

Для первого применения тепловозы оснащаются аппаратурой систем сигнализации, связи и управления движением поездов типов RZB 90, DSD (SIFA), GPS и GSM. Тепловозы можно эксплуатировать в сплотке из двух единиц с управлением по поездной шине WTB.

Опытный образец тепловоза Maxima 40 C'C' изготавливает специально созданная в феврале 2005 г. дочерняя компания Voith Turbo Lokomotivtechnik на заводе в Киле, где для этого построен цех площадью 9000 м². Здесь же планируют организовать мелкосерийное производство этих локомотивов. Как ожидают, первые заказы на партию тепловозов Maxima 40 C'C' поступят весной 2006 г.

Вместе с тем администрация Voith Turbo готова выпускать тепловозы в кооперации с какой-либо из локомотивостроительных компаний. Для этого она

может предоставить сотрудничающей стороне лицензию на использование ее конструкторских разработок, а также поставлять компоненты тягового привода, в частности гидравлические передачи, и иное оборудование. Однако особые надежды связаны с намечающейся в настоящее время тенденцией к производству локомотивов самими компаниями-операторами, в том числе государственными, имеющими, как правило, большую потребность в столь мощных тяговых средствах и большие возможности ее удовлетворения. В таком случае выпуск тепловозов Maxima 40 C'C' целесообразно организовать на предприятии железной дороги-заказчика, а объем заказов при этом может быть весьма значительным.

J. Pernička. Railvolution, 2005, № 3, p. 63.

Сравнение концепций механической части трехфазного тягового привода

Механическая часть тягового привода связана с его электрическим трактом на подвижном составе и поэтому представляет собой часть общей электромеханической системы. В настоящее время существует несколько концепций этого звена тягового привода.

Основными концепциями механической передачи в трехфазном асинхронном тяговом приводе большой мощности являются:

- полностью подрессоренная система с полым карданным валом;
- неподрессоренная система с опорно-осевым подшипником.

В то же время существует ряд других концепций, для которых требуется повышенный вращающий момент $M > 6$ кН·м и большой монтажный объем для размещения тяговых двигателей.

Прогресс в области создания постоянных магнитов на базе редкоземельных металлов позволил реализовать системы непосредственного тягового привода (без редуктора) для локомотивов высокой мощности. В данном случае речь идет об электрической машине с возбуждением от постоянных магнитов, представляющей собой синхронный двигатель. Такой привод может быть исполнен в разных модифи-

кациях: неподрессоренный, частично подрессоренный, полностью подрессоренный. Непосредственный привод имеет следующие преимущества:

- в связи с отсутствием редуктора не использует масла и практически не требует ухода;
- характеризуется простотой конструкции, особенно в неподрессоренном варианте, и низкими затратами на изготовление;
- является экономичным благодаря более высокому КПД по сравнению с редукторным приводом.

Непосредственный привод требует особых инструкций по техническому обслуживанию и ремонту, так как система возбуждения (постоянные магниты) здесь не может быть отключена. Особенности концепции двигателя с таким возбуждением предполагают также разработку новых правил эксплуатации, в частности способов пуска.

В качестве основных критериев сравнения и оценки концепций передачи рассмотрены следующие параметры:

- сложность конструкции и капитальные затраты на тяговый привод;
- нагрузка на путь под действием неподрессоренных масс, выраженная в колесной нагрузке;
- склонность к вибрациям при плохих погодных условиях и к низкому использованию сил сцепления, что ведет к повышенным нагрузкам на отдель-

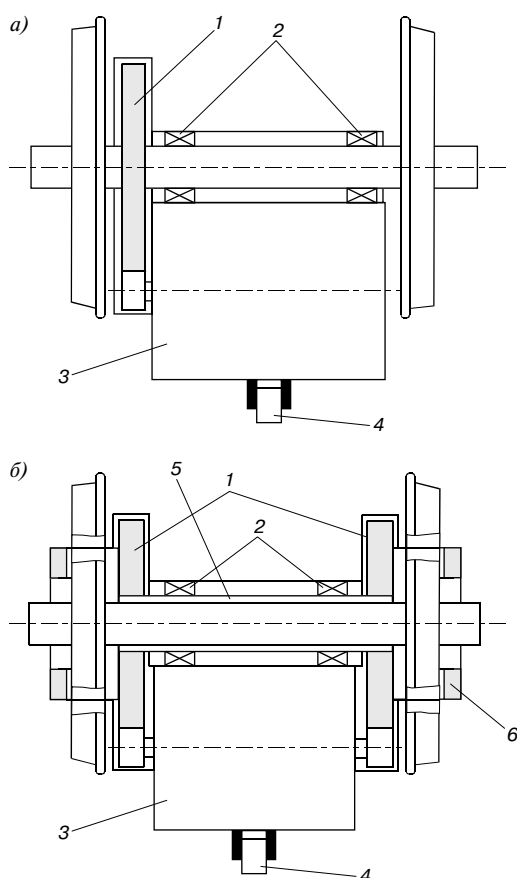


Рис. 1. Опорно-осевой тяговый привод:
a — неподрессоренный; *б* — частично поддрессоренный типа SSW;
 1 — редуктор; 2 — опорно-осевые подшипники; 3 — тяговый двигатель; 4 — точка опирания; 5 — полный карданный вал; 6 — резиновые кольца системы подвешивания SSW

ные компоненты и тем самым к недостаточной передаче силы тяги. Последнее обусловлено снижением вращающего момента в результате регулирующего воздействия защиты от боксования и юза;

- величина ударного тока короткого замыкания тягового двигателя, который вызывает экстремальные нагрузки компонентов привода и используется в качестве исходной величины при расчетах на механическую прочность привода.

Сравнение систем с опорно-осевым подшипником и с полым карданным валом

Простейшая концепция тягового привода — это неподрессоренная система с опорно-осевыми подшипниками (рис. 1, *a*), которые воспринимают реакции, вызванные работой зубчатого зацепления редуктора.

Основным недостатком такой конструкции является относительно большая неподрессоренная доля массы тягового двигателя и редуктора. С целью частичной динамической развязки неподрессоренной части при-

вода и поддрессоренных масс в 1964 г. для электровозов бывших Государственных железных дорог ФРГ (DB) серий 110 и 140 с однофазными коллекторными двигателями последовательного возбуждения была разработана передача с резиновыми кольцевыми опорами, получившая обозначение SSW (рис. 1, *б*).

Связь между совершающей вертикальные колебания колесной парой и вращающимся трактом тяговой передачи обуславливает значительные нагрузки на редуктор. Однако это обстоятельство одновременно дает определенные преимущества, так как благодаря этому упругие свойства пути позволяют гасить колебания вращающегося тракта тягового привода, предотвращая тем самым возникновение вибраций. В связи с этим почти все локомотивы, предназначенные для тяжелой грузовой работы, имеют тяговый привод с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей.

