УДК 625.033

Г.С. Михальченко, А.В. Антохин

**Оценка динамических качеств скоростного электровоза**

**с различной конструкцией тягового привода**

Приведены результаты компьютерного моделирования ходовой динамики скоростного электровоза с тремя двухосными тележками и динамической нагруженности тягового привода с опорно-осевым и рамным подвешиванием тягового редуктора.

Ключевые слова: тяговый привод; компьютерное моделирование; скоростной электровоз; динамические качества.

В настоящее время перед локомотивостроителями России поставлена задача создать скоростной электровоз, призванный эксплуатироваться на основных пассажиронапряженных линиях европейской части страны. С учетом того, что на большинстве этих линий используются две системы энергоснабжения контактной сети (на постоянном токе – напряжением 3000 В и переменном – 25000 В), электровозы должны быть двухсистемными. Первый опыт применения двухсистемного электровоза ЭП10, созданного совместно Новочеркасским электровозостроительным заводом и западноевропейской фирмой Adtranz, показал, что на стыковочных по контактной сети станциях время движения поезда сокращается на 20 – 30 мин, так как поезд может вообще не стоять на этих станциях.

Помимо использования двухсистемного питания для новых электровозов предполагается увеличить конструкционную скорость движения от 160 до 200 км/ч за счет более современной экипажной части и применения асинхронных тяговых двигателей, позволяющих реализовывать осевую мощность до 1200 кВт.

Расчеты показывают, что, например, эксплуатация подобных электровозов в шестиосном исполнении на линии Москва – Адлер позволяет сократить время движения поезда из 24 вагонов в одну сторону с 28 до 22 ч.

Одним из принципиальных, важнейших аспектов конструкции скоростного элек­тровоза является тип шестиосного экипажа. На сегодняшний день реализованы два типа экипажей: на двух трехосных тележках и трех двухосных. Первый тип традици­онно применяется на локомотивах Коломенского завода, второй – на локомотивах Новочеркасского электровозостроительного завода. Следует отметить, что эти два типа экипажей отличаются также конструкцией тягового привода колесных пар. На локомоти­вах Коломенского завода применен привод с опорно-рамным подвешиванием тягового электродвигателя и редуктора, который впервые был реализован на тепловозах типа ТЭП70. На локомотивах Ново­черкасского завода, в частно­сти на электровозе ЭП10, приме­нен привод с опорно-рамным подвешиванием тягового элек­тродвигателя и опорно-осевым редуктором. Согласно классификации профессора И.В. Бирюкова [1], эти приводы отнесены соответ­ственно к третьему и второму классам конструкций тяговых приводов. В нашем случае при рассмотрении проблемы обос­нования типа привода для скоростных электровозов будем придерживаться этой класси­фикации.

Отечественные пассажирские локомотивы существующих конструкций имеют конструкционную скорость 160 км/ч. На реализацию этой скорости рассчитаны и приме­ненные на этих локомотивах конструкции тяговых приводов.

Естественно, возникает вопрос: как отразится на надежности работы и динамических качествах этих приводов и в целом экипажной части повышение скорости с 160 до 200 км/ч?

Задача первого этапа рассматриваемой работы - оценить методом ком­пьютерного моделирования динамические качества электровоза с одним типом конструк­ции экипажной части, в частности на трех двухосных тележках, и динамическую нагру­женность приводов двух классов. Задача облегчается тем, что специалистами Всероссий­ского электровозного научно-исследовательского института (ВЭлНИИ, Новочеркасск) проработаны конструкции и основные параметры этих приводов для перспективного электровоза на двухосных и трехосных тележках.

|  |
| --- |
| 2_2_1_body.jpg  1  2  3  4  5 |
| Рис. 1. Общий вид анимационной модели электровоза:  1 – кузов локомотива; 2, 4 – крайние тележки; 3 – средняя тележка; 5 – наклонная тяга |

Компьютерное моделирование динамики движения электровоза реализовано с помо­щью известного программного комплекса «Универсальный механизм» (UM) [2; 3]. Мо­дуль UM Loco программного комплекса UM позволяет автоматизировать процесс синтеза математической модели пространственных колебаний рельсовых экипажей и моделировать их движение в прямых и кривых участках пути при наличии случайных, периодических или единичных вертикальных и горизонтальных неровностей.

