры частот, а часто и направление распространения волн. Поэтому из-за сложности колебательного процесса в контактных подвесках он не может быть описан обычными дифференциальными уравнениями и заставляет исследователей вносить существенные упрощения при построении исходной модели [1, 2].

Для улучшения качества токосъёма необходимо уменьшить отжатие контактной подвески движущимся токоприёмником. При невысоких скоро-

стях движения отжатие контактного провода пропорционально эластичности η контактной подвески и контактному нажатию токоприёмником. При высоких скоростях движения на квазистатический подъём начинают оказывать существенное влияние динамические и аэродинамические процессы, доля которых заметно возрастает с повышением скорости движения. Поэтому на СМ и ВСМ отжатие контактного провода движущимся токоприёмником лимитируется. Например, на германских железных дорогах отжатие контактного провода в середине пролёта не должно превышать 200 мм, а под фиксатором – 120 мм в контактной подвески стандартного типа и 100 мм в усиленной высокоскоростной [3].

Эластичность η_c цепной контактной подвески в середине пролёта для СМ и ВСМ довольно точно можно определить по формуле (1) [1, 4...6]

$$\eta = L / k(K+T), \quad (1)$$

где L – длина пролёта, мм; K и T – натяжение соответственно контактного провода и несущего троса; H ; k – коэффициент (для подвески с рессорным тросом $k = 3,5$, а без рессорного троса $k = 4$) [4]. Из формулы (1) следует, что эластичность контактной подвески зависит от длины L пролёта и силы натяжения контактного провода K и несущего троса H , которые, в свою очередь, зависят от их сечения и природы металла (сплава или биметалла), из которого они изготовлены.

Коэффициент неравномерности эластичности рессорных контактных подвесок для СМ и ВСМ можно определить из отношения [1, 4...6]

$$\kappa_{эл} = (\eta_{\max} - \eta_{\min}) / (\eta_{\max} + \eta_{\min}) 100, \% \quad (2)$$

где η_{\max} и η_{\min} – соответственно максимальная и минимальная эластичность в полёте.

С увеличением скорости движения усиливается влияние динамических процессов на контактное нажатие токоприёмником, поэтому для оценки эффекта взаимодействия контактной подвески и движущегося токоприёмника вводятся динамические показатели, которые в свою очередь зависят от конструктивных параметров контактной подвески и токоприёмника и определяют границы повышенной скорости движения при надёжном и качественном токоосъёме. К основным динамическим показателям контактной подвески относятся: скорость распространения волны c_p вдоль контактного провода, коэффициент отражения волны r , коэффициент Доплера α и коэффициент усиления γ_0 .

Механизм образования и распространения волн, вызванных движущимся и колеблющимся токоприёмником, в первом приближении выглядит следующим образом. Под действием токоприёмника контактный провод поднимается с некоторым ускорением, зависящим от массы провода и его натяжения. От места подъёма контактного провода в обе стороны вдоль него пойдет падающая волна, и каждая точка провода начнет колебаться. Так как во время движения э.п.с вместе с кузовом локомотива колеблется и сам токоприёмник, то возникают дополнительные колебания контактного провода впереди и сзади токоприёмника. Все эти колебания через струны передаются несущему тросу, в результате и он включается в колебательный процесс.

Скорость распространения волны c_p (км/ч) вдоль контактного провода является одним из фундаментальных динамических параметров контактных подвесок. Её величина зависит от силы натяжения контактного провода K и массы m_k его погонно-го метра

$$c_p = 3,6 \sqrt{K/m_k}. \quad (3)$$

Скорость c_p также зависит от скорости v движения ЭПС. Поэтому для высоких скоростей движения необходимо увеличить K . Практически установлено, что для высоких скоростей v движения скорость c_p должна быть не менее, чем в 1,4...1,5 раза больше максимальной скорости v_{\max} движения ЭПС. Например, для немецкой цепной контактной подвески Re75 $v_{\max} = 75$ км/ч, Re100 $v_{\max} = 100$ км/ч, Re160 $v_{\max} = 160$ км/ч, Re200 $v_{\max} = 200$ км/ч, Re250 $v_{\max} = 280$ км/ч при двух поднятых токоприёмниках и $v_{\max} = 300$ км/ч при одном токоприёмнике, Re330 $v_{\max} = 330$ км/ч при двух поднятых токоприёмниках и $v_{\max} = 350$ км/ч при одном токоприёмнике.