Более сложная концепция тягового привода представлена системой передачи с полым карданным валом. Сложность конструкции усугубляется расположением элементов механического тормоза (рис. 2, *a, б*). Тормозные диски можно было устанавливать на колеса с внутренней стороны, однако от такого решения большинство компаний отказалось, так как диски затруднили бы монтаж карданного соединения полого вала с колесом. На скоростных электровозах с полым карданным валом тормозные диски выполнены, как правило, полностью поддрессоренными, для чего используются различные варианты решений.

Основным преимуществом тягового привода с полым карданным валом является низкая неподрессоренная масса, которая образована лишь массой колесной пары и половиной массы полого карданного вала. Связи между вертикальными перемещениями колесной пары и вращающимся трактом тягового привода в данной конструкции не наблюдается. Зубчатое колесо редуктора относится к полностью поддрессоренной части привода и не связано с колесной парой. Элементы поводкового соединения не подвержены воздействиям осевых или угловых смещений.

В таблице представлены технические данные мощных скоростных электровозов с полым карданным валом, предназначенных для пассажирских перевозок, и тяжелых грузовых с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей. Как видно из сравнения, они имеют одинаковые массу, мощность, силу тяги, осевую формулу и основные размеры. Сравнение локомотивов по неподрессоренной массе тягового привода показало, что у скоростных электровозов она составляет 2500 кг, а у грузовых — приблизительно 5000 кг, т. е. почти в 2 раза больше. В табл. 1 приведена также масса колесных пар, которая в системе с опорно-осевыми подшипниками усилива-

Сравнение технических характеристик электровозов с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей (А) и с полным карданным валом (В)

Параметр	Тип электровоза	
	А	В
Максимальная скорость, км/ч	230	140
Продолжительная мощность, кВт	6 400	
Сила тяги при трогании, кН	300	
Осевая формула	2 ₀ — 2 ₀	
Длина по буферам, мм	19 580	
База тележки, мм	3 000	
Расстояние между шкворнями, мм	9 990	
Диаметр новых колес, мм	1 150	1 250
Масса колесной пары, кг	2 325	2 920
Масса двигателя с редуктором, кг	4 020	3 300
Общая масса, кг	86 000	

ет связь неподдрессоренной массы привода с его вращающимся трактом.

Стоимость в производстве системы тягового привода с опорно-осевыми подшипниками составляет 70 % стоимости привода с полным карданным валом. В обоих случаях учтены затраты на приобретение тягового двигателя и редуктора.

Непосредственный привод с возбуждением двигателей на постоянных магнитах

Непосредственный привод без поддрессирования является наиболее простым решением (рис. 3, а). В качестве монтажного пространства здесь может служить весь объем, заключенный между колесами моторной оси. Тяговый двигатель выполняется в виде трубы, охватывающей ось колесной пары. Он должен обеспечивать повышенный вращающий момент, больший обычного в *i* раз (коэффициент передачи редуктора обычного привода $i_G \approx 3 \div 6$). Для системы непосредственного привода наиболее пригоден многополюсный синхронный двигатель с возбуждением постоянными магнитами и большим внутренним диаметром статора. Альтернативой рассмотренному варианту может быть непосредственный привод с частичным или полным поддрессированием (рис. 3, б, в). В технической литературе уже были публикации о непосредственном тяговом приводе с полным поддрессированием для скоростного электровоза большой мощности, аналогичного локомотиву типа А, приведенному в табл. 1, но с колесами увеличенного диаметра (1250 мм).

Размеры тягового агрегата ограничены в осевом направлении механизмом передачи, а в радиальном — ходом пружин поддрессирования. Этими размерами, в

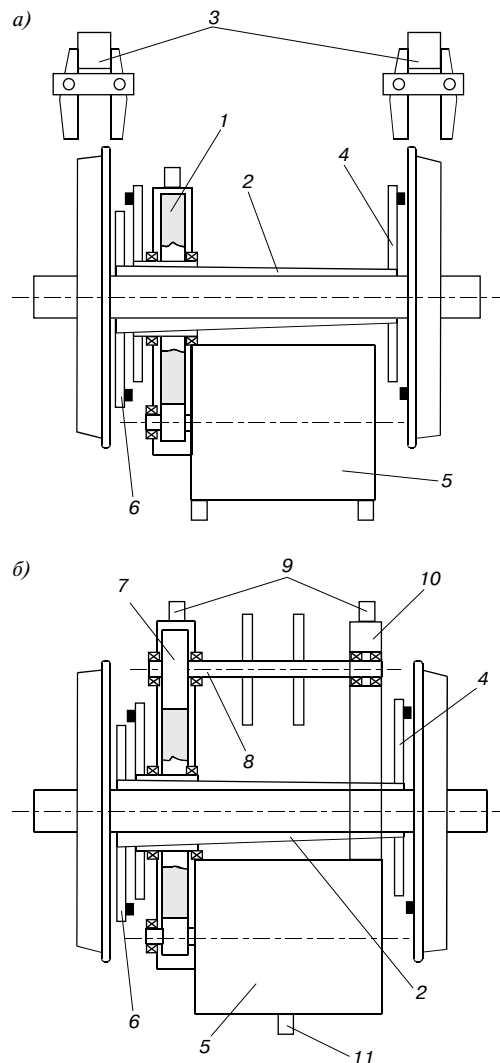


Рис. 2. Полностью поддрессоренный тяговый привод с полным карданным валом:

а — общая конструкция с дисковым тормозом; б — вариант конструкции с отдельным тормозным валом; 1 — редуктор; 2 — полный карданный вал; 3 — компоненты дискового тормоза (тормозные диски не показаны); 4 — поводковое соединение со стороны колеса; 5 — тяговый двигатель; 6 — поводковое соединение со стороны редуктора; 7 — редуктор с тормозной шестерней; 8 — тормозной вал с дисками; 9 — маятниковая подвеска; 10 — консоль; 11 — точка крепления на поперечной балке рамы тележки

свою очередь, определяются параметры электромагнитной системы двигателя. Неподдрессоренный безредукторный привод в отношении сил взаимодействия колеса с рельсом и их влияния на компоненты тягово-

Технические данные электровоза высокой мощности с непосредственным (безредукторным) тяговым приводом

Номинальная мощность на один двигатель, кВт	1600
Частота вращения, об/мин:	
номинальная	374,5
максимальная	1042,9
Момент вращения на колесную пару с колесами, изношенными на 50 % (диаметр 1210 мм), кН·м:	
номинальный	40,8
максимальный	45,56