На рис.1 показан общий вид анимационной модели электровоза, на рис. 2а, б изображены крайняя и средняя тележки.

|  |  |
| --- | --- |
| Тележка 2_2_1.bmp | Bogie_mid.bmp |
| а) | б) |
| Рис. 2. Внешний вид первой (а) и второй (б) тележек модели с приводом 3 класса:  1, 3, 4 – гидравлические гасители вертикальных колебаний, колебаний относа и виляния соответственно; 2 – опора типа «флекси­койл»; 5 – гидравлический гаситель первой ступени подвешивания; 6 – букса; 7 – поводок; 8 – маятниковая опора | |

Дадим краткое описание конструкции экипажной части рассматриваемого электровоза. Итак, кузов 1 электровоза (рис. 1) опирается на три двухосные тележки: 2, 3, 4. Конструкции крайних тележек идентичны, а средняя тележка отличается от них второй ступенью рессорного подвешивания. На крайние тележки кузов опирается через четыре пружины 2 типа «флексикойл» (рис. 2). Статический прогиб второй ступени составляет 118 мм. Гашение вертикальных колебаний осуществляют четыре гидравлических гасителя колебаний 1 (рис. 2). На среднюю тележку кузов опирается через четыре упругие маятниковые опоры 8 (рис. 2б), которые позволяют кузову перемещаться в поперечном направлении относительно тележки на 170…180 мм. Такое перемещение кузова возможно при движении в крутых кривых.

4

1

2

3

5

6

7

4

1

8

5

6

7

|  |
| --- |
| Маятниковая опора.bmp  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11 |
| Рис. 3. Схема опирания кузова  на среднюю тележку:  1, 2 - фланцы; 3 – стакан; 4 – стержень; 5 – прокладка; 6 – кольцо; 7 – пружина; 8 – болт; 9 – втулка; 10 – шайба; 11 - стакан |

Для гашения колебаний виляния каждая тележка оборудована двумя гидравлическими гасителями 4 (рис. 2), расположенными по бокам рамы тележки. Для гашения колебаний бокового относа на первой и последней тележках установлены два гидравлических гасителя 3 (рис. 2). Крайние тележки разнесены относительно оси симметрии локомотива на расстояние 7,21 м. Тяговые усилия от тележек на кузов передаются через наклонную тягу 5 (рис. 1), угол наклона которой составляет 5°. Наклонная тяга крепится к кузову через сайлентблок.

|  |
| --- |
| КМБ2кл.bmp  1  2  3  4  5  6  7 |
| Рис. 4. КМБ с приводом 2 класса:  1 – гидравлический гаситель колебаний первой ступени; 2 – рессорное подвешивание первой ступени; 3 – буксовый поводок; 4 – тяговый электродвигатель; 5 – резинокордная муфта; 6 – тяговый редуктор; 7 – реактивная тяга редуктора |

Колесно-моторный блок (КМБ) с приводом второго класса показан на рис. 4. Тяговый двигатель жестко закрепляется на раме тележки в трех точках: А, Б, В (рис. 5а). Вращающий момент от ротора на шестерню тягового редуктора передается через торсион и резинокордную муфту (рис. 5б). Тяговый редуктор имеет опорно-осевое подвешивание. Корпус редуктора одной своей частью опирается на ось, а другой – через наклоненную на 30° реактивную тягу 7 – на раму тележки (рис. 4).

|  |
| --- |
| Привод 2 кл.bmp  3  6  5  2  1  *А*  *Б*  *В* |
| а) б)  Рис. 5. Схема тягового привода:  а – на тележке (1 – тяговый редуктор; 2 – передаточный механизм; 3 – тяговый двигатель; *А, Б, В –* точки крепления тягового электродвигателя к раме тележки);  б – передаточный механизм (1 – зубчатая полумуфта; 2 – торсионный вал; 3 – ступица; 4 – резинокордный элемент; 5 – корпус муфты; 6 – якорь тягового двигателя) |

Передаточный механизм тягового привода позволяет компенсировать отно­сительные перемещения тягового двига­теля вместе с рамой и редуктора с колес­ной парой. В вертикальном направлении это обеспечивается за счет карданной по­датливости резинокордных дисков муфты и углового проскальзывания сферических зубьев полумуфты по цилиндрическим зубьям зубчатого венца, а в горизонталь­ной плоскости – за счет осевой податливо­сти резинокордных дисков в муфте. В слу­чаях превышения сил трения между сфе­рическими зубьями полумуфты 1 (рис. 5б) относительно цилиндрических зубьев зуб­чатого венца, запрессованного во втулку якоря ТЭД, относительные перемещения компенси­руют­ся за счет проскальзывания в зубчатой полумуфте [4].

