

Повышение энергоэффективности поездов Синкансен

Электропоезда, эксплуатирующиеся на высокоскоростной линии Токайдо Синкансен, начиная с первой серии 0 и вплоть до новейшей серии N700 постоянно совершенствовались в аспектах повышения скорости движения, уменьшения длительности поездки, улучшения ходовых характеристик, обеспечения комфорта для пассажиров и сокращения расхода электроэнергии. Железнодорожная компания JR Central предприняла для этого ряд исследований и разработок по снижению массы тары и уменьшению сопротивления движению, а также по созданию тягового привода нового типа с применением современной силовой электроники.

Улучшение характеристик

Для улучшения обслуживания пассажиров, а также в связи с усилением конкуренции со стороны других видов транспорта, в частности воздушного, компания JR Central постоянно работает над совершенствованием организации движения поездов и увеличением провозной способности высокоскоростных линий. Компания уже повысила максимальную эксплуатационную скорость движения на линии Токайдо Синкансен с 210 км/ч (у поездов

серии 0; рис. 1) и 220 км/ч (у поездов серии 100; рис. 2) до 270 км/ч (у поездов серии 300 и 700; рис. 3 и 4). Максимальная скорость поездов серии N700 (рис. 5) на линии Токайдо Синкансен также составляет 270 км/ч, но благодаря внедрению новой системы наклона кузовов вагонов удалось поднять с 250 до 270 км/ч скорость их движения и в кривых радиусом 2500 м и более. На линии Санъё Синкансен максимальная скорость движения составляет 285 км/ч у поездов серии 700 и 300 км/ч у поездов серии N700.

Чтобы повысить скорость, общая мощность тягового привода была увеличена с 11 040 кВт у поездов серии 100 до 12 000 кВт у поездов серии 300 и 13 200 кВт у поездов серии 700. У поездов серии N700 мощность была увеличена на 30% по сравнению с поездами серии 700 и доведена до 17 080 кВт. В то же время если общая масса 16-вагонного поезда серии 100 составляла 925 т, у поездов серии 300 и последующих она при такой же составности была значительно снижена (примерно до 710 т).

Такой важный для интенсивного движения параметр, как стартовое (при трогании с места) ускорение, также неуклонно возрастал — с 1,6 км/ч/с (0,44 м/с²) у поездов серии 100 до 2,0 км/ч/с (0,56 м/с²) у поездов серии 700 и 2,6 км/ч/с (0,72 м/с²) у поездов серии N700. Увеличенному (на 30% по сравнению с поездами серии 700) стартовому ускорению поездов серии N700 могут позавидовать и пригородные поезда обычных линий.

Целью компании JR Central при разработке конструктивной концепции поездов серии N700 было создание «самого быстрого и высокотехнологичного подвижного состава для сквозных сообщений на линиях Токайдо и Санъё Синкансен» со значительно повышенными максимальной скоростью движе-



Рис. 1. Электропоезд серии 0



Рис. 2. Электропоезд серии 100



Рис. 3. Электропоезд серии 300



Рис. 4. Электропоезд серии 700

ния, скоростью прохождения кривых и стартовым ускорением.

Для улучшения эксплуатационных характеристик подвижного состава необходимо повышать мощность его тягового привода, снижать массу тары и уменьшать сопротивление движению. В то время как электропоезда первого поколения (серий 0 и 100) имели стальные кузова вагонов, тележки со шкворневыми балками и коллекторные тяговые двигатели постоянного тока, для электропоездов следующих поколений (серий 300, 700 и N700) характерны кузова вагонов из алюминиевого сплава, тележки без шкворневых балок, асинхронные тяговые двигатели с возможностью рекуперативного торможения и значительно улучшенная аэродинамика. В результате реализованных технических решений сопротивление движению новых поездов по сравнению со старыми удалось существенно уменьшить, как это показано на рис. 6.

Повышение скорости движения и совершенствование тягового привода

В последние годы JR Central понадобилось в возможно большей степени повысить эффективность перевозок. Для решения связанных с этим проблем был усовершенствован тяго-

вый привод электропоездов с использованием современной силовой электроники и асинхронных тяговых двигателей, что позволило внедрить рекуперативное торможение при переменном токе в контактной сети.