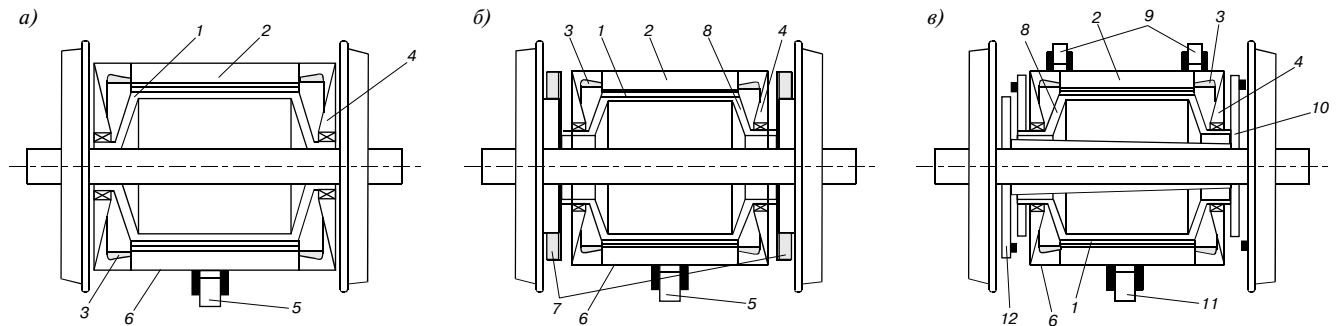


Рис. 3. Концепция непосредственного (безредукторного) тягового привода:

a — неподдресоренный; *б* — частично поддресоренный на колесной паре с помощью резиновых колец; *в* — полностью поддресоренный с полым карданным валом; 1 — ротор с постоянными магнитами возбуждения; 2 — пакеты железа статора; 3 — лобовые части обмотки; 4 — подшипниковый щит; 5 — точка опирания; 6 — корпус с водяной рубашкой охлаждения; 7 — резиновые кольца; 8 — полый вал ротора; 9 — точки подвешивания в тележке; 10 — поводковое соединение со стороны колеса; 11 — точка крепления на раме тележки; 12 — поводковое соединение со стороны двигателя

го тракта является механически более нагруженным. Безредукторный привод, упоминавшийся ранее как наполовину поддресоренный, подобно приводу SSW, опирается на колесную пару через полый вал с резиновыми кольцами. Последние обеспечивают частичную динамическую развязку между массой двигателя и неподдресоренной массой колесной пары, снижая тем самым уровень сил в контакте колесо — рельс. Такая развязка особо эффективна при наличии большого числа дефектов положения пути.

Масса безредукторного неподдресоренного привода составляет 5300 кг, включая массу колесной пары, равную 2500 кг. Таким образом, она лишь на 6 % выше, чем неподдресоренная масса привода локомотива типа В с опорно-осевыми подшипниками. Такая небольшая разница масс объясняется тем, что многополюсный тяговый двигатель с возбуждением постоянными магнитами, выполненный в виде трубы, в отличие от четырех- или шестиполюсного асинхронного трехфазного двигателя имеет полый ротор с облегченной несущей структурой. При этом следует учитывать и отсутствие массы редуктора.

Безредукторный привод неподдресоренной или частично поддресоренной конструкции позволил

разработать новую концепцию локомотивной тележки. Используемые в такой тележке двухэлементные поводки, с одной стороны, воспринимают реакцию момента вращения двигателя, а с другой — передают усилия тяги и торможения от колесной пары в обход рамы тележки непосредственно на кузов, причем подшипник тягового двигателя отводит силы реакции в корпус статора. Благодаря этому рама тележки может быть выполнена более легкой.

Возможен также вариант тележки с двумя последовательно соединенными двухэлементными поводками, представленный на рис. 4. Благодаря тому что монтажный объем безредукторного привода ограничен пространством между внутренними гранями колес, расстояние между колесными парами в тележке может быть уменьшено и оптимизировано с учетом квазистатической направляющей силы F_{qst} , действующей при движении в кривой. Конструктивная нижняя граница расстояния между осями в тележке приблизительно равна 2200 мм, при этом следует учитывать устойчивость движения тележки в прямых при повышенной скорости.

В дальнейшем изложении электровоз с неподдресоренным безредукторным тяговым приводом будет обозначен как локомотив типа С, а безредукторный

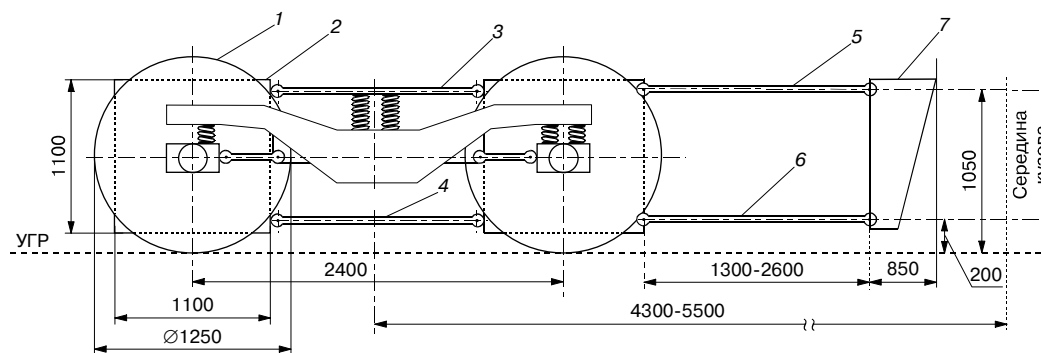


Рис. 4. Новая концепция тележки локомотива с неподдресоренным или частично поддресоренным непосредственным приводом и двухзвенным поводковым соединением:

1 — колесо; 2 — тяговый двигатель; 3, 4 — соответственно верхняя и нижняя штанги, соединяющие между собой тяговые двигатели; 5, 6 — соответственно верхняя и нижняя поводковые штанги, соединяющие тяговые двигатели с кузовом; 7 — кузов

с частичным подрессориванием — как типа D. При выборе их параметров за основу были приняты технические данные грузового локомотива типа В.

Влияние концепции тягового привода на силы в контакте колесо — рельс

Расчетная модель

Расчетные модели электровозов типов А, В, С и D базируются на многотельной системе (рис. 5), жесткий корпус которой обладает всеми шестью степенями свободы, а именно тремя прямолинейными и тремя вращательными. Детально моделированные тяговые приводы включают также вращающиеся тяговые тракты. В техническом университете Берлина модели единицы подвижного состава и пути соединяются между собой с помощью нелинейной модели контакта колесо — рельс. Модель пути учитывает, помимо прочего, его упругие изгибные деформации в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Модели локомотивов С и D построены на базе модели В. Передача тягового усилия от тележек к кузову через шкворни в ней заменена последовательно соединенными штангами, а вместо опорно-осевого привода использован безредукторный. Благодаря тому что система привода охватывает ось колесной пары, стало возможным уменьшить расстояние между осями колесных пар в тележках с 3000 до 2400 мм. Все остальные параметры как первичного, так и вторичного подвешивания оставлены такими же, как в модели локомотива В.

Поскольку четыре неподдресоренных безредукторных тяговых блока моделируемого локомотива в сумме на 4000 кг легче, чем блоки с опорно-осевой подвеской, которые также представляют собой неподдресоренную массу, эта разница масс в модели была добавлена к массе кузова. Благодаря этому общая масса локомотива, а следовательно, и статическая нагрузка на колесо ($Q_0 = 105,5$ кН) остались без изменения.

