

УДК 621.33.004.68.001.2

Возможность улучшения энергетических показателей электропоездов за счет модернизации схем силовых цепей

В. Д. Тулупов, А. А. Бриедис*

Рассмотрена проблема энергетической эффективности электропоездов постоянного тока. Постоянный рост стоимости электроэнергии диктует необходимость максимально повышать эффективность ее потребления. Большая часть эксплуатируемых электропоездов оборудованы системой привода с плохими энергетическими показателями, но с запасом по возможному сроку службы, поэтому актуальна проблема их модернизации. Проанализированы возможные способы модернизации и их экономическая целесообразность. Описаны варианты решения путем замены тяговых машин на асинхронные с инвертором напряжения и с помощью модернизации схем управления двигателями постоянного тока. Выделены характерные особенности построения приводов.

Показано, что асинхронный тяговый привод — это не только новое электрооборудование, а полностью новая идеология конструктивных решений от токоприемника до экипажной части. Сделан вывод, что тяге средних мощностей и средних скоростей привод переменного тока не обязателен и зачастую и убыточен.

Приведено сравнение надежности приводов, основывающееся на статистике эксплуатации, представленной в Сертификате аккредитации фирмы «Хитачи». В данном случае привод на основании асинхронного двигателя и инвертора напряжения не будет обладать преимуществами по надежности и стоимости, поэтому предложено модернизировать силовую схему управления двигателем постоянного тока заменой контакторного оборудования бесконтактным. Это требует гораздо меньших капиталовложений, но при этом появляется возможность оснащения электропоездов сложной, но эффективной системой контроля работоспособности, диагностики и защиты электрических цепей, что существенно повысит надежность и ремонтпригодность.

Необходимая для этого эффективная система тягового электропривода разработана и опробована в эксплуатации. Она может быть смонтирована на моторных вагонах без больших затрат и даст существенное повышение всех показателей электропоезда. Следовательно, ее целесообразно использовать как на эксплуатируемых электропоездах при их модернизации, так и на вновь выпускаемых.

Ключевые слова: электропоезд, контроллер, тяговый привод, энергосбережение.

* aleksandrs_briedis@mail.ru

Технико-экономическая эффективность электроподвижного состава (ЭПС) в основном определяется показателями используемого на нем тягового электропривода (ТЭП), главными из которых являются: стоимость изготовления, затраты на ремонты и обслуживание, срок службы, удельный расход энергии и надежность работы.

В настоящее время большая часть эксплуатируемых вагонов ЭП оборудована системой ТЭП с низкими энергетическими показателями, но с запасом по возможному сроку службы, поэтому чрезвычайно актуальна проблема их модернизации. Необходимая для этого эффективная система ТЭП была разработана и опробована. Она может быть смонтирована на моторных вагонах ЭП без больших затрат и способна существенно улучшить показатели ЭП. Поэтому ее целесообразно использовать как на эксплуатируемых ЭП при их модернизации, так и на вновь выпускаемых.

Основными устройствами ТЭП с любым типом тяговых машин (ТМ): коллекторными (КТМ) постоянного или переменного однофазного тока, бесколлекторными (БКТМ), асинхронными (АТМ), вентильными (ВТМ) и индукторными (ИТМ), определяющими его эффективность, являются регуляторы величины напряжения питания (РН), частоты тока в якоре (РЧ) и тока в обмотках возбуждения (РВ) при их наличии.[1]

На железные дороги многих развитых стран мира поставляется электроподвижной состав с АТМ. Более 80% мирового рынка электроподвижного состава обеспечивают четыре крупных фирмы-поставщика: Bombardier, Siemens, Alstom и Hitachi. За последние годы с их участием было создано большое количество тягового подвижного состава для различных систем электрической тяги.

В течение последних 30 лет в России проведено большое число испытаний по определению тягово-энергетических показателей различных систем ТЭП электроподвижного состава. Накоплен опыт создания привода с АТМ и применением инверторов напряжения, который можно использовать при оценке целесообразности создания отечественного электроподвижного состава.

Для состава со скоростями движения более 180 км/ч практически безальтернативным является бесколлекторный тяговый привод, так как высокие скорости недоступны для подвижного состава с коллекторными ТМ, поскольку окружная скорость якоря у них не может превышать 65 — 70 м/с или 50 — 60 м/с по поверхности коллектора. Важным преимуществом при использовании бесколлекторных тяговых БТМ в скоростном движении является и их высокая удельная мощность. Для тягового подвижного состава со скоростями движения менее 180 км/ч необходимые эксплуатационные показатели могут быть обеспечены ЭПС с КТМ [2].