Повышение скорости движения поездов

Технические разработки по повышению скорости движения поездов на линии Токайдо Синкансен непрерывно продолжаются с момента ее ввода в эксплуатацию в 1960-х годах. Эксперименты в этом направлении с использованием опытных поездов начали интенсивно проводиться еще Национальными железными дорогами

Японии (JNR) в 1970-х годах. Рекорды скорости были установлены сначала поездом типа 951 (286 км/ч в 1972 г.), а затем поездом типа 961 (319 км/ч в 1979 г.).

В 1980-х годах, когда на железных дорогах Франции были введены в коммерческую эксплуатацию высокоскоростные электропоезда



Рис. 5. Электропоезд серии N700

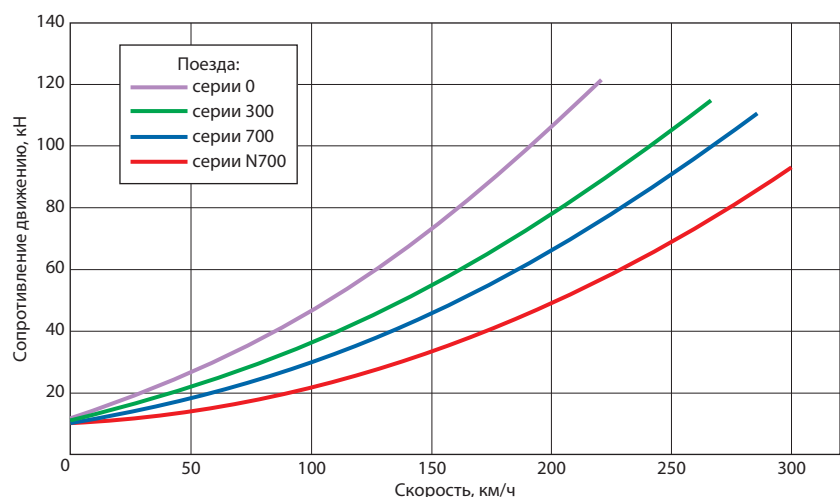


Рис. 6. Сопротивление движению высокоскоростных электропоездов разных серий

TGV, специалисты JNR приступили к дальнейшему повышению скорости движения поездов на высокоскоростных линиях железных дорог Японии с целью повышения конкурентоспособности с другими видами транспорта, особенно с воздушным. В то время максимальная скорость в регулярных перевозках на линии Токайдо Синкансен не превышала 240 км/ч. В связи с этим были предприняты работы по созданию нового подвижного состава для эксплуатации с максимальной скоростью не менее 260 км/ч на линии Токайдо Синкансен и 300 км/ч на линии Санъё Синкансен. При разработке новых поездов были учтены также требования на перспективу, связанные с обеспечением подвижным составом проектировавшейся тогда линии Хокурику Синкансен, имеющей участки с крутыми уклонами и кривыми малого радиуса.

На JNR рассматривались несколько новых подходов к снижению общей массы поездов и повышению их мощности, а также к решению проблем обеспечения эффективности тормозов на затяжных крутых уклонах. Эти требования стали своевременным поводом для внесения серьезных изменений в тяговый привод, включая внедрение рекуперативной тормозной системы переменного тока и асинхронных двигателей с самовозбуждением, что позволило уменьшить общую массу тары поезда за счет устранения необходимости в тормозных резисторах и меньшей массы асинхронных двигателей по сравнению с коллекторными двигателями постоянного тока.

При повышении скорости движения поездов на высокоскоростных линиях было необходимо также решить сопутствующие проблемы, такие, например, как снижение уровня шума и вибраций на прилегающих территориях исходя из общей заинтересованности общества в охране окружающей среды.

Рекуперативная тормозная система переменного тока

JNR приступили к разработке рекуперативной тормозной системы переменного тока для высокоскоростного подвижного состава именно вследствие необходимости ее применения на линии Хокурику Синкансен.

