

Герметизированный синхронный тяговый двигатель с постоянными магнитами для пригородных электропоездов

Асинхронные тяговые двигатели с воздушным охлаждением широко используются на железнодорожном подвижном составе. Однако они периодически требуют внутренней очистки, а вентиляторы системы охлаждения излучают довольно много шума. Для решения этих проблем предложено в качестве тяговых использовать герметизированные синхронные электродвигатели с постоянными магнитами, имеющие такую же удельную мощность. Ниже приведены результаты сопоставительных температурных и акустических испытаний такого двигателя, а также расчетов потребления энергии.

Введение

Системы воздушного охлаждения тяговых двигателей железнодорожного подвижного состава обеспечивают снижение массы самого двигателя и повышают его выходную мощность. В частности, самохлаждаемые электродвигатели, которые имеют вентилятор, смонтированный непосредственно на валу двигателя (рис. 1, а), обычно применяются в качестве тяговых на моторвагонных поездах железных дорог Японии. Система самовентиляции характеризуется простотой и эффективностью. Однако вентилятор системы охлаждения является главным источником шума при вращении двигателя с высокой частотой. Другую проблему, связанную с использованием такой системы, представляет загрязнение внутренности двигателя частицами пыли, находящимися в потоке охлаждающего воздуха. Для устранения указанных загрязнений двигатели периодически очищают.

Если же электродвигатель выполнен герметизированным (рис. 1, б), шум экранируется, а пыль внутрь проникнуть не может. Однако использование принципа простого капсулирования обычных тяговых двигателей может привести к их перегреву при работе. Для решения этой проблемы лаборатория тяговых систем технологического отдела подвижного состава Научно-исследовательского института железнодорожной техники Японии (RTRI) предложила в качестве тя-

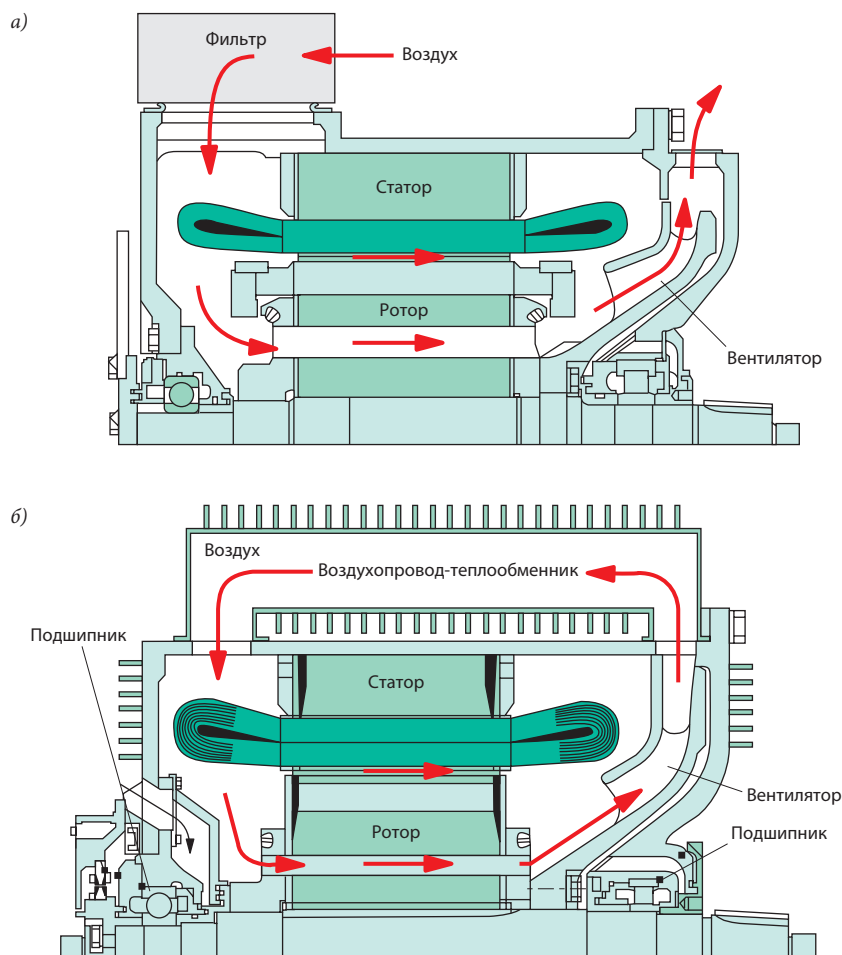


Рис. 1. Продольный разрез тяговых двигателей: а — с самовентиляцией; б — герметизированного

говых использовать высокоэффективные герметизированные синхронные электродвигатели с постоянными магнитами.