Помимо этого, цена ЭПС с АТМ минимум вдвое выше по отношению к ЭПС с КТМ и, следовательно,

срок окупаемости может быть выше допустимых пределов. Для экономики это совсем некстати, поскольку многие пассажиры пользуются льготным проездом.

Известно, что асинхронный тяговый подвижной состав отличается от серийного коллекторного наличием сложного высокотехнологичного и наукоемкого оборудования. Перспективным его вариантом считается привод на основе преобразователя с инверторами напряжения, в конструкции которых применены IGBT-транзисторы. Но их стоимость достаточно высока.

Неизбежным вопросом при разработке асинхронного тягового привода является выбор системы охлаждения. Наиболее привлекательно традиционное воздушное охлаждение, но оценка возможности его реализации применительно к IGBT-транзисторам (особенно для электровозного уровня мощностей) показывает невозможность его реализации. Конструкция преобразователей должна быть рассчитана из того, что IGBT-транзисторы имеют в 2 — 3 раза больше потерь энергии по сравнению с обычными тиристорами (до 3 — 5 кВт на один прибор, у тиристоров эта величина составляет порядка 1,5 кВт). Такую тепловую энергию сложно отвести только за счет обдува металлических охладителей, поэтому практически неизбежно использование жидкостного охлаждения (масляного или антифриза), что принципиально усложняет построение преобразователя, его стоимость и увеличивает расходы на обслуживание.

Как показывает анализ зарубежного опыта, в Европе во многих случаях номинальную мощность ТМ принимают равной соответствующей максимальной мощности преобразователя, т.е. двигатель не может работать с перегрузкой без повреждения преобразователя. Так сделан и электровоз ЭП10. Его двигатели имеют часовую мощность 1200 кВт, являющуюся предельной и для преобразователя.

В России традиционно КТМ имеют мощность ниже максимально допустимой по преобразователю и существует возможность их работы с перегрузкой. Это касается не только кратковременных режимов пуска и разгона, но и движения на расчетном подъеме, что особенно важно для грузовых электровозов. Поэтому тяговые свойства российских пассажирских электровозов превосходят зарубежные с асинхронным тяговым приводом на участках со сложным планом и профилем пути.

Конструкция асинхронного тягового привода обладает одной специфической особенностью, которая в первые годы внедрения создавала большие проблемы. Известны случаи (на европейских железных дорогах) замены ТМ на первых сериях подвижного состава. Суть проблемы сводится к тому, что для каждого проекта тягового двигателя требуется пространственный расчет возможного механического резонанса в области крепления короткозамыкающего кольца роторной обмотки к стержням. Генератором этого резонанса явля-

ются пульсации момента, включая высшие гармоники. Если этот фактор не учитывать, то в течение первых лет эксплуатации возможно появление массовых изломов в обмотках ротора. Методика пространственных резонансных расчетов стала неотъемлемой частью проектирования АТМ [2].

АТМ можно включать только параллельно. Следовательно на одном моторном вагоне с четырьмя параллельно включенными АТМ нужно не менее двух независимо работающих тяговых инверторов. Каждый из них должен получать сигналы управления от своих датчиков напряжения и тока, а также датчиков частоты вращения.

Одной из серьезных проблем, возникающих при внедрении электроподвижного состава нового поколения, является электромагнитная совместимость с рельсовыми цепями СЦБ и АЛС, в которых используются сигнальные токи с частотами 25, 50, 175 Гц и т.д.

Известные проблемы обеспечения электромагнитной совместимости должны решаться как программными методами, так и специальными конструкторскими решениями: входными индуктивно-емкостными фильтрами, различными фильтрами радиопомех, особой компоновкой оборудования с минимальными индуктивностями шин и др.

Например, на вагонах метрополитена с АТМ приходится устанавливать фильтры массой от 1 до 1,5 т, чтобы ограничивать мешающее влияние пульсаций на работу систем сигнализации и связи метрополитена. Непроизводительные потери электроэнергии в фильтрах складываются с электроэнергией, затрачиваемой на их «перевозку» в вагонах, с их собственной стоимостью и стоимостью их обслуживания. Это снижает технико-экономические показатели вагонов.

Каждый вагон с дискретно-реостатным регулированием ДРУ за счет отсутствия тяжелых фильтров и меньшей, чем у вагонов с АТМ, массы электрооборудования дополнительно перевозит 10 — 20 пассажиров. Это значит, что метропоезд из 5 — 8 вагонов «бесплатно» перевозит от 50 до 150 человек [3].