3

4

1

2

|  |
| --- |
| Привод 3 кл.bmp  1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11 |
| Рис. 6. КМБ с приводом 3 класса:  1 – тяговый электродвигатель; 2 – корпус редук­тора; 3 – ведущая шестерня; 4 – поводок; 5 – пру­жина рессорно-осевого подвешивания; 6 – гидро­гаситель первой ступени подвешивания; 7 – букса; 8 – зубчатое колесо на ступице в сборе; 9 – полый вал; 10 – передаточный поводок; 11 – ступица ко­лесной пары |

Колесная пара диаметром 1250 мм вращается в одноповодковых буксах 6 (рис. 2). Ось колесной пары воспринимает нагрузку от массы через роликовые подшипники, а осевые инерционные нагрузки – спе­циальным шариковым подшипником. Продольные нагрузки от буксы к раме тележки пе­редаются через поводок 3 (рис. 4). Поводок закреплен на 20 мм ниже оси колесной пары. Рама тележки опирается на буксу через комплект винтовых пружин 7 со статиче­ским прогибом 45 мм. Гашение вертикальных и поперечных колебаний осуществляется с помощью гидравлического гасителя коле­баний 1, установленного под небольшим углом к вертикали.

|  |
| --- |
| 3  1  2  4  5  *А*  6  *В*  8  7  *Б*  Привод 3 кл.bmp |
| Рис. 7. Схема тягового привода 3 класса:  1 – пружина «флексикойл»; 2 – корпус редуктора; 3 – тяговый электродвигатель; 4 – рама тележки; 5 – колесная пара; 6 – букса; 7 – поводковая муфта; 8 – полый карданный вал; *А, Б, В* – точки крепления стянутых тягового двигателя и корпуса осевого редуктора |

КМБ с приводом 3 класса представлен на рис. 6.

Корпуса тягового двигателя 1 и осевого редуктора 2 стянуты в единое целое и закреплены в трех точках (А, Б, В) на раме тележки (рис. 7). Ведущая шестерня 3 жестко закреплена на хвостовике вала ротора тягового электродвигателя. Зубчатое колесо 8 (рис. 6) установлено на полый карданный вал 9 через подшипники. Тяговое усилие от венца зубчатого колеса 8 передается на полый карданный вал через поводки. В свою очередь, другим своим концом полый вал 9 через другие поводки 10 передает вращающий момент на колесный центр 11, а от него и на всю колесную пару. Таким образом, весь тяговый привод подрессорен, неподрессоренными остаются лишь колесная пара с буксовыми узлами. Буксы колесно-моторного блока с приводом третьего класса идентичны тем, которые были описаны ранее.

Отличия в конструкции рассматриваемых двух типов тяговых приводов, в частности увеличение необрессоренной массы за счет опирающегося на ось тягового редуктора, наличие реактивной тяги привода второго класса, различные параметры жесткости и демпфирования в связи колесной пары с рамой тележки и тяговым двигателем, влияют как на динамические качества локомотива в целом, так и на динамическую нагруженность элементов конструкции самих приводов.

Для оценки конструкций тяговых приводов исследовалось движение электровоза в прямых участках пути, где можно рассматривать интересующий нас диапазон скоростей 120…220 км/ч. В крутых и пологих кривых скорость движения рельсовых экипажей ограничивается не только воздействием на путь, но и так называемым непогашенным ускорением. Например, в кривой радиуса R = 650 м при возвышении наружного рельса 140 мм эта скорость равна 115 км/ч. В более пологих кривых движение экипажа мало чем отличается от его движения в прямых участках пути.

В качестве возмущающих воздействий со стороны пути приняты случайные вертикальные и горизонтальные неровности рельсовых нитей, параметры которых (по рекомендации ВНИИЖТ) соответствуют пути хорошего содержания. Для оценки динамических качеств электровоза приняты показатели, используемые в практике натурных испытаний (боковые, рамные силы, горизонтальные и вертикальные ускорения кузова, коэффициенты вертикальной динамики). Для оценки динамической нагруженности привода рассчитывались усилия в зубчатом зацеплении тягового редуктора.