Обычно синхронные двигатели с постоянными магнитами имеют больший КПД (благодаря отсутствию потерь в роторе), чем асинхронные. Соответственно, меньшее выделение тепла требует меньших усилий для охлаждения таких синхронных двигателей по сравнению с обычными асинхронными. Этот фактор позволил разработать малозумный, энергосберегающий и практически не требующий технического обслуживания синхронный тяговый двигатель с постоянными магнитами в герметизированном исполнении, массогабаритные и мощностные характеристики которого практически те же, что и у самовентилируемых асинхронных двигателей.

Конструкция и особенности двигателя

Технические требования

Опытный образец нового тягового двигателя изготовлен в основном для того, чтобы убедиться в эффективности системы охлаждения и понижении уровня шума. Технические требования к нему были составлены так, чтобы его характеристики были подобны характеристикам обычного тягового двигателя. В табл. 1 приведены соответствующие этим требованиям основные характеристики опытного и обычного тяговых двигателей, в табл. 2 — параметры условного электропоезда, для которого эти двигатели предназначены.

Электротехническая концепция

В опытном двигателе постоянные магниты встроены в железный сердечник ротора. Одной из причин такого решения является устранение риска повреждения хрупких магнитов при техническом об-

Таблица 1
Основные технические характеристики тяговых двигателей

Параметр	Двигатель	
	Опытный	Обычный
Тип	Синхронный с постоянными магнитами	Асинхронный
Исполнение	Герметизированный	Самовентилируемый
Мощность, кВт	Продолжительная — 140, часовая — 200	Часовая — 200
КПД, %	97	92
Масса, кг	570	595

Таблица 2

Основные параметры условного поезда

Параметр	Значение
Составность	Два моторных и четыре прицепных вагона
Система электроснабжения	1,5 кВ постоянного тока
Ширина колеи, мм	1067
Диаметр колес, мм	860 — новых, 774 — изношенных
Передаточное отношение редукторов	99/14 = 7,07
Масса поезда, т	295 (при полной загрузке)
Максимальная скорость, км/ч	120
Максимальное ускорение, м/с ²	0,7

служивании двигателя за счет их защиты железом сердечника. Другой причиной является то, что благодаря наличию момента магнитного сопротивления новый двигатель может развивать достаточно высокий вращающий момент при относительно малом токе на выходе тягового инвертора и ограниченном напряжении холостого хода. Ограничение напряжения холостого хода от постоянного магнита для тяговых двигателей железнодорожного подвижного состава является непременным условием, поскольку его пиковое значение не должно превышать величину напряжения, выдерживаемого инвертором (в целях его защиты). Кроме того, желательно, чтобы пиковое значение напряжения холостого хода было меньше величины напряжения постоянного тока в контактной сети, так как в противном случае в режиме выбега будет создаваться нежелательное тормозное усилие, аналогичное имеющему место в режиме рекуперативного торможения. Данную проблему можно

решить путем контроля величины тока в целях подавления магнитного потока от постоянного магнита в режиме выбега. Все же, однако, предпочтительнее удерживать величину напряжения тока холостого хода на как можно низшем уровне с точки зрения снижения потерь при движении в режиме выбега.