Падающая волна 1 , возбужденная прямоугольным импульсом, вызванным движущимся токоприёмником, распространяется вдоль контактного провода со скоростью c_p (рис. 1). В точке сосредоточенной массы (в местах нахождения струновых зажимов, фиксаторов и др.) падающая волна частично отражается, частично преломляется и частично проходит через точку сосредоточенной массы. В результате образуются волны *отраженная 2, преломленная 3 и проникающая (транзитная) 4*. Интенсивность этих волн будет зависеть от плотности среды и скорости их распространения: чем больше плотность среды и скорость c_p , тем больше затухание и меньше интенсивность волны.

Рассмотрим падающую волну 1 , которая набегает слева. В точке сосредоточенной массы она вызовет силу реакции, действующей на контактный провод в противоположном направлении (см. рис. 1). Под действием этой силы возникнет отраженная волна 2 , которая наложится на первоначальную (падающую) волну. В результате образуется составляющая, которая и определит величину реального перемещения контактного провода перед точкой сосредоточенной массы. Так как волны падающая и отраженная движутся во взаимно противоположных направлениях и скорости их равны, и если будут равны их частоты и амплитуды, то образуются стоячие волны. В точках пучности стоячих волн амплитуда колебаний контактного провода возрастет в два раза и, следовательно, изменится сила нажатия токоприёмника на контактный провод. Так как при движении токоприёмника постоянно изменяется расстояние между ним и ближайшей точкой сосредоточенной массы, поэтому изменяется амплитуда и частота отраженной волны, что приводит к усложнению колебательного процесса.

Отношение амплитуд отраженной волны H_p и падающей волны H_0 представляет коэффициент отражения r

$$r = H_p / H_0. \quad (4)$$

Коэффициент отражения r характеризует качество контактной подвески. При этом скорость v движения ЭПС не учитывается. Эта характеристика важна при расчетах контактных подвесок [4]. Чтобы свести к минимуму возможность образования стоячих волн, коэффициент r должен быть меньше единицы. Значение r можно определить из уравнения

$$r = \frac{\sqrt{Tm_H}}{\sqrt{Tm_H} + \sqrt{Km_k}}, \quad (5)$$

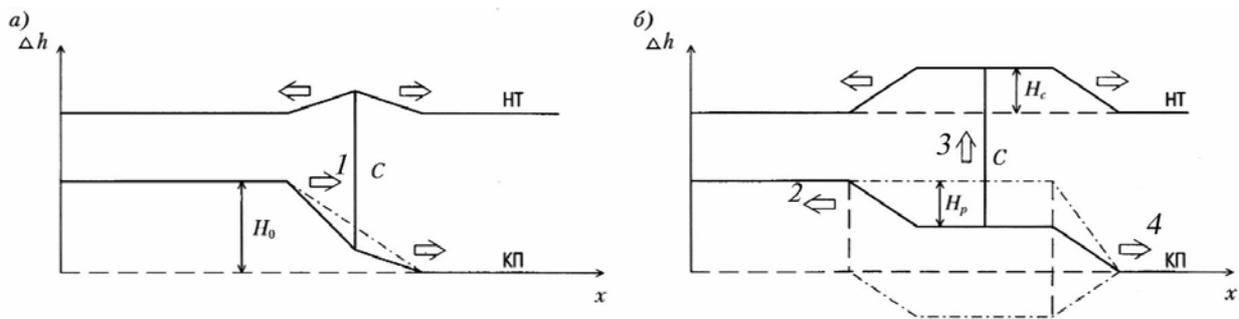


Рис. 1. Распространение волны в зоне струнового зажима цепной контактной подвески: *a* – состояние в момент набегающей падающей слева волны; *b* – состояние после прохождения падающей волны; КП – контактный провод; НТ – несущий трос; *C* – струна; волны: 1 – падающая, 2 – отраженная, 3 – преломленная, 4 – проникающая (транзитная)

где K и T – натяжение контактного провода и несущего троса соответственно, H ($\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$); m_k и m_n – масса погонного метра уравновешенного контактного провода и несущего троса в данной точке соответственно, $\text{кг}/\text{м}$.