Частично подрессоренный вариант привода локомотива из-за наличия элементов упругого подвешивания приблизительно на 500 кг тяжелее, чем неподдресоренный. Эта разница учтена при распределении масс между тяговым приводом и кузовом в модели локомотива типа D. Соответственно согласованы и моменты инерции масс. Жесткость упругого подвешивания частично подрессоренного привода ориентирована на характеристики привода SSW электровоза серии 151 железных дорог Германии (DBAG). Она принята несколько большей, так как радиальные силы в элементах подвешивания безредукторного привода из-за дополнительной передачи тяговых и тормозных усилий больше, а результирующие величины сжатия, которые определяют срок службы, должны оставаться сравнимыми.

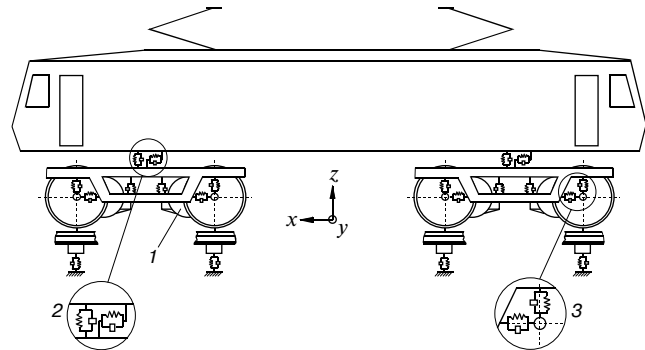


Рис. 5. Многотельная система для моделирования локомотива с отдельными моделями тяговых приводов, четырех контактов колесо — рельс и конструкции пути:

1 — тяговый привод; 2 — элемент пружина — демпфер системы вторичного рессорного подвешивания; 3 — элемент пружина — демпфер системы первичного рессорного подвешивания

Результаты моделирования

Для определения величины вертикальных сил Q на колесе моделировали поездки по двум отрезкам пути длиной 1,5 и 2 км участка Бамберг — Форххайм. Для этого использовали результаты измерений положения пути, проведенных DBAG перед измерительными поездками на этом участке между пикетами 54,5 км и 53 км, а также 42 км и 40 км. Для получения наибольшего числа дискретных результатов, необходимых для статистической оценки, модели каждого из участков разделили на отрезки длиной не 250 м, как того требуют инструкции МСЖД, а 100 м.

На рис. 6 показаны регрессионные прямые результатов статистической оценки максимальной вертикальной силы на колесе, полученных при моделировании поездок электровозов А, В, С и D. Из рисунка видно, что локомотив типа А, оборудован-

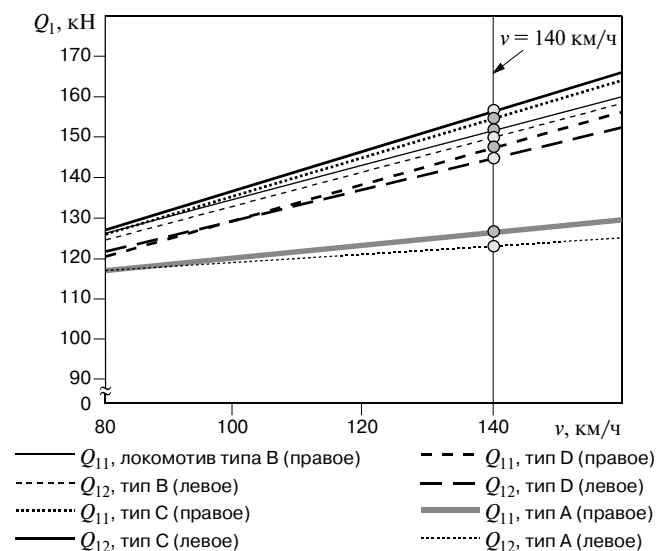
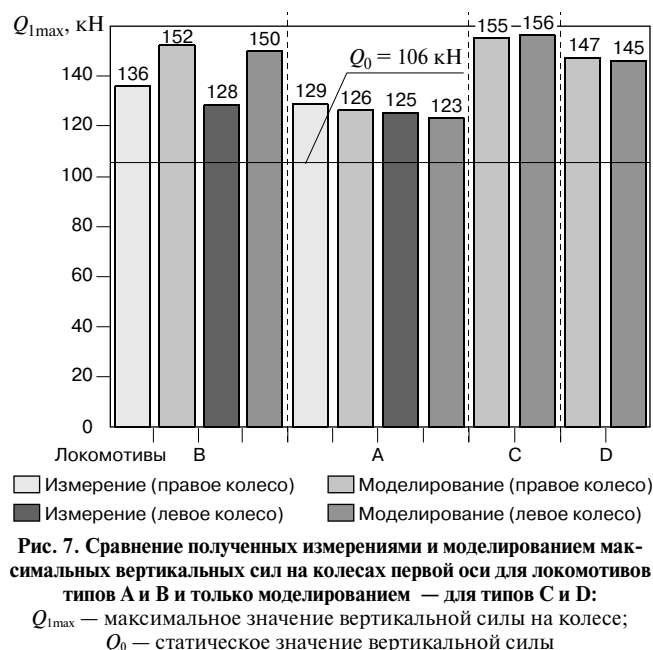


Рис. 6. Регрессионные прямые для рассчитанных максимальных значений вертикальной силы Q_1 на колесах первой оси электровозов типов А, В, С и D в функции скорости движения v



ный полностью подрессоренным тяговым приводом с полым карданным валом, имеет наименьшие силы на колесе. Регрессионные прямые других локомотивов, имеющих приблизительно в два раза бóльшие значения неподрессоренных масс, проходят выше и имеют увеличенную крутизну. Прямые колесных нагрузок локомотива типа В с опорно-осевым тяговым приводом лежат несколько ниже, чем локомотива С с неподрессоренным безредукторным приводом, но выше, чем линии локомотива D с частично подрессоренным приводом.

Рассчитанные доверительные области, относящиеся к регрессионным прямым, для обеспечения лучшей наглядности на рисунке не показаны. Однако при скорости 160 км/ч величина сил 180 кН и более не достигает верхней границы доверительной области. Для локомотивов с допустимой максимальной скоростью не выше 160 км/ч МСЖД устанавливает предел вертикальной силы на колесе в 200 кН. Отсюда следует, что все локомотивы, базирующиеся на этом пределе силы, должны иметь максимальную скорость не менее 160 км/ч. Это соотношение между максимальной скоростью и предельной величиной силы Q было подтверждено при последующих измерительных поездках. В связи с этим следует отметить, что электровоз DBAG серии 145 с опорно-осевым тяговым приводом рассчитан на максимальную скорость 160 км/ч.