На рис. 2 показано устройство (в разрезе) ротора опытного тя-

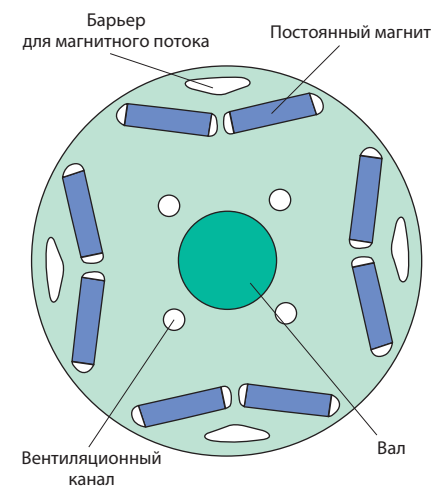


Рис. 2. Поперечное сечение ротора опытного тягового двигателя

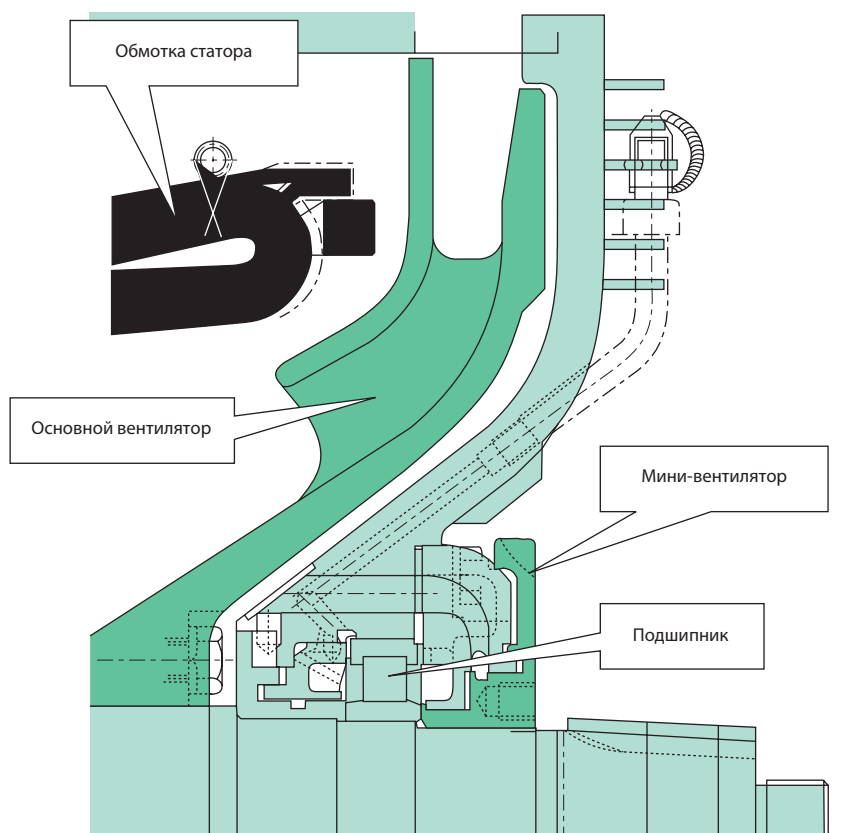


Рис. 3. Конструкция подшипникового узла со стороны тягового редуктора и вентилятора

вого двигателя. Магниты расположены в V-образных полостях ротора для увеличения выпуклости их характеристики, что необходимо для генерирования крутящего момента магнитного сопротивления. Предусмотрено также наличие барьеров для магнитного потока с той же целью увеличения выпуклости характеристики, а также для снижения центробежных сил, действующих на переемы ротора, за счет уменьшения масс, опирающихся на эти переемы.

Решение проблем нагрева

Внутренняя циркуляция охлаждающего воздуха. Поскольку ротор электродвигателя расположен внутри статора, единственным практически осуществимым способом его охлаждения является обеспечение интенсивного внутреннего воздухообмена. Необходимо также контролировать нагрев встроенных в ротор постоянных магнитов.

Предельное повышение их температуры относительно окружающей среды установлено равным 130 К во избежание размагничивания, но абсолютное значение температуры все равно должно быть ниже, чем температуры обмотки статора, и это требование довольно трудно удовлетворить.

Для решения этой проблемы разработана замкнутая схема циркуляции воздуха. Согласно этой схеме непосредственно на валу двигателя установлен вентилятор (аналогичный вентилятору самоохлаждаемых электродвигателей обычного типа), обеспечивающий принудительное прохождение находящегося внутри двигателя воздуха через теплообменник, закрепленный снаружи над двигателем и выполненный из оребренных трубок, которые способствуют увеличению эффективной поверхности теплоотдачи. Из теплообменника охлажденный воздух возвращается в двигатель и проходит по вы-

полненным в роторе каналам, охлаждая его.