Следует отметить, что асинхронный тяговый привод это не только новое электрооборудование, а полностью новая идеология конструктивных решений от токоприемника до экипажной части. Для создания надежного бесколлекторного электропривода, применительно к условиям работы российского подвижного состава, требуется провести большой объем исследовательских и конструкторских работ, связанных с разработкой узлов и макетированием преобразователя.

Внедрение электроподвижного состава с АТМ не ограничивается только решением перечисленных проблем. Нужно учитывать и ряд других аспектов. Один из них — необходимость создания специализированной ремонтной базы [3]. За рубежом параллельно с выпуском современного подвижного состава специально для него создаются ремонтные предприятия с новей-

шим компьютеризированным технологическим оборудованием и системами диагностики, органически дополняющими бортовые диагностические комплексы. При этом персонал депо и заводов практически не занимается ремонтом электроники, контракты предусматривают поставку переходного комплекта оборудования для замены вышедших из строя блоков, а их ремонт осуществляется производителем или фирменным сервисным центром. Затраты в электродепо на ремонт и обслуживание электрооборудования с инверторными системами управления (ИНСУ) в несколько раз превышают затраты на эксплуатацию электрооборудования серийных реостатных вагонов. А само обслуживание не под силу обычному персоналу.

Ведущие иностранные фирмы пошли на разработку дорогостоящего асинхронного привода с целью использовать его, в первую очередь, на мощных высокоскоростных электровозах и электропоездах. Это позволило им не только решать некоторые технические проблемы высокоскоростного движения, но и вывести конкурентную борьбу на этом рынке на новый, технологически недостижимый уровень, а затем скомпенсировать понесенные затраты за счет монопольных цен на вагоны с АТМ [3].

Тяге средних мощностей и средних скоростей привод переменного тока не обязателен и зачастую убыточен. Обширнейшие возможности для повышения надежности имеются у тягового привода постоянного тока при оснащении его силовой электроникой. Этот путь требует гораздо меньших капиталовложений, но он не был основательно проработан фирмами, поскольку не подходил им по конъюнктурным соображениям. По этим же соображениям асинхронный привод стали внедрять даже там, где его появление ни технически, ни экономически не оправдано, убеждая потенциальных заказчиков и конкурентов в единственности асинхронного пути.

Возможность достижения заметных эксплуатационных преимуществ у коллекторных тяговых двигателей связана с использованием бесконтактных элементов в силовых цепях тягового привода, что позволяет упростить схему силовой кабельной разводки и исключить практически всю контакторную аппаратуру (кроме быстродействующих выключателей), на долю которой в эксплуатации приходится немало порч и заходов на неплановые ремонты. При этом появляется возможность оснащения электропоездов хотя и сложной, но эффективной системой контроля работоспособности, диагностики и защиты электрических цепей, что существенно повышает надежность и ремонтпригодность ЭПС.

Основной недостаток сегодняшней тяги постоянного тока не в коллекторных ТМ, а в контакторном управлении их работой. Оно существенно снижает конкурентоспособность тяги постоянного тока. Более половины повреждений можно полностью исключить

из практики эксплуатации электропоездов, если перейти на современные бесконтактные схемы управления тягой.

Среди неисправностей электроаппаратуры, работающей при каждом пуске и торможении, большую часть составляют отказы силовых контроллеров, электропневматических и электромагнитных контакторов, блокировок и реле (62 % — 1600 неиспр./год) [4].

Наиболее часто ТМ повреждаются во время переходных процессов, вызванных нестабильной работой силовой контакторной аппаратуры и ее блокировок. Поэтому можно считать, что почти 2/3 всех неисправностей электропоездов в той или иной степени связано с неудовлетворительной работой контакторной аппаратуры [4].

Современный уровень развития силовой электроники позволяет усовершенствовать тяговое электрооборудование моторных вагонов, построить все элементы и системы тягового привода подобно объектам цифровой электроники.

Известно, что тяговый инвертор асинхронного привода нуждается в принудительном воздушном охлаждении импортных силовых транзисторов со скоростью обдува не менее 12 м/с. Он автоматически выключается из работы при их перегреве.

Тиристоры, разработанные отечественной электронной промышленностью для схем с напряженными режимами работы, в реостатных схемах электрической тяги будут практически «отдыхать» и станут работать надежно и долговечно. Это подтвердила практика применения контроллеров на опытных вагонах метро.

Важнейшим в эксплуатации является вопрос надежности тягового привода. Если развитие тяги пойдет по пути замены на вагонах реостатно-контактных контроллеров на тиристорный реостатный контроллер (ТРК), то надежность работы вагонов с ТРК, по сравнению с ИНСУ, повысится в 1,5 раза.

