УДК 629.03:656.2.022.846

Гибридный движитель

Иван ГОРЮНОВ
Ivan O. GORYUNOV

Михаил ГЛУЩЕНКО
Mikhail D. GLUSHCHENKO

Глущенко Михаил Дмитриевич *– доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*
Горюнов Иван Олегович *– аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» МИИТ, Москва, Россия.*

Hybrid Propulsion Unit

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 77)

Авторами представлена концептуальная идея о высокоскоростной магистрали с максимальной скоростью движения 400–450 км/ч. Использование ротационных двигателей требует больших энергозатрат на высоких скоростях, возникают сложности с токосъёмом, сцеплением колеса с рельсом и т.д. В то же время применение линейного тягового двигателя на низких скоростях не оправдано с экономической точки зрения, но эффективно на высоких с позиции эксплуатации. В связи с этим предлагается вариант совмещенного или гибридного тягового движителя, в котором сопрягаются положительные стороны прежних моделей.

Ключевые слова: транспорт, высокоскоростные поезда, высокоскоростные магистрали, линейный синхронный двигатель, асинхронный тяговый электродвигатель, сопротивление движению, сила сцепления колеса с рельсом, гибридный движитель, концептуальная идея.

Сегодня в мире эксплуатируется большое количество высокоскоростных магистралей, максимальная скорость движения на которых составляет 250–350 км/ч [1]. Чтобы достичь высокой скорости при традиционной системе колесо-рельс с классическим расположением тяговых электродвигателей на подвижном составе (от вала двигателя на ось колёсной пары через зубчатую передачу), необходимо решить несколько задач. Таких, например, как проблема сцепления колеса с рельсом, токосъём, мощность электропоезда.

Сцепление колёсных пар с рельсом является одним из ограничений тяговых характеристик подвижного состава, причем исходя из физических процессов с увеличением скорости коэффициент сцепления снижается, а это приводит к уменьшению силы тяги. Нетрадиционные системы, прежде всего подвижной состав с линейными синхронными двигателями (ЛСД), лишены этих проблем, тяговое усилие передается тут не через колесо-рельс, а за счет взаимодействия первичного и вторичных элементов, устроенных на подвижном составе и путях. Но у такой конструкции свой

недостаток – необходимость обустройства на всем протяжении пути одной из частей тягового линейного двигателя.

Проблема токосъёма выходит на передний план при увеличении скорости движения свыше 200 км/ч, когда повышается вероятность искрения между полозами и токоведущим проводом из-за вибрации и небольшого отрыва полозьев от провода, растёт аэродинамическое воздействие и т.д. [2]. Электропоезда с линейным синхронным двигателем не имеют проблемы токосъёма в принципе, поскольку электроэнергию подводят к статору, расположенному непосредственно на полотне. Однако применение ЛСД приводит к значительному удорожанию конструкции пути и подвижного состава.

Альтернативой предлагается двойной или гибридный тяговый движитель, т.е. на участках с относительно низкой скоростью (до 300 км/ч) можно использовать вращающиеся тяговые электродвигатели, а на участках со скоростью выше 300 км/ч применять линейные двигатели.

1. РАСЧЁТ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ

При обосновании предполагаемых изменений необходимо провести расчёт сил сопротивления движению и силы сцепления колеса с рельсом. В качестве примера был взят восьмивагонный электропоезд, в составе которого четыре моторных и четыре прицепных вагона с нагрузкой 160 и 150 кН/ось на каждом. Для такого варианта с формулой

МГ+П+М+П+П+М+П+МГ

(где М – моторный вагон, П – прицепной вагон, МГ – моторный головной вагон) силу сопротивления движения можно вычислить следующим образом.

Сопротивление движению зависит от конструкции и технического состояния подвижного состава, верхнего строения пути, профиля и плана пути, от скорости движения поезда, а также скорости и направления ветра. Оно обусловлено наличием трения в узлах подвижного состава, трением колёс о рельсы, деформациями пути и элементов подвижного состава, сопротивлением воздушной среды, а также характером силы тяжести на уклонах. Сопротивление движению условно делят на две главные составляющие.

Первую называют *основным сопротивлением движению* $W_о$, оно представляет собой сопротивление движению подвижного состава данного типа на прямолинейном горизонтальном открытом участке пути при любой скорости движения (в том числе и при $v = 0$). Эта составляющая обусловлена внутренним трением в узлах подвижного состава, сопротивлением, возникающим при взаимодействии подвижного состава и пути, а также сопротивлением воздушной среды (при отсутствии ветра) [3].