Охлаждение подшипников. Еще одной из основных проблем применения полностью закрытых тяговых двигателей является повышенный нагрев подшипников. Предельно допустимое значение температуры подшипников с консистентной смазкой намного ниже, чем температуры обмотки статора. К тому же в таких электродвигателях температура нагрева различных компонентов распределяется практически равномерно, и поэтому весьма трудно удержать температуру подшипников в установленных пределах.

Исходя из этих соображений представляется важным обеспечить термическое отделение подшипников от воздуха внутри электродвигателя, который нагревается от имеющей высокую температуру обмотки статора. В этих целях предложены два конструктивных решения.

На той стороне двигателя, где расположены шестерня тягового редуктора и основной вентилятор, на валу снаружи установлено небольшое вспомогательное вентиляторное колесо, представляющее собой диск малого диаметра с канавками и обеспечивающее при вращении дополнительную подачу воздуха для охлаждения корпуса подшипника (рис. 3). При этом полость между корпусом подшипника и основным вентилятором выполняет функцию теплоизолятора. За счет этой полости и потока воздуха от мини-вентилятора температура нагрева как корпуса, так, следовательно, и самого подшипника поддерживается на относительно низком уровне, не выходящем за установленные пределы.

На стороне двигателя, противоположной тяговому редуктору и основному вентилятору, вокруг подшипника устроена кольцевая охлаждающая полость, а на внутреннюю поверхность остова нанесено покрытие из теплоизолирующего материала (рис. 4).

Внешнее охлаждение. Обычно полностью закрытые электродвигатели охлаждаются только за счет естественной конвекции воздуха с наружной поверхности. В случае тяговых двигателей при движении поезда имеет место встречный поток воздуха, тем более действенный с точки зрения охлаждения, чем выше скорость. Для рационального использования этого воздушного потока на поверхности предложено размещение большого числа ребер, обращенных в направлении движения. Особенно эффективно наличие таких ребер в нижней части электродвигателя, так как ранее выполненные замеры показали, что скорость воздушного потока наибольшая именно внизу.

Разрезные магниты. В идеале в роторе синхронного электродвигателя с постоянными магнитами потерь быть не должно. В действительности же, однако, в магнитах имеют место потери, обусловленные вихревыми токами, возникающими из-за флуктуаций магнитного потока, и эти потери возрастают при повышении температуры магнитов. Для уменьшения потерь магниты выполнены разрезными и изолированы перед помещением их в ротор. Был проведен электромагнитный анализ с целью определения оптимального числа разрезов в магнитах для уменьшения теплообразования, в соответствии с результатами которого каждый отдельный магнит разрезан вдоль оси на 14 частей.

Испытания

Температурные испытания

Методика испытаний. Для подтверждения эффективности предлагаемой конструкции электродвигателя были проведены его испытания на нагрев в соответствии со стандартом JIS/JEC. Испытания в продолжительном и часовом режимах мощности выпол-

нялись с питанием как от источника синусоидального тока, так и от инвертора. Во время испытаний подавался охлаждающий воздух для имитации воздушного потока, возникающего вокруг тягового электродвигателя при движении поезда, при этом скорость воздуха регулировалась в пределах, соответствующих реальным условиям эксплуатации. Заранее проводились замеры распределения скорости этого воздушного потока при движении поезда. Внутри двигателя скорость воздушного потока на высоте вала при расчетной частоте вращения (и, соответственно, скорости движения поезда) была равна около 2 м/с.

Измерения температуры выполнялись в следующих местах и с использованием следующих методов:

- обмотка статора: методом сопротивления постоянному току;
- постоянные магниты: с помощью термопар через токосъемное кольцо);
- подшипники: с помощью термопар на поверхности электродвигателя.