Предварительный вывод о том, что ТРК по надежности превзойдут системы ИНСУ, также основан на статистике эксплуатации, представленной в Сертификате аккредитации фирмы «Хитачи».

Анализ таблицы показывает, что надежность тяговых двигателей ТДМ-1Э превосходит тяговые инверторы фирмы «Хитачи» в 3,6 раза. И это несмотря на

то, что интенсивность их эксплуатации в 1,5 раза превышает интенсивность инверторов. Поэтому заменять более надежные тяговые двигатели постоянного тока менее надежными инверторами не следует [3].

Для повышения надежности электрооборудования отечественных вагонов, в первую очередь, следует снижать отказы аппаратов управления. Их доля в числе отказов составляет более 90%.

Реостатно-бесконтактные контроллеры наилучшим образом решают именно эту задачу. Они на порядок проще по управлению, алгоритму работы, схемно и конструктивно, чем ИНСУ и работают в гораздо менее напряженных тепловых режимах. Поэтому интенсивность их отказов будет, как минимум, вдвое ниже интенсивности отказов инверторов.

Целесообразность замены в схемах силовых цепей ЭПС механических контакторов тиристорными коммутаторами была обоснована в исследованиях МЭИ еще в 1983 г.

В 1984 г была запатентована схема силовых цепей транспортного средства с ее использованием применительно к моторному вагону. Подробное описание самой схемы и ее работы опубликовано в [5, 6].

Впоследствии схема с тиристорным реостатным контроллером (ТРК) была реализована на макетном вагоне метрополитена и на партии построенных Ленинградским вагоностроительным заводом (ЛВЗ) опытных вагонов метро. Их испытания в эксплуатации подтвердили надежность работы и высокие энергетические показатели.

Это техническое решение имеет преимущество перед использованием на вагонах АТМ, в особенности по стоимости, что и определяет целесообразность его использования как на новых вагонах, так и для модернизации эксплуатируемых.

Вагоны с АТМ могут иметь более высокую надежность в эксплуатации, если сравнивать их с вагонами старых моделей с морально устаревшими реостатно-контактными контроллерами. По отношению к модернизированным вагонам они не будут иметь преимуществ по надежности, существенной экономии электроэнергии и затратам в эксплуатации.

Оптимальный на сегодня путь повышения надежности тягового привода отечественных вагонов — за-

Наименование линии	Пробег вагонов км/мес.	Количество отказов инверторов за 480 тыс. км пробега
Hibiya	7800	1,71
Yurakucho	8800	0,65
Nanboku	8200	0,81
Среднее 3-х линий	8250	1,26
Сокольническая, 4 двигателя ТДМ-1Э	12500	0,35
Превосходство ТДМ-1Э над инверторами «Хитачи»	по интенсивности: $12500/8250 = 1,5$ раза	по надежности: $1,26/0,35 = 3,6$ раза

мена механических аппаратов управления современными электронными ТРК, работающими по принципу программируемых контроллеров. Этот путь намного проще, дешевле и эффективнее, чем переход на привод переменного тока с АТМ. Отечественная промышленность готова к его реализации.

Вагоны с ТРК будут сцепляемы с вагонами эксплуатируемого парка и в итоге окажутся более удобными для эксплуатации и более конкурентоспособными, чем вагоны с АТМ.

Литература

1. **Тулупов В.Д.** Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями // *Электросила*. 2002. Вып. 41. С. 196 — 210.

2. **Мугинштейн Л.А, Кучумов В.А, Назаров О.Н.** О выборе типа тягового электропривода электропод-

вижного состава // *Железнодорожный транспорт*. 2005. № 5. С. 38 — 41.

3. **Петров В.А, Николаев А.Г, Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена модели 81-540.7/541.7 с тяговым приводом повышенной надежности // *Метро и тоннели*. 2003. № 6. С. 22 — 24.

4. **Мнацаканов В.А.** Будущее — за бесконтактными аппаратами // *Локомотив*. 2005. № 9. С. 32 — 33.

5. **Тулупов В.Д. и др.** Схемы силовых цепей вагонов метрополитена с независимым возбуждением тяговых машин и тиристорным реостатным контроллером // *Труды МЭИ. Электрический транспорт*. 1992. Вып. 641. С. 36 — 45.

6. **А.с. № 1168445.** Тяговый электропривод транспортного средства / А.П. Марченков, В.Д. Тулупов // *Бюлл. изобрет.* 1984.

Статья поступила в редакцию 29.04.2016