Вторую составляющую называют *дополнительным сопротивлением движению* $W_д$, оно производное от уклонов и кривых. Считают, что дополнительное сопротивление не зависит от скорости движения и определяется только планом и профилем пути. Далее расчёт ведётся без учёта влияния дополнительных сил сопротивления.

Основное сопротивление движению рассчитывается как сумма двух компонентов: $W_{мех}$ – механическое сопротивление движению и $W_{воз}$ – сопротивление воздушной среды. Удельное сопротивление движению всего поезда $w'_о$ рассчитывается как сумма удельных сил [3].

$$w'_о = w'_{мех} + w'_{воз}, \quad (1)$$

где $w'_о$ – основное удельное сопротивление движению, $\frac{H}{кН}$;

$w'_{мех}$ – механическое удельное сопротивление движению, $\frac{H}{кН}$;

$w'_{воз}$ – удельное сопротивление воздушной среды, $\frac{H}{кН}$.

Удельное механическое сопротивление движению:

$$w'_{мех} = 0{,}45 + \frac{7 + 0{,}12 \cdot V}{q_0}, \quad (2)$$

где V – скорость движения поезда, км/ч;

q_0 – вес, приходящийся на ось колёсной пары, кН/ось.

Удельное сопротивление воздушной среды:

$$w'_{воз} = \frac{C_x \cdot \Omega \cdot \rho \cdot V^2}{2 \cdot 3{,}6^2 \cdot q_{0ср}}, \quad (3)$$

Таблица 1

Основные и удельные силы сопротивления движению

v, км/ч	0	50	100	150	200	250	300	350	400
w′мех, Н/кН	0,90	1,29	1,68	2,06	2,45	2,84	3,22	3,61	4,00
w′возд, Н/кН	0	0,50	2,01	4,53	8,05	12,58	18,12	24,66	32,21
w′в/w′м,	0	0,39	1,20	2,20	3,29	4,43	5,62	6,83	8,05
w′o, Н/кН	0,90	1,79	3,69	6,59	10,50	15,42	21,34	28,27	36,20
Wo, Н	4472	8888	18296	32696	52088	76472	105848	140216	179576
Wo, кН	4	9	18	33	52	76	106	140	180

Таблица 2

Сила сцепления поезда с четырьмя моторными и четырьмя прицепными вагонами

v, км/ч	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$\psi_{ксц}$	0,25	0,17	0,13	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05
$F_{сцось}$, Н	4000	2670	2000	1600	1330	1140	1000	890	800
$F_{сц}$, Н	640000	426666	320000	256000	213333	182857	160000	142222	128000
$F_{сцось}$, кН	640	427	320	256	213	183	160	142	128

где C_X – коэффициент воздушного сопротивления поезда;

Ω – расчётная площадь миделева сечения, 10,7 м^2;

ρ – плотность наружного воздуха, $0{,}125\ \frac{кг \cdot с^2}{м^4}$;

$q_{0ср}$ – средний вес, приходящийся на ось колёсной пары, кН/ось.

Коэффициент воздушного сопротивления поезда [3]:

$$C_X = C_0 + C_в \cdot (N - 1), \quad (4)$$

где C_0 – коэффициент воздушного сопротивления условного одиночного вагона, 0,55;

$C_в$ – коэффициент воздушного сопротивления вагона в середине поезда, 0,21;

N – число вагонов поезда.

Масса, приходящаяся на ось моторных и прицепных вагонов, различна, поэтому для расчётов используют среднее значение $q_{0ср}$:

$$q_{0ср} = \frac{q_{0м} \cdot N_{вм} + q_{0п} \cdot N_{вп}}{N_{вм} + N_{вп}}, \quad (5)$$

где $q_{0м}$, q_0 – вес, приходящийся на ось колёсной пары моторного и прицепного вагона соответственно, кН/ось;

$N_{вм}$, $N_{вп}$ – количество моторных и прицепных вагонов.

Средний вес, приходящийся на ось вагона для данной компоновки, равна 155 кН/ось.

Все расчёты сведены в таблицу 1.

Из расчётов следует, что при небольших скоростях движения преобладает механическое сопротивление движению, а при скоростях выше 100 км/ч большее значение имеют силы сопротивления воздушной среды.

2. ОГРАНИЧЕНИЕ ПО СЦЕПЛЕНИЮ

Одним из основных критериев движения поезда является ограничение силы по сцеплению колеса с рельсом $F_{сц}$. Внешней по отношению к колесу является та сила, благодаря которой вращающийся момент тягового двигателя реализуется в виде силы тяги, сообщающей поступательное движение колесу, а вместе с ним и всему поезду. Исходя из этого следует, что при традиционной конструкции подвижного состава с ротационными тяговыми двигателями сила сопротивления движению должна быть меньше по величине, чем сила сцепления колеса с рельсом.