Результаты испытаний и их анализ. Результаты испытаний отражены на рис. 5. Нагрев каждого из конструктивных элементов электродвигателя не выходил за установленные пределы. Это позволило сделать вывод, что опытный тяговый двигатель способен развивать запланированную выходную мощность без рисков термического характера. Более того, рост температуры оказался столь небольшим, что есть возможность повышения мощности двигателя или, в качестве альтернативы, упрощения его

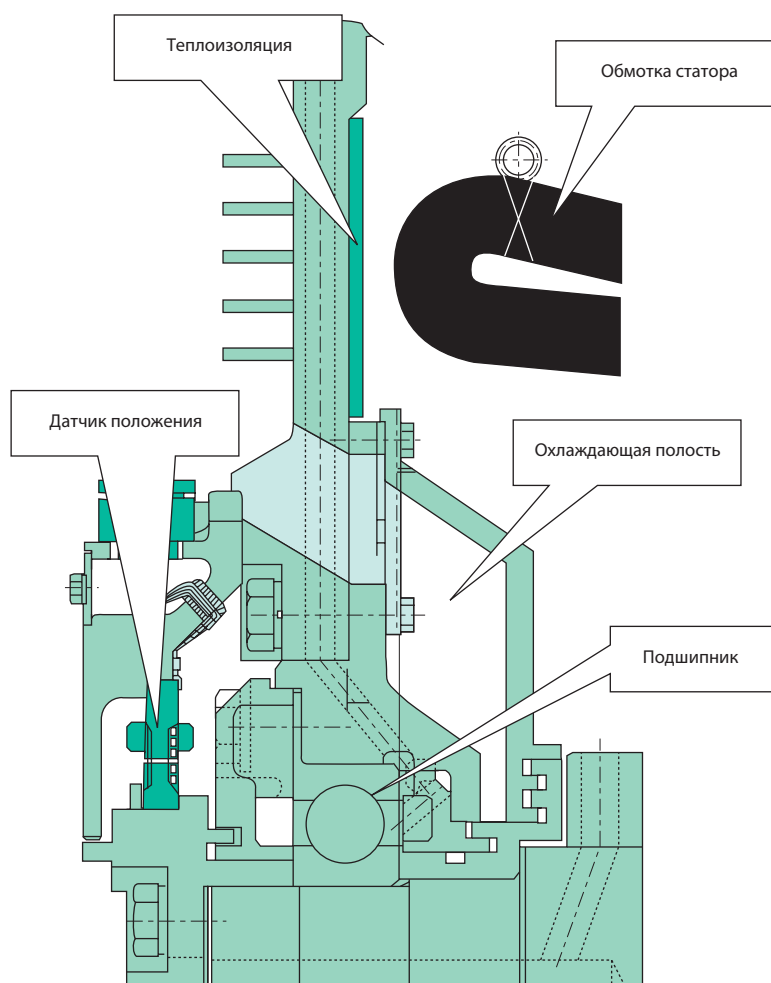


Рис. 4. Конструкция подшипникового узла со стороны, противоположной тяговому редуктору и вентилятору

конструкции за счет удаления или модификации некоторых дополнительно введенных элементов. Эффективность предлагаемых конструктивных изменений была проверена путем проведения температурных испытаний двигателя с установленными дополнительными элементами и без них.

Акустические испытания

Методика испытаний. Измерения уровня шума, излучаемого опытным тяговым двигателем, имели целью подтверждение расчетного эффекта снижения шума, достигаемого за счет его герметизации, и проводились в соответствии со стандартом IIS. При этом электродвигатель работал без нагрузки и частота его вращения поддерживалась постоянной в процессе каждого единичного измерения. При измерениях использовались шумомеры, установленные на расстоянии 1 м от наружной поверхности электродвигателя в четырех направлениях по горизонтали (параллельно и перпендикулярно валу двигателя)

и в одном направлении по вертикали (над двигателем). Измерения осуществлялись не только при номинальной частоте вращения вала двигателя (2550 об/мин), но и при высокой (порядка 5000 об/мин). Параллельно были проведены испытания обычного самовентилируемого тягового двигателя.

Результаты испытаний и их анализ. На рис. 6 приведены в сопоставлении результаты акустических испытаний опытного электродвигателя и обычного тяговых двигателей. Видно, что уровень шума нового двигателя в каждом из направлений измерений при частоте вращения 5000 об/мин оказался не менее чем на 10 дБ ниже, чем электродвигателя обычного типа. Это подтверждает меньшую шумность нового герметизированного двигателя.