Однако в соответствии с документом МСЖД 518 существует также ограничение для действующих на колесо сил при движении в кривых. В наибольшей степени это относится к направляющей силе Y на колесах локомотивов большой мощности массой более 80 т, таких, например, как электровоз серии 1016/1116 Федеральных железных дорог Австрии

(ÖBB), имеющий полностью подрессоренный тяговый привод с полым карданным валом, или серии 189 (DBAG) с неподрессоренным опорно-осевым тяговым приводом. Допустимый уровень направляющей силы устанавливается при разработке и оптимизации ходовой части, например при обеспечении необходимой продольной жесткости первичного рессорного подвешивания, выборе базы тележки и величины жесткости при ее развороте. Концепция тягового привода лишь опосредованно влияет на ходовые качества локомотива и величину направляющей силы Y .

Измерительные поездки

Для верификации результатов, полученных при математическом моделировании, в 1999 г. на участке Бамберг — Форххайм были проведены измерительные поездки локомотивов типов А и В. Величину вертикальной силы Q определяли методом не прямых измерений, а именно через величины ускорений неподрессоренных масс и сил в первичном рессорном подвешивании.

Оценка величин сил производилась на четырех участках длиной по 2,5 км, по которым были выполнены поездки со скоростью 120, 140 и 160 км/ч. Для обеспечения возможности прямого сравнения результатов расчета и измерения участки между указанными ранее пикетами разбили на отрезки длиной 100 м, как и при моделировании.

Результаты сравнения приведены на рис. 7. Здесь были использованы данные регрессионных кривых для скорости 140 км/ч. Сравнение показало, что результаты расчета и измерения для локомотивов типов А и В совпадают с высокой степенью точности. Влияние неподрессоренных масс в модели оказалось несколько бóльшим, чем в реальности.

Динамические нагрузки механических компонентов тягового привода

К наиболее важным нагрузкам, определяющим механическую прочность компонентов тягового привода, относятся вибрации, возбуждаемые силами, действующими в контакте колесо — рельс, которые в свою очередь могут быть вызваны, например, дефектами геометрии пути, а также в аварийных случаях — динамические воздействия токов короткого замыкания.

Вибрации возникают при плохих погодных условиях и одновременном высоком использовании сил сцепления, которое характерно для современных мощных локомотивов с большой силой тяги на ободе. Это ведет к высоким нагрузкам на компоненты привода и ухудшению передачи силы тяги в связи с

ограничением вращающего момента тяговых двигателей при высоких амплитудах вибраций.

Динамические воздействия тока короткого замыкания, которые при механическом резонансе могут привести к экстремальным нагрузкам на компоненты привода, возникают при отказах в тяговом преобразователе и также в большой степени определяют механическую прочность компонентов привода.

Вибрации

Вибрации компонентов тягового привода возникают в результате действия незатухающих колебаний сил сцепления в контакте колесо — рельс, которые возникают при достижении рабочей точки неустойчивой части характеристики сцепления. Если исходить из упрощенной характеристики, при которой действующий коэффициент сцепления k_x при заданных условиях в точке опирания колеса зависит лишь от разности скорости Δv_x между окружной скоростью колеса и скоростью его поступательного движения в продольном направлении x , то при высоком использовании сил сцепления и избытке силы тяги рабочая точка оказывается за максимумом коэффициента сцепления, т. е. на падающей части характеристики сцепления (рис. 8), где коэффициент сцепления падает с увеличением разности скорости Δv_x . Этот процесс имеет незатухающий характер. Отрицательное демпфирование можно представить математически, а именно с помощью линеаризации нелинейной характеристики в зоне рабочей точки. Следствием отрицательного демпфирования является возникновение вибраций, при которых оба колеса колесной пары начинают колебаться в противофазе, а в оси возникают напряжения под действием скручивающего момента большой амплитуды. Величина этой амплитуды зависит, с одной стороны, от отрицательного наклона характеристики и положения максимума коэффициента сцепления, с другой стороны — от наличия остаточного демпфирования со стороны вращающегося тракта привода. Последний оказывает влияние на вибрации в зависимости от его положения по отношению к узлу соединения тракта с колесной парой.

Для моделирования нарастания вибраций характеристика сцепления в моделях всех четырех локомотивов была параметрирована в соответствии с кривой, приведенной на рис. 8. Кроме того, при моделировании использовано семейство характеристик сцепления, для того чтобы можно было учесть влияние поперечных ускорений (по оси y). Блок выбора частоты вращения, реализованный в виде простого изодромного регулятора проскальзываний колеса, при моделировании всех локомотивов во всех режимах стационарно установлен на интервал времени $t = 5,5$ с для первой рабочей точки, выбранной по

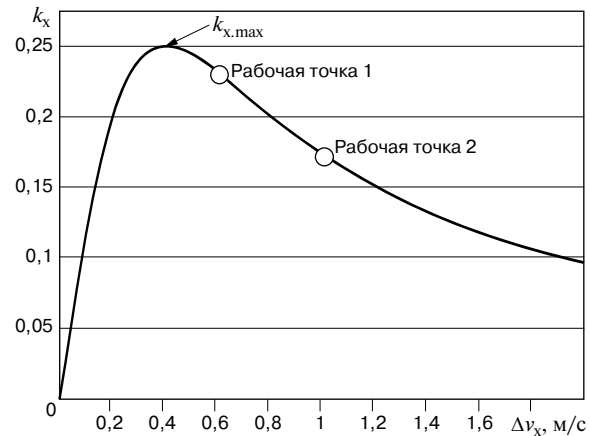


Рис. 8. Характеристика сцепления, использованная для моделирования вибраций:
 k_x — коэффициент сцепления; Δv_x — разность скорости

среднему значению разности Δv_x . Вторая рабочая точка была стационарно установлена для времени от $t = 14$ до $t = 18$ с, после чего уменьшался электромагнитный момент тяговых двигателей.

На рис. 9, а приведена полученная в результате этого моделирования кривая изменения скручивающего момента M_{RSW} , действующего на ось колесной пары, для локомотива типа А. В данном случае колеса колебались в противофазе с частотой $f = 65$ Гц, представляющей собой собственную частоту крутильных колебаний оси. Для наглядности на рисунке интервал этих колебаний от $t = 9,6$ до $t = 9,8$ вынесен

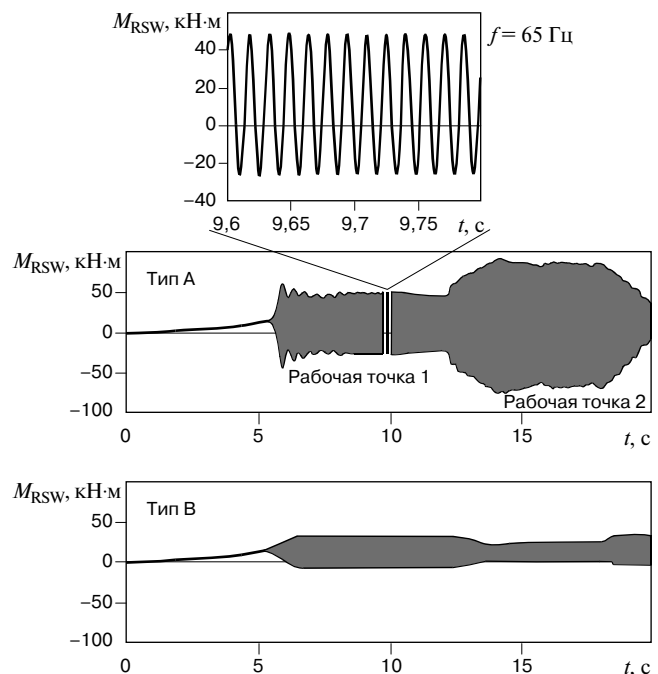


Рис. 9. Сравнение скручивающих моментов, действующих на ось колесной пары при вибрациях на пути с плохими условиями сцепления, высоким использованием сил сцепления и избытком силы тяги для локомотивов типа А (вверху) и В (внизу):
 M_{RSW} — скручивающий момент; t — время