В реальности коэффициент сцепления рассчитать трудно, поэтому формула для каждого типа подвижного состава определяется экспериментально, например, для выбранного подвижного состава коэффициент находится по формуле [4].

$$\psi_{ксц} = \frac{25}{100 + v}, \quad (6)$$

где v – скорость движения поезда, км/ч.

Сила сцепления, приходящаяся на одну моторную ось:

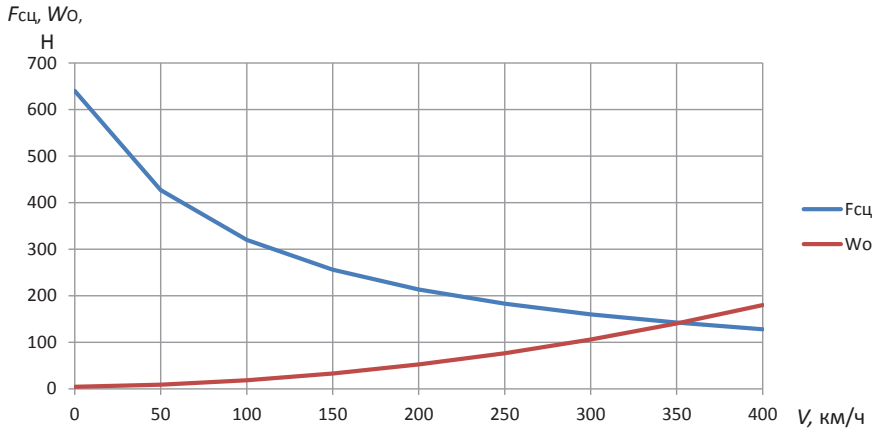

Рис. 1. Зависимости Fсц(V) и W'o(V).

$$F_{\text{сцось}} = \psi_{\text{ксц}} \cdot q_{\text{0м}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{сцось}}$ – сила сцепления, Н.

Сила сцепления всего поезда:

$$F_{\text{с}} = F_{\text{сось}} \cdot N_{\text{ом}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{ом}}$ – число осей с тяговым двигателем во всем поезде.

Расчёты силы сцепления колеса с рельсом в зависимости от скорости представлены в таблице 2. По данным таблиц 1 и 2 построенные на рис. 1 зависимости $F_{\text{сц}}(V)$ и $W\text{o}(V)$ приведены для удобства в размерностях [кН].

При принятой конфигурации электропоезда ограничение по сцеплению не позволит двигаться со скоростью выше 350 км/ч. Для её увеличения следует или уменьшить силу сопротивления движению, что представляется довольно сложным и требует внесения существенных изменений в конструкцию поезда, или увеличить силу сцепления. При традиционной системе колесо-рельс коэффициент сцепления колеса с рельсом увеличить невозможно; силы сцепления можно нарастить с помощью простого механического увеличения числа моторных осей (умножения мощности), однако это приведет к увеличению массы подвижного состава, что в свою очередь отрицательно скажется на динамическом воздействии на путь от высокоскоростного электропоезда [5].

3. ГИБРИДНЫЙ ДВИЖИТЕЛЬ

Для движения высокоскоростного электропоезда на скоростях, при которых сила сцепления колеса с рельсом будет ниже силы сопротивления движению и не может быть реализована сила тяги с помощью собственных вращающихся тяговых электродвигателей, предполагается использовать ЛСД. То есть придать подвижному составу двойной или гибридный движитель: тяговые электродвигатели и ЛСД.

Первичный элемент линейного двигателя, каким могут быть постоянные магниты, расположен на подвижном составе, а обмотка двигателя или вторичный элемент располагается на пути, например, между рельсами. Движение по высокоскоростной линии при наличии ЛСД будет происходить с помощью управления частотой обмоток независимо от поезда, централизованно. Сила сцепления колёс с рельсом в данном случае не играет большой роли, потому что рельсы используются

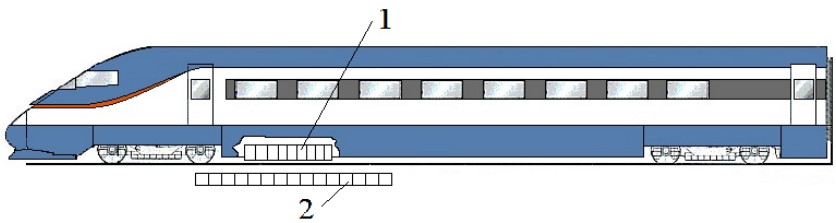

Рис. 2. Расположение первичного и вторичного элементов ЛСД на высокоскоростном электропоезде: 1 – первичная часть ЛСД, установленная на подвижном составе; 2 – вторичная часть ЛСД, установленная на полотне пути.