Благоприятные результаты акустических испытаний объясняются следующими факторами. Самоохлаждаемый электродвигатель обычного типа имеет вентилятор, который генерирует высокий уровень шума при работе с большой частотой

вращения. Опытный электродвигатель также оснащен вентилятором для циркуляции воздушного потока, который производит такой же шум, как и вентилятор обычного электродвигателя, но этот шум экранируется корпусом двигателя, не имеющим отверстий. Кроме того, ротор электродвигателя с постоянными магнитами имеет гладкую поверхность, в то время как на поверхности роторов обычного двигателя, в том числе асинхронного, расположены медные стержни или катушки обмотки, которые создают дополнительный аэродинамический шум.

Расчет потребления энергии

Методика расчета. Расчет потребления энергии имел целью подтверждение возможности экономии энергии на тягу поездов при использовании в качестве тяговых синхронных электродвигателей с постоянными магнитами. В табл. 3 приведены исходные условия расчета, выполненного для электропоездов двух типов — местного сообщения и скоростного, так как потери в тяговом двигателе зависят от скорости движения поезда, в свою очередь зависящей от характера его эксплуатации. Расчет для нового и обычного электродвигателей выполнялся на основе их характеристик по энергопотерям, определенных по результатам стендовых испытаний и моделирования. В ходе расчета определялись только потери в тяговых электродвигателях и передачах, а потери в других элементах, например в тяговом преобразователе, не учитывались. Поэтому рассматривавшиеся в расчете элементы энергозатрат включали сопротивление движению, торможение, потери на трение в тяговом двигателе и в приводе.

Постоянным фактором, влияющим на потребление энергии, является рекуперативное торможение. Было сделано допущение, что тяговые двигатели работают при

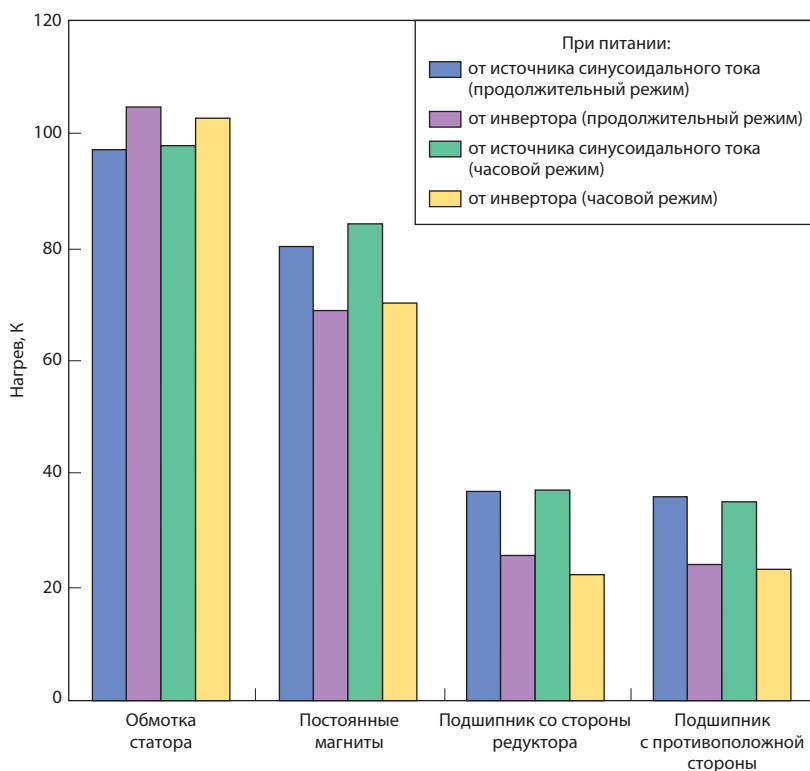


Рис. 5. Результаты температурных испытаний опытного двигателя

таким векторе тока, который минимизирует общие энергопотери в электродвигателе тогда, когда напряжение ниже максимальной величины.

Результаты расчета и их анализ. Расчетные показатели энергопотерь в электродвигателях обычного типа и прототипе нового двигателя приведены на рис. 7.