Таким образом, коэффициент отражения r зависит непосредственно от силы натяжения контактного провода и несущего троса, массы их погонного метра и сосредоточенной массы зажима струны, то есть от сечения провода и троса и предела прочности на разрыв σ_B металла (сплава или биметалла), из которого они выполнены.

При движении токоприёмника, к которому возвращаются волны от струновых зажимов, фиксаторов и т.д., а также образуются стоячие волны, наблюдается усиление амплитуды колебаний контактного провода. В результате токоприёмник из-за своей инерционности скачкообразно изменяет силу нажатия на контактный провод. При этом токоприёмник может либо отрываться от контактного провода, либо наоборот увеличивать контактное нажатие. При отрыве токоприёмника возникнет электрическая дуга и, следовательно, увеличится интенсивность электрического изнашивания, а при увеличении нажатия усилится интенсивность механического изнашивания. Отношение, определяющее степень изменения силы нажатия токоприёмником под влиянием процессов, вызванных отраженными и другими волнами, является коэффициент усиления γ_0 , который равен

$$\gamma_0 = r / \alpha, \quad (6)$$

где α – коэффициент Доплера, который, в свою очередь, равен

$$\alpha = (c_p - v) / (c_p + v). \quad (7)$$

Коэффициент Доплера показывает пригодность контактной подвески при определенном

натяжении контактного провода (и несущего троса) реализовать заданную максимальную скорость движения без ухудшения качества токосъёма. На коэффициент Доплера решающее влияние оказывает натяжение контактного провода.

С увеличением скорости v движения ЭПС коэффициент усиления γ_0 возрастает, а коэффициент Доплера α снижается. Когда же скорость v начинает приближаться к значению скорости c_p , коэффициент усиления γ_0 резко возрастает, а коэффициент Доплера α резко снижается. В результате возникают трудности в управлении скоростью движения. Практически установлено, что для нормального управления скоростью движения ЭПС коэффициент γ_0 не должен быть более 2,5 (при опытных поездках допускается увеличение γ_0 до 5,0), а коэффициент Доплера α не менее 0,15...0,20 [4].

Так как коэффициент Доплера α зависит от скорости движения поезда v , то до некоторой скорости, которая соответствует условию $\gamma_0 = 1$, не будет происходить увеличение амплитуды нажатия токоприёмника на контактный провод [4]. Эта скорость является граничной скоростью v_a . Её можно определить из уравнения

$$v_a = c_p (1 - r) / (1 + r). \quad (8)$$

Граничная скорость v_a меньше скорости отраженной волны. Она показывает влияние конструктивных параметров контактной подвески на равномерность нажатия токоприёмником и, следовательно, определяет равномерность износа контактного провода и качество токосъёма. На равномерность контактного нажатия влияют также конструктивные параметры токоприёмника и особенно приведенная масса его верхнего узла – масса полозов и токосъёмных элементов. Поэтому верхние узлы скоростных и высокоскоростных токоприёмников выпол-

няют из легких сплавов – сплавов алюминия и титана.

Оптимальные значения динамических параметров стандартных германских цепных контактных подвесок Re160, Re250 и Re330 приведены в таблице [4]. Динамические параметры Re200 имеют те же значения, что и Re160. Из таблицы видно, что скорость распространения волны c_p вдоль контактного провода у указанных стандартных контактных подвесок изменяется в пределе от 382 до 572 км/ч. Скорость c_p является фундаментальной характеристикой, определяющей коэффициент Доплера α . Коэффициент Доплера у различных стандартных контактных подвесках изменяется в интервале от 0,41 до 0,26, а значения коэффициента отражения γ_0 мало отличаются друг от друга. Кроме указанных характеристик, важными параметрами контактных подвесок являются допустимая нагрузка по току и максимальная скорость движения v_{\max} , при которой обеспечивается надежный токосъём.