Хотя максимальная крутизна уклонов на высокоскоростных линиях сети Синкансен, как правило, не превышает 15‰, на линии Хокурику Синкансен в целях сокращения длительности поездки по маршруту Йокогама — Каруидзава предельная крутизна уклонов увеличена до 30‰. Надежная работа на этом участке требует применения подвижного состава с улучшенными тягово-тормозными характеристиками. Для удержания высокоскоростных поездов, движущихся по крутым затяжным спускам, необходимы специальные меры для гашения их огромной кинетической энергии. Если для этой цели применить механическую тормозную систему, потребуется оснастить поезда тормозными дисками большого диаметра, что повышает массу необрессоренных частей вагонов. С другой стороны, для реостатной тормозной системы требуется использование крупногабаритных и тяжелых резисторов, чтобы преобразовывать генерируемую при торможении электроэнергию в тепловую и рассеивать ее, что может, однако, оказывать отрицательное тепловое воздействие на оборудование, размещенное под кузовами вагонов. На JNR полагали, что применение рекуперативной тормозной системы переменного тока является идеальным решением, так как эта система возвращает генерируемую при торможении электроэнергию в контактную сеть и устраняет негативный эффект рассеяния тепловой энергии в окружающей среде. Кроме того, отсутствие тормозных резисторов позволяет уменьшить мас-

су тары поездов и, соответственно, снизить необходимую тормозную мощность.

Первоначально специалисты JNR пытались применить на высокоскоростных поездах модифицированную систему рекуперативного торможения переменного тока с внешним возбуждением, которая к тому времени уже практически использовалась на подвижном составе обычных линий. Однако было установлено, что применение системы с внешним возбуждением не может обеспечить необходимых для высокоскоростных поездов тормозных характеристик из-за очень больших значений подлежащей гашению кинетической энергии при движении с высокой скоростью, а также из-за больших реактивных сопротивлений в контактной сети при намного больших расстояниях между тяговыми подстанциями по сравнению с обычными линиями.

Это потребовало разработки рекуперативной системы торможения переменного тока с самовозбуждением, работа которой не зависит от расстояния между тяговыми подстанциями. К тому времени стали доступными самокоммутируемые силовые полупроводниковые приборы — запираемые тиристоры типа GTO, что способствовало успешному решению проблемы.

Тяговый привод с асинхронными двигателями

Использование технологий, примененных в рекуперативной тормозной системе переменного тока с самовозбуждением, позволило реализовать систему тягового привода с асинхронными двигателями и с преобразованием энергии по принципу широтно-импульсной модуляции.

В отличие от двигателей постоянного тока асинхронным двигателям не требуются щеточно-коллекторные узлы, у них отсутствуют искрение и риск короткого за-

мыкания между щетками, а объем работ по техническому обслуживанию значительно меньше. Частные железнодорожные компании Японии, такие, как Kumamoto City Transportation Bureau, Tokyu Corporation, Kintetsu Corporation и другие, стали применять тяговый привод с асинхронными двигателями с 1980-х годов, причем это делалось скорее с целью снижения массы, чем для сокращения объема работ по техническому обслуживанию.

Короткозамкнутые асинхронные двигатели характеризуются высокой частотой вращения и простотой конструкции с отсутствием изнашиваемых деталей (коллекторов и щеток). Поэтому они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям высокоскоростного подвижного состава по массе и мощности. Однако из-за сложности регулирования частоты вращения и крутящего момента асинхронных двигателей их применение в тяговом приводе было ограничено вплоть до появления микропроцессорных систем управления.

В 1985 г. JNR провели эксперименты с использованием двух моделей асинхронных двигателей уменьшенного масштаба для тягового привода высокоскоростных поездов с целью сравнения систем регулирования по току и по напряжению. В результате было установлено, что система регулирования по напряжению имеет преимущества с точки зрения подавления гармоник, оптимального контроля коэффициента мощности и снижения массы. Поэтому в дальнейшем особое внимание было уделено совершенствованию силовых тяговых преобразователей напряжения. Параллельно с экспериментами на моделях уменьшенного масштаба на JNR была создана полномасштабная модель тягового привода с асинхронным тяговым двигателем мощностью 330 кВт с целью проверки работоспособности

системы управления, определения уровня повышения температуры и оценки снижения массы двигателя. Проведенные испытания подтвердили надежность системы тягового привода с асинхронными двигателями.