Видно, что потери в меди и железе статора оказались практически одинаковыми, но механические потери в обычном двигателе превышали таковые в опытном, так как охлаждение первого требует большей мощности, чем охлаждение за счет циркуляции воздуха в герметизированном двигателе. Потери в меди ротора имеют место только в обычном электродвигателе. Поэтому энергопотери опытного двигателя в режиме тяги меньше, чем обычного. Кроме того, энергопотери опытного двигателя в режиме выбега также меньше, чем обычного. Хотя потери в железе статора при этом имеют место только в опытном двигателе, механические потери в нем слишком малы по сравнению с суммой таких потерь в обычном двигателе. Следовательно, можно сделать вывод, что опытный тяговый двигатель с большой степенью вероятности является более энергосберегающим, чем обычный, вне зависимости от характера эксплуатации в электропоездах разного типа.

Расчетные показатели суммарных энергопотерь тяговых двигателей двух типов приведены на рис. 8.

И в этом случае, как видно из этих рисунков, самое большое различие в расчетных показателях для рассматриваемых двигателей заключается в том, что отсутствуют потери в меди ротора опытного синхронного двигателя благодаря применению в нем постоянных магнитов. Другим отличием является то, что механические потери обычного двигателя больше, чем опытного. Это различие в механических потерях более ощути-

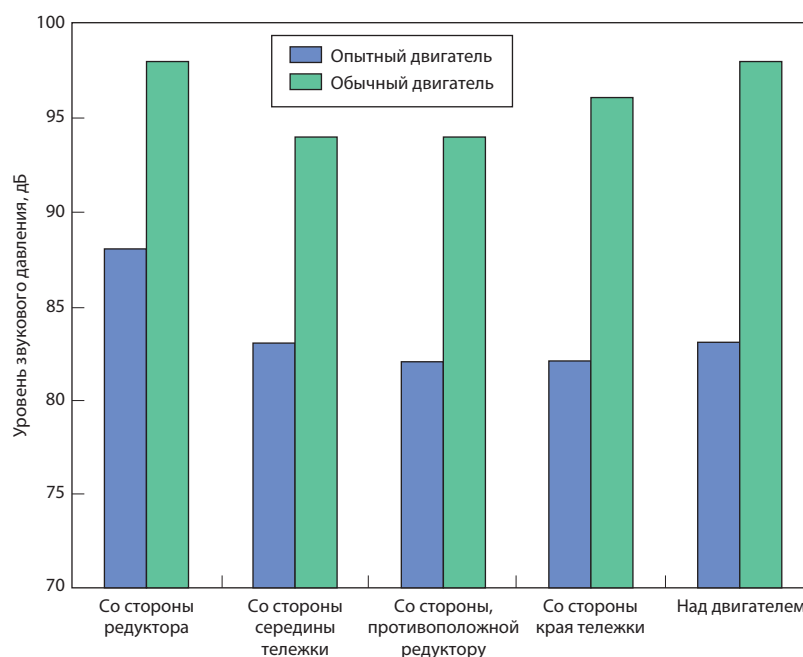


Рис. 6. Результаты акустических испытаний опытного и обычного двигателей

Таблица 3

Условия расчета потребления энергии

Параметр	Тип поезда	
	Местный	Скоростной
Составность	Три моторных и четыре прицепных вагонов	Три моторных и пять прицепных вагонов
Населенность, %	100	
Масса поезда, т	270	327
Передаточное отношение тягового редуктора	7,07	6,53
Диаметр колес, мм	820	
Ускорение, м/с ²	0,7	
Замедление, м/с ²	0,83	
Максимальная скорость, км/ч	110	130
Длина маршрута, км	100	200
Число промежуточных остановок	45	21
Продолжительность рейса, ч, мин	1 ч 54 мин	2 ч 10 мин

мо для тяговых двигателей скоростных поездов, так как такие потери возрастают примерно пропорционально кубу частоты вращения. В синхронных тяговых двигателях с постоянными магнитами потери в железе статора имеют место в режимах не только тяги, но и выбега за счет магнитного потока, создаваемого постоянными магнитами. Поэтому суммарные потери в желе-

зе статора опытного двигателя несколько больше, чем обычного, хотя различие, судя по результатам расчета, весьма незначительно.

Таким образом, суммарные энергопотери опытного тягового двигателя составляют примерно половину энергопотерь обычного двигателя. Это обеспечивает снижение общего потребления энергии синхронным электродви-