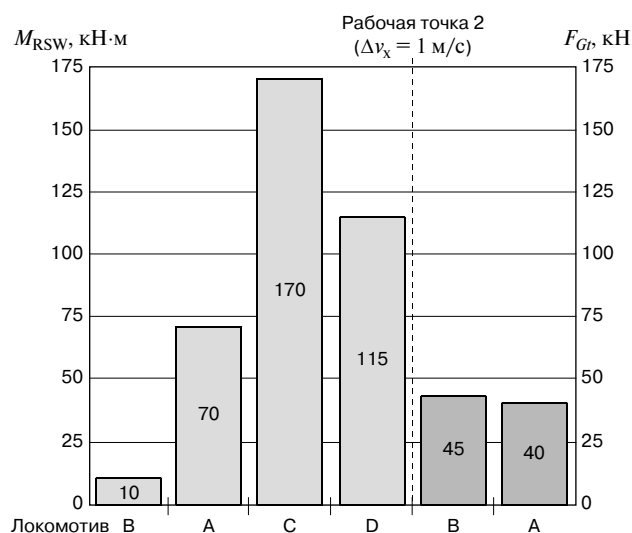


Рис. 10. Расчетные максимальные амплитуды скручивающего момента на оси колесной пары и тангенциальные силы в зубчатом зацеплении редуктора:

M_{RSW} — скручивающий момент; F_{Gr} — тангенциальная сила

и увеличен. Здесь речь идет о самовозбуждающихся колебаниях, являющихся следствием отрицательно демпфирования. После перехода на вторую рабочую точку амплитуда вращающего момента при заданных граничных условиях достигает 70 кН·м.

С целью сравнения на рис. 9, б приведена полученная на модели для локомотива типа В кривая изменения момента M_{RSW} , действующего на вал колесной пары. Моделирование для локомотивов обоих типов проводилось при одинаковых граничных условиях и рабочих точках. Для локомотива типа В максимальная амплитуда момента в первой рабочей точке достигала 20 кН·м. Это связано с тем, что здесь вибрации колес вызывают перемещение рабочей точки через максимальное значение коэффициента сцепления в стабильную область характеристики сцепления. Для локомотива типа А это имеет место в обеих рабочих точках, в то время как для локомотива В в интервале времени от 14 до 18 с рабочая точка с низкими значениями момента M_{RSW} перемещается лишь в нестабильной части характеристики.

Относительно низкие величины момента M_{RSW} для локомотива типа В являются также следствием связи между вертикальными перемещениями колесной пары и вращающимся трактом опорно-осевого тягового привода. В то же время вращающийся тракт тягового привода демпфируется в вертикальном направлении конструкцией пути, что препятствует росту амплитуды вибраций.

В передаче с полым карданным валом этого не происходит из-за отсутствия такой связи, что в определенных условиях может ограничивать возможности высокого использования сил сцепления.

Результаты моделирования локомотивов типов С и Д с безредукторным приводом, проводившегося

при таких же граничных условиях, как и для электровозов А и В, приведены на рис. 10. Здесь показаны максимальные амплитуды скручивающего момента колесных пар M_{RSW} , а также приведены значения тангенциальной силы F_{Gr} в зубчатом зацеплении редукторов локомотивов типов А и В. Все величины даны для установленной второй рабочей точки характеристики сцепления. При неподрессоренном безредукторном приводе электровоза типа С возникают высокие амплитуды скручивающего момента, действующие в оси колесной пары и достигающие 170 кН·м. Это объясняется прежде всего отсутствием какого-либо демпфирования, например, как в приводе с полым карданным валом за счет опор со сферическими подшипниками, а также тем, что ротор тягового двигателя, посаженный на ось колесной пары, вовлекает ее в колебательный процесс. Активное гашение колебаний с помощью электромагнитного момента тягового двигателя, которое было бы возможно в приводе с полым карданным валом, в случае непосредственного привода реализовать нельзя. Установка гасителей колебаний на колесах возможна для электровозов типа С. Упругие поводки и их удаленное от центров колебаний размещение на колесах значительно снижают величину скручивающего момента в оси колесной пары локомотива типа Д по сравнению с локомотивом С.

Нагрузка на зубчатое зацепление редукторов в электровозах с асинхронным трехфазным приводом приблизительно одинакова. В случае локомотива типа А высокие амплитуды крутильных колебаний колес развязываются с редуктором благодаря относительно низкой по сравнению с опорно-осевым приводом жесткостью карданного сочленения.

Динамические воздействия при коротком замыкании в тяговой цепи

Для определения высоких сил реакций и реактивных моментов в механических компонентах привода при коротком замыкании механическая модель локомотива была соединена с электрической моделью тягового двигателя. Возникающий в магнитном зазоре вращающий момент короткого замыкания проявляется как колебательный затухающий момент, имеющий почти такую же частоту, как у основной гармоники питающего напряжения. В системах с асинхронным трехфазным приводом в зависимости от модификации тяговых двигателей величина этого момента может достигать 5 – 6-кратного значения по сравнению с номинальным. При определенных условиях за счет явлений насыщения железа и поверхностного эффекта величина момента может быть еще выше. В синхронных двигателях с возбуждением постоянными магнитами без демпфирующей обмотки максимальный момент корот-

кого замыкания не превышает 1 – 2-кратного значения номинального.

На рис. 11 показаны кривые изменения момента короткого замыкания для электровоза типа В с асинхронными тяговыми двигателями и для локомотива С с синхронным двигателем, возбуждаемым постоянными магнитами. При составлении схемы замещения не учитывались явления насыщения и поверхностного эффекта. Разные частоты питающего напряжения выбраны в связи с тем, что частоты механического резонанса систем также различны. В модели принято, что внезапное короткое замыкание возникло при полной силе тяги, то есть при номинальном вращающем моменте тяговых двигателей.

Механический резонанс при коротком замыкании возникает на частоте колебаний момента вращения, что ведет к значительным дополнительным нагрузкам на компоненты тягового привода и узлы крепления их в тележке.

Если нельзя провести полный вариационный расчет момента, величина которого колеблется с частотой питающего тока тягового двигателя, то тогда следует определить значение собственной частоты механических колебаний двигателя, возбуждаемой при коротком замыкании. Для этого проводят отдельные моделирующие расчеты.