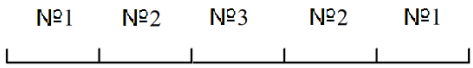

Рис. 3. Пример схемы высокоскоростной магистрали: 1 – участки разгона и торможения электропоезда от начала движения до скорости 200 км/ч; 2 – участки движения электропоездов с максимальной скоростью движения до 300–350 км/ч; 3 – участок магистрали, оборудованной ЛСД, со скоростью движения 400–450 км/ч.

только как направляющие для движения. Отсутствует и проблема токосъёма, поскольку на электропоезде установлен первичный элемент ЛСД, не требующий электропитания. Пример расположения первичной и вторичной обмоток такого двигателя показан на рис. 2.

Что касается порядка апробации гибридного движителя, то можно взять высокоскоростную магистраль и разбить её на несколько участков (рис. 3). Начальный и конечный участки (№ 1) линии служат для разгона и торможения высокоскоростного электропоезда до скорости 200 км/ч, на следующих участках (№ 2) поезд разгоняется до скорости 300–350 км/ч, на сегодняшний день это предельная коммерческая скорость эксплуатации подобных поездов в мире [6] с использованием традиционной системы колесо-рельс и тяговых вращающихся электродвигателей.

На участке № 3 поезд движется с помощью ЛСД, скорость может достигать 400–450 км/ч и выше, управление, сигнализация, централизация и блокировка происходят централизованно в диспетчерском центре без участия машиниста. На этом участке изначально на безбалластном пути предполагается установить вторичный элемент ЛСД. Так как питание первичного элемента не требуется (подключены элементы на полотне), то на столь высоких скоростях отсутствует проблема токосъёма, сцепления колеса с рельсом и система электрификации и СЦБ.

Расположение первичного элемента на подвижном составе не требует сложных изменений в конструкцию, это элементы с постоянными магнитами, которые надо установить под дном вагонов на определенной высоте (линейный синхронный двигатель позволяет иметь значительный воздушный зазор между первичными и вторичными элементами).

Применение гибридного движителя будет способствовать увеличению скорости на железнодорожной линии, в том числе на высокоскоростных магистралях, которые открываются или готовятся к эксплуатации, например, высокоскоростная магистраль VDE8 в ФРГ, Мадрид – район Галисия в Испании, вторая очередь линии TGV Est [7, 8]. У нового подвижного состава, допустим, поезда ICx, максимальная скорость движения составляет 250 км/ч [9], с применением гибридного движителя (установка первичной части ЛСД на поезде) реальным становится увеличение скорости без внесения изменений во вращающиеся тяговые двигатели. Условно движение на новых высокоскоростных магистралях можно организовать по схеме, согласно рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Necessities for future high speed rolling stock. [Электронный доступ]: http://www.uic.org/highspeed#General-definitions-of-highspeed. Доступ 02.03.2016.

2. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: Учеб. пособие в 2 томах / Киселёв И. П. и др.; под ред. И. П. Киселёва.– М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2014.– Т. 1.– 308 с.

3. Стромский П. П., Гуткин Л. В. О сопротивлении движению электропоезда для высокоскоростной специализированной магистрали // Эксплуатационные и технические параметры специализированных высокоскоростных пассажирских магистралей: Сб. науч. трудов ВНИИЖТ.– М.: Транспорт, 1989.– С. 41–46.

4. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах) / Под ред. Н. В. Колодяжного.– М.: Транспорт, 1976.– 416 с.

5. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: Учеб. пособие в 2 томах / Киселёв И. П. и др.; под редакцией И. П. Киселёва.– М.: УМЦ по образованию на железнодорожном транспорте, 2014.– Т. 2.– 372 с.

6. Киселёв И. П., Сотников Е. А., Суходеев В. С. Высокоскоростные железные дороги.– СПб.: 2001.– 60 с.

7. Железные дороги. Проекты. Компании // Железные дороги мира.– 2016.– № 1.– С. 2.

8. Железные дороги. Проекты. Компании // Железные дороги мира.– 2016.– № 2.– С. 2.

9. Поезд ICx: на пути к опытной эксплуатации // Железные дороги мира.– 2015.– № 1.– С. 47–50.

Координаты авторов: **Глущенко М. Д.** – mr.gluschenko@mail.ru,
Горюнов И. О. – ivan.goryunov@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 02.03.2016, принята к публикации 20.05.2016.