В то время как номинальная мощность и масса обычного тягового двигателя постоянного тока типа МТ 202 (такие двигатели применялись на поездах серии 100) составляли 230 кВт и 825 кг соответственно, у опытного асинхронного тягового двигателя, изготовленного на начальном этапе разработки в 1984 г., эти показатели составляли 330 кВт и 750 кг соответственно. Эти цифры демонстрируют преимущества асинхронных тяговых двигателей с точки зрения повышения мощности и уменьшения массы.

После приватизации Национальных железных дорог Японии в 1987 г. были образованы шесть региональных пассажирских железнодорожных компаний, в том числе и JR Central. Многие конструктивные решения, примененные JNR при разработке системы тягового привода с асинхронными тяговыми двигателями, были переданы JR Central или приобретены ею позднее. С течением времени у асинхронных тяговых двигателей типа ТМТ 3 для поездов серии 300, которые были введены в коммерческую эксплуатацию в 1992 г., указанные выше показатели составили 300 кВт и 390 кг соответственно. Видно, что удельная (на единицу мощности) масса этих двигателей равна 1,3 кг/кВт и составляет примерно лишь треть этого показателя у обычных тяговых двигателей постоянного тока. Меньшая масса асинхронных тяговых двигателей позволила устанавливать их на тележках без шкворневых балок, которые, естественно, легче и проще по конструкции, чем тележки со шкворневыми балками.

Силовая электроника в тяговом приводе высокоскоростных поездов

Тяговый привод с асинхронными двигателями, впервые внедренный на поездах серии 300, был даже более сложным, чем практически необходимо, что позволило в дальнейшем улучшить его функциональные характеристики и повысить быстродействие. В 1997 г. компании JR Central и JR West совместно создали опытный образец поезда серии 700, который стал преемником поездов серии 300.

Разработка поездов серии 700 была нацелена на такие качественные усовершенствования эксплуатируемого высокоскоростного подвижного состава, как улучшение тяговых характеристик, повышение уровня комфорта по плавности хода, сокращение объема работ по техническому обслуживанию и снижение стоимости изготовления. JR Central реализовала для поездов серии 700 облегченный тяговый привод повышенной мощности за счет перехода на более эффективные полупроводниковые силовые приборы — биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT, которые были применены и на высокоскоростных поездах последующих серий.

Облегчение тягового привода

На железных дорогах Японии начиная с поездов серии 0 постоянно ведется работа по облегчению тягового привода. Уменьшение общей массы тары поездов является эффективным средством снижения уровня шума и вибраций на прилегающих к линиям территориях, который естественным образом повышается по мере роста скорости движения поездов. Проблемы, осложняющие уменьшение массы таких компонентов механической части, как кузова и тележки вагонов, ясно указывали на необходимость облегчения тягового привода за счет ис-

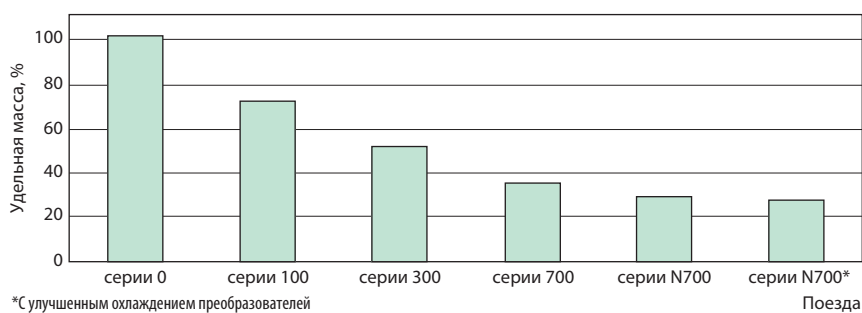


Рис. 7. Удельная масса высокоскоростных электропоездов разных серий

пользования передовых достижений в области силовой электроники, появившихся в последнее время.