Из сказанного выше следует, что натяжение контактных проводов и несущего троса является важным конструктивным параметром кон-

тактных подвесок, обеспечивающий устойчивый и качественный токосъём. Сила натяжения в свою очередь зависит от сечения проводов и троса и величины их σ_B , то есть от природы металла (сплава или биметалла), из которого они выполнены. Сечение контактных монометаллических проводов в ряде стран уже доведено до 120 мм², и дальнейшее его увеличение из-за возрастающей жесткости приводит при монтаже к остаточным неровностям, которые при эксплуатации вызывают повышенное местное изнашивание. Поэтому, чтобы увеличить натяжение контактных проводов (и несущего троса), необходимо для их производства применять новые материалы с повышенными значениями предела прочности на разрыв σ_B , твердости НВ, износостойкости и высокой температурой разупрочнения или биметаллические провода. Таким образом, при переходе на скоростное и особенно высокоскоростное движение материалы становятся одним из главных звеньев, определяющих эффективность электрической тяги и, в частности, качество токосъёма.

Таблица

Оптимальные значение динамических параметров стандартных немецких цепных контактных подвесок

Тип	Re 160	Re 250	Re 330
Контактный провод			
тип	100-ECu	120-Cu0,1Ag	120-Cu0,5Mg
натяжение, кН	10	15	27
Несущий трос			
тип	50-BzII	70-BzII	120-BzII
натяжение, кН	10	15	21
Скорость распространения волны c_p , км/ч	382	427	572
Коэффициент неравномерности эластичности $k_{эл}$, %	20	10	8
Коэффициент отражения r	0,413	0,425	0,465
Коэффициент Доплера α	0,41 ($v = 160$ км/ч)	0,26 ($v = 250$ км/ч)	0,27 ($v = 330$ км/ч)
Коэффициент усиления γ_0	1,01	1,63	1,72
Частоты собственных симметричных (v_2) и несимметричных (v_1) колебаний проводов (v_2/v_1), Гц	0,74 / 0,76	0,96 / 1,02	1,06 / 1,15

В настоящее время за рубежом широко используют контактные провода, выполненные из меди, легированной серебром (0,1% Ag), магнием (0,5% Mg), цирконием и др. или легированной несколькими химическими элементами: хромом и цирконием или хромом, цирконием и магнием [4, 5]. Для увеличения предела проч-

ности на разрыв, твердости, износостойкости и одновременно повышения электропроводности контактных проводов, изготовленных из бронз, целесообразно их подвергать дисперсионному твердению. Однако для скоростей движения ниже 160 км/ч оптимальным решением являет-

ся применение контактных проводов из меди, низколегированной оловом.

Автор приносит глубокую благодарность доктору-инженеру А. Шмидеру (Сименс, Германия) за ценные советы, сделанные им при обсуждении настоящей статьи.

БИБЛИОГРАФИЧНЫЙ СПИСОК

1. Беляев И.А., Вологин В.А. Взаимодействие токоприёмников и контактной сети. – М.: Транспорт. – 1983. – С. 192.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа. – 1972. – 416 с.
3. Wittke V, Borgwardt H. Eisenbahningenieur, 1999, '2, S. 16-24.
4. Kießling F., Puschmann R., Schmieder A. Contact Lines for Electric Railways/Munich Erlangen: Publicis Corporate Publising. – 2001. – P. 822.
5. Ebeling H. Stromabnahme bei hohen Geschwindigkeiten // Elektrische Bahnen 57, 1959, '2, S. 26-29 und 60-66.
6. Гуков А.И., Тиболов А.Т., Чепелев Ю.Г. Повышение скорости на электрифицированных железных дорогах с контактной сетью постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 4. – С. 14-20.