В области ослабления поля, в которой магнитный поток тягового двигателя падает, снижается также и амплитуда момента короткого замыкания. Отсюда следует, что данная частотная область не является критической с точки зрения динамических воздействий короткого замыкания.

В случае питания трехфазных электрических машин от преобразователей следует учитывать два разных варианта возникновения тока короткого замыкания:

- трехфазное короткое замыкание, при котором все три фазовых вывода обмотки двигателя имеют одинаковый электрический потенциал. Это возможно при коротком замыкании в преобразователе, а именно в промежуточном звене постоянного напряжения, или если два силовых вентиля одного фазового модуля не запираются. В этом случае возникает симметричная затухающая система токов двигателя;

- двухфазное короткое замыкание, при котором один силовой вентиль фазового модуля не запирается. Напряжение на выходе промежуточного звена в первый момент остается на прежнем уровне, при этом возникают две затухающие и направленные встречно системы тока двигателя. Ток проходит через поврежденный силовой вентиль и параллельно включенные силовые диоды при разности потенциалов, соответствующей напряжению промежуточного звена.

Двухфазное короткое замыкание трехфазного асинхронного двигателя, как показывает опыт, приводит к

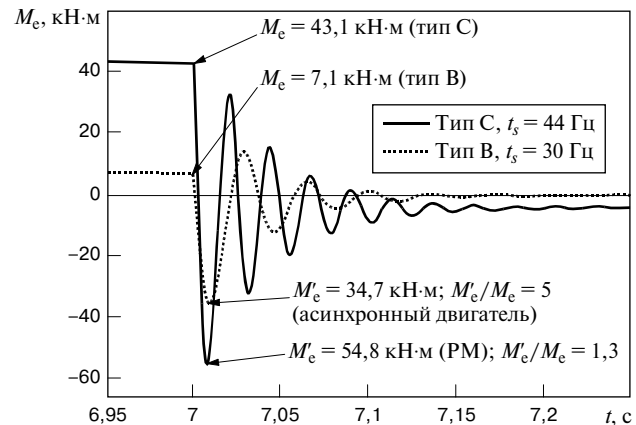


Рис. 11. Расчетная кривая изменения электромагнитного момента при трехфазном коротком замыкании синхронного двигателя с возбуждением постоянными магнитами локомотива типа С и асинхронного двигателя локомотива типа В:

M_e — квазистатический электромагнитный момент; M'_e — электромагнитный момент при коротком замыкании; РМ — синхронный двигатель с возбуждением постоянными магнитами; f_s — частота крутильных колебаний

увеличению вращающего момента на 20 % по сравнению с номинальным. Длительность переходного процесса в этом случае такая же, как и при трехфазном замыкании. В то же время максимальное значение вращающего момента при двухфазном замыкании зависит от фазового угла питающего напряжения в момент возникновения короткого замыкания.

Трехфазное короткое замыкание синхронного двигателя с возбуждением постоянными магнитами имеет при меньших амплитудах такие же характеристики, как и в случае асинхронного двигателя. Двухфазное же короткое замыкание такого двигателя приводит к длительным колебаниям величины вращающего момента, имеющим частоту питающего напряжения. В то же время амплитуды вращающего момента не выше, чем при трехфазном замыкании, однако они не затухают до тех пор, пока поддерживается напряжение промежуточного звена и пока защита не отключит отказавший преобразователь.

Длительный момент короткого замыкания не зависит от таких условий, существовавших в момент короткого замыкания, как ослабление магнитного поля и фазовый угол. Длительно действующий с постоянной частотой вращающий момент может привести к возбуждению механического резонанса, при котором наблюдается быстрый рост динамических усилий. Величина этих сил и моментов может быть ограничена лишь демпфирующими свойствами механической системы.

В случае типичного для мощных локомотивов питания двух тяговых двигателей одной тележки от индивидуальных инверторов и общего промежуточного звена следует иметь в виду, что трехфазное замыкание происходит синхронно и синфазно в обоих двигателях. Это приводит к тому, что рама тележки и

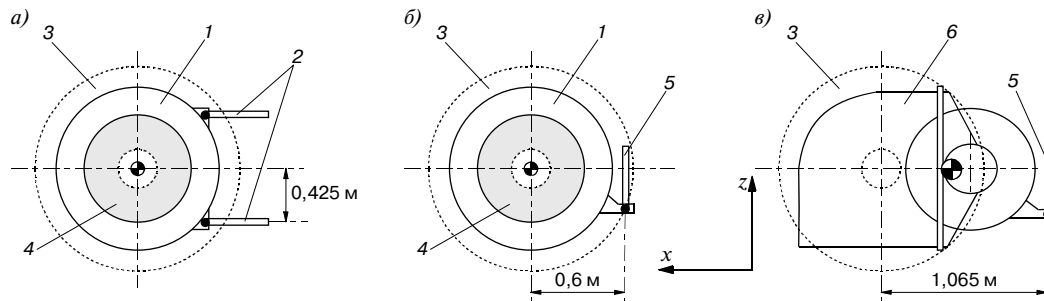


Рис. 12. Виды опирания тягового двигателя:

a — локомотив типа С с поводками в виде штанг; *б* — локомотив типа Е с опиранием на шкворневую балку рамы тележки; *в* — локомотив типа В с опорно-осевым приводом и опиранием на шкворневую балку

элементы крепления нагружаются динамическими усилиями короткого замыкания обоих тяговых агрегатов одновременно. Двухфазное короткое замыкание при индивидуальном питании двигателей возникает селективно, а именно в том двигателе, инвертор которого вышел из строя.

Сила сцепления, действующая в момент короткого замыкания в контакте колесо — рельс, также является важным фактором, влияющим на уровень реактивных моментов и сил в механических компонентах тягового привода. В опорно-осевом приводе из-за наличия связи между вертикальными перемещениями колесной пары и вращающимся трактом привода высокий динамический момент короткого замыкания вызывает значительные вертикальные колебания неподрессоренных масс. В эти колебания вовлекается также и конструкция пути. Поэтому при моделировании процессов, происходящих при коротком замыкании, необходимы:

- электрическая модель тяговых двигателей;
- общая модель локомотива, включающая контакт колесо — рельс;
- модель конструкции пути.

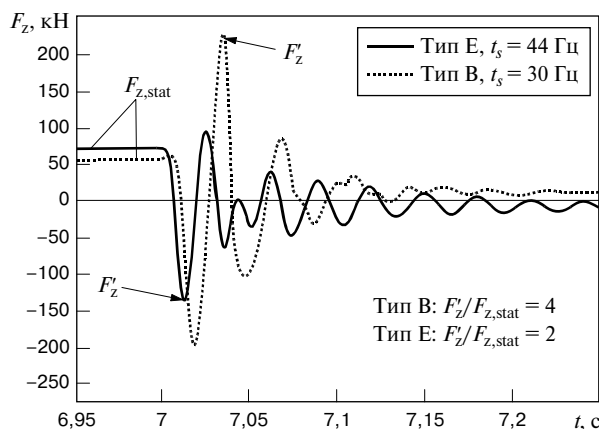


Рис. 13. Расчетные значения вертикальной силы в точках опирания тягового привода электровозов типов Е и В при трехфазном коротком замыкании:

F_z — вертикальная сила в точке опирания; $F_{z,stat}$ — квазистатическое значение вертикальной силы; F'_z — вертикальная сила в точке опирания при коротком замыкании; t — время; f_s — частота крутильных колебаний

В наибольшей степени это относится к локомотивам с опорно-осевым тяговым приводом.