На рис. 7 показана динамика снижения удельной массы поездов при одновременном повышении мощности тягового привода. Видны большие изменения, которые произошли при переходе от тягового привода с двигателями постоянного тока (поезда серий 0 и 100) к тяговому приводу с асинхронными двигателями (поезда серии 300 и последующие). Замена GTO-тиристорных, которые применялись в поездах серии 300, на IGBT-транзисторы привела к дальнейшему облегчению и повышению мощности тягового привода поездов серий 700 и N700. В результате удельную массу поездов серии N700 по сравнению с поездами серии 0 удалось уменьшить более чем на 70%.

В связи с тем что масса силовых преобразователей является преобладающей в тяговом приводе с асинхронными двигателями, в поездах серии N700 вместо обычного их охлаждения с принудительной вентиляцией применено квазиестественное охлаждение потоками воздуха, образующимися при движении поезда (типа приточной вентиляции), с минимальными коммутационными потерями в силовых полупроводниковых приборах. Новая система охлаждения преобразователей, в которой отсутствуют мотор-вентиляторы, воздуховоды и хладагенты, позволила снизить массу тары поезда и уменьшить объем работ по техническому

обслуживанию. JR Central убедилась в улучшении технико-эксплуатационных характеристик силовых преобразователей с новой системой охлаждения, установленных на опытном поезде серии N700, в процессе ходовых испытаний, проведенных в 2005 г. С 2007 г. такие преобразователи устанавливаются на поезда серии N700. Мощность этих поездов, эксплуатируемых на линиях Токайдо и Сангё Синкансен, на 30% больше, чем поездов предыдущей серии 700.

Благодаря внедрению новых силовых преобразователей и усовершенствованной системы охлаждения компания JR Central успешно решила задачу уменьшения массы тары и повышения мощности своих поездов. В перспективе дальнейшее улучшение мощностных и массогабаритных параметров высокоскоростного подвижного состава может быть достигнуто за счет применения силовых полупроводниковых

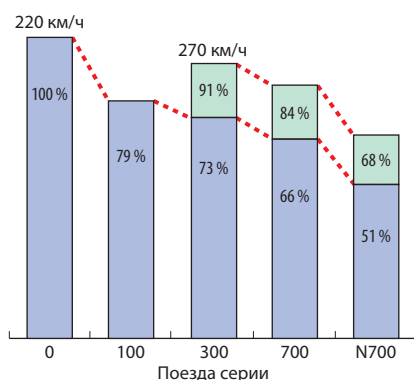


Рис. 8. Потребление электроэнергии электропоездами разных серий при движении с разной скоростью

приборов очередного поколения с малыми потерями мощности на основе карбида кремния (SiC).

Экономия энергии

Снижение сопротивления движению подвижного состава за счет улучшения его аэродинамических характеристик является эффективным средством уменьшения потребления энергии. Для тягового привода большое значение имеет снижение массы, повышение эффективности работы силовых преобразователей на IGBT-транзисторах, а также применение рекуперативной тормозной системы. На рис. 8 показан в сравнении расход электроэнергии высокоскоростными поездами разных серий. Видно, например, что поезда серии N700 при движении на линии Токайдо Синкансен по маршруту Токио — Осака с максимальной скоростью 220 км/ч потребляют почти в 2 раза меньше энергии, чем поезда серии 0, а при движении с максимальной скоростью 270 км/ч — почти на треть меньше, чем поезда серии 0 при движении со скоростью 220 км/ч.

Энергоэффективность тяги еще более повысится, если JR Central внедрит синхронные тяговые двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (PMSM). В настоящее время специалисты компании разрабатывают облегченные тяговые двигатели PMSM для высокоскоростного подвижного состава. Опытный образец двигателя типа PMSM в ходе испытаний продемонстрировал более высокую (на 5%) эффективность по сравнению с эквивалентными по мощности асинхронными тяговыми двигателями. Моделирование движения поезда с тяговыми двигателями PMSM по маршруту Токио — Осака показало возможность снижения энергопотребления на 7%.

M. Yoshizawa, K. Sato, Y. Yamamoto. Japanese Railway Engineering, 2009, № 163, p. 4–7.