Результаты расчетов приведены на рис. 8 - 13. Здесь 1, 2, …6 – порядковые номера колесных пар.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис.8. Боковые силы:  а – экипаж с приводом 2 класса; б – экипаж с приводом 3 класса | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис.9. Рамные силы:  а – экипаж с приводом 2 класса; б – экипаж с приводом 3 класса | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис.10. Коэффициент динамики 1 ступени подвешивания:  а – экипаж с приводом 2 класса; б – экипаж с приводом 3 класса | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис.11. Коэффициент динамики 2 ступени подвешивания:  а – экипаж с приводом 2 класса; б – экипаж с приводом 3 класса | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис.12. Ускорение кузова на месте машиниста:  а – экипаж с приводом 2 класса; б – экипаж с приводом 3 класса | |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| а) | б) |
| Рис.13. Усилия в зубчатых зацеплениях:  а – экипаж с приводом 2 класса; б – экипаж с приводом 3 класса | |

Как и следовало ожидать, заметная разница в динамических показателях экипажей с приводами второго и третьего классов наблюдается при скоростях движения свыше 40 м/с (144 км/ч). У экипажа с приводом второго класса с увеличением скорости движения наблюдается более интенсивный рост практически всех динамических показателей, за исключением коэффициентов динамики первой ступени рессорного подвешивания. Особенно заметна разница в силовых показателях. Так, максимальные боковые силы при скорости V = 50 м/с больше на 39%, рамные силы – на 47%; при V = 60 м/с – на 42 и 74% соответственно (рис. 8, 9).

У экипажа с приводом второго класса наблюдается увеличение численных значений коэффициентов динамики во второй ступени на 13% при V = 50 м/с (рис. 11) и уменьшение коэффициентов динамики первой ступени на 16% при этой скорости (рис. 10). Уменьшение КД1 у экипажа с приводом второго класса вполне объяснимо. Подрессоренная масса рамы тележки у этого экипажа меньше на 10% из-за применения опорно-осевого тягового редуктора.

На вертикальные ускорения кузова тип привода практически не влияет, горизонтальные ускорения кузова у экипажа с приводом второго класса заметно выше – на 60…70% при скоростях 50…60 м/с (рис. 12).

В наибольшей степени тип привода влияет на динамическую нагруженность зубчатых колес тягового редуктора (рис. 13). Усилия в зубчатом зацеплении редуктора привода второго класса в 2,5 раза больше при скоростях 50 и 60 м/с.

Таким образом, электровоз с приводом третьего класса при движении с высокими скоростями (V > 140 км/ч) имеет заметные преимущества по динамическим качествам и особенно по динамической нагруженности зубчатых колес тягового редуктора. Верхняя граница максимальной скорости при применении привода второго класса для экипажа на трех двухосных тележках, на наш взгляд, должна быть порядка 150…160 км/ч, не более.

Привод третьего класса вполне применим для электровозов с конструкционной скоростью 200 км/ч.

Анализ распределения силовых показателей (боковых и рамных сил) по колесным парам экипажа (рис. 8, 9) показывает, что средняя тележка (колесные пары 3 и 4) имеет заметно более высокий уровень этих сил. Эти результаты подтверждаются данными натурных испытаний электровоза ЭП 10, имеющего экипаж на трех двухосных тележках. Очевидно, что при проектировании скоростных электровозов необходим поиск дополнительных технических решений, направленных на улучшение динамических качеств средней тележки.

список литературы

1. Бирюков, И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог / И.В. Бирюков, А.И. Беляев, Е.К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
2. Погорелов, Д.Ю. Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм»/ Д.Ю. Погорелов // Вестник компьютерных и информационных технологий. –2005. – №4.
3. Ковалев, Р.В. Введение в моделирование динамики механических систем / Р.В. Ковалев, Д.В. Даниленко // САПР и графика. – 2008. – № 4. – С. 26 – 31.
4. Кодинцев, И.Ф. Электровоз ЭП1. Тяговый привод/ И.Ф. Кодинцев// Локомотив. – 1999. – №9. – С. 38 – 40.

Материал поступил в редколлегию 04.02.09.