Для сравнения реактивных моментов в точке опирания тяговых двигателей локомотивов типов В и С разработана модификация модели электровоза типа С. В этой модели рассмотренные ранее поводки в виде штанг, передающих усилия тяги и торможения, заменены обычными вертикальными опорами, как в опорно-осевом приводе. Передача усилий тяги в этом случае происходит через шкворни. Отличие от локомотива типа В состоит в непосредственном приводе и уменьшенной с 3000 до 2400 мм базе тележки. Такой локомотив при моделировании получил обозначение Е. Варианты опирания показаны на рис. 12.

Изменения в функции времени вертикальной силы в точке опирания тяговых двигателей третьей по ходу движения оси при трехфазном коротком замыкании в них на электровозах типов В и Е показаны на рис. 13. Возрастание вращающего момента при этом происходит в соответствии с кривой, изображенной на рис. 11. На локомотиве типа В при коротком замыкании в точке опирания происходит четырехкратное увеличение силы F_z по сравнению с номинальной. На локомотиве типа Е наблюдалось лишь двукратное увеличение. Возникавшие при этом частоты колебаний соответствовали условиям механического резонанса, при котором происходило максимальное увеличение сил в точке опирания.

На рис. 14 приведены для сравнения расчетные максимальные значения сил в точке опирания на шкворневой балке тележки локомотивов типов В и Е, на сферическом подшипнике локомотива типа А, а также в поводках между тяговым двигателем и кузовом локомотива типа С. Расчеты выполнены для случая трехфазного короткого замыкания. В качестве исходных показаны значения квазистатических сил, действующих в эксплуатационных условиях при полной силе тяги.

Для локомотива типа С следует отметить, что штанги поводков не только воспринимают реактивный момент во время вращения двигателя, но и передают усилия тяги и торможения от тележки к кузову.

В правой части рис. 14, кроме того, приведены значения тангенциальных сил F'_{Gt} в зубчатом зацеплении редукторов на электровозах типов А и В с асинхронным приводом. В асинхронном приводе электровоза типа А мягкая на кручение демпфированная связь редуктора с колесной парой, осуществляемая через полый карданный вал и резино-металлические поводки, обеспечивает значительную разгрузку этого привода по сравнению с опорно-осевым. Штанги поводков в приводе локомотива типа С испытывают лишь незначительное увеличение нагрузки при возникновении короткого замыкания и поэтому представляют собой лучшее техническое решение по сравнению со схемой вертикального опирания локомотива типа Е.

Сравнительная оценка концепций

Для заключительной сравнительной оценки были представлены следующие концепции тягового привода:

- полностью подрессоренный привод с полым карданным валом;
- неподрессоренный опорно-осевой;
- неподрессоренный или частично подрессоренный непосредственный привод с двигателем, возбуждаемым постоянными магнитами;

Оценка проводилась в отношении следующих критериев:

- сложность конструкции и цена;
- уровень нагрузок на колесе;
- вибрации при высоком использовании сил сцепления;
- влияние динамических сил при коротком замыкании тягового двигателя.

Результаты оценки привели к неутешительному выводу: на сегодняшний день нет оптимальной концепции тягового привода для локомотивов высокой мощности. Сравнение концепций прежде всего приводит к выводу о необходимости дифференцированного подхода при выборе типа привода и реализации концепций, специально выбранных для конкретных условий применения.

В наибольшей степени выбор концепции привода зависит от требуемой максимальной скорости локомотива. Далее следуют такие важные критерии, как надежность и высокая сила тяги, эффективно передаваемая при любых погодных условиях. Показатель сложности и цены должен включать в себя затраты жизненного цикла (LCC), в которые входят также расходы на потребленную энергию и текущее содер-

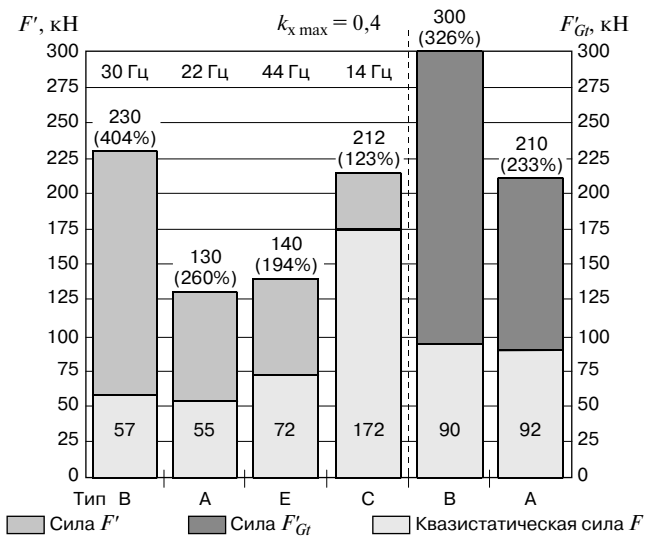


Рис. 14. Максимальные значения амплитуд вертикальной силы в точке опирания при трехфазном коротком замыкании, рассчитанные для электровозов типов А, В, С, Е, и тангенциальной силы в зубчатом зацеплении редукторов электровозов А и В:

F' — вертикальная сила при коротком замыкании; F'_{Gt} — тангенциальная сила при коротком замыкании; $k_{x max}$ — максимальный коэффициент сцепления

жание пути, испытывающего нагрузки от рассматриваемого привода. Безусловно, следует учитывать и динамические воздействия тока короткого замыкания тяговых двигателей, однако для эксплуатирующих компаний этот показатель имеет меньшее значение при выборе типа привода.

Для локомотивов большой мощности с максимальной скоростью $v > 160$ км/ч из-за высокого уровня сил на колесе подходит только полностью подрессоренный привод с полым карданным валом. В перспективе для этой цели станет пригодным и полностью подрессоренный непосредственный привод, который в отношении затрат LCC будет иметь несомненные преимущества перед асинхронным приводом.

Что касается мощных локомотивов с максимальной скоростью $v \leq 160$ км/ч, то здесь прочные позиции у опорно-осевого привода. В перспективе возможно также применение неподрессоренного или частично подрессоренного непосредственного привода, который позволяет применять тележки новой концепции. Если же речь идет о тяжелой грузовой работе с высоким использованием сил сцепления, то здесь наилучшим решением будет неподрессоренный опорно-осевой тяговый привод.

O. Körner. Elektrische Bahnen, 2004, № 11, S. 463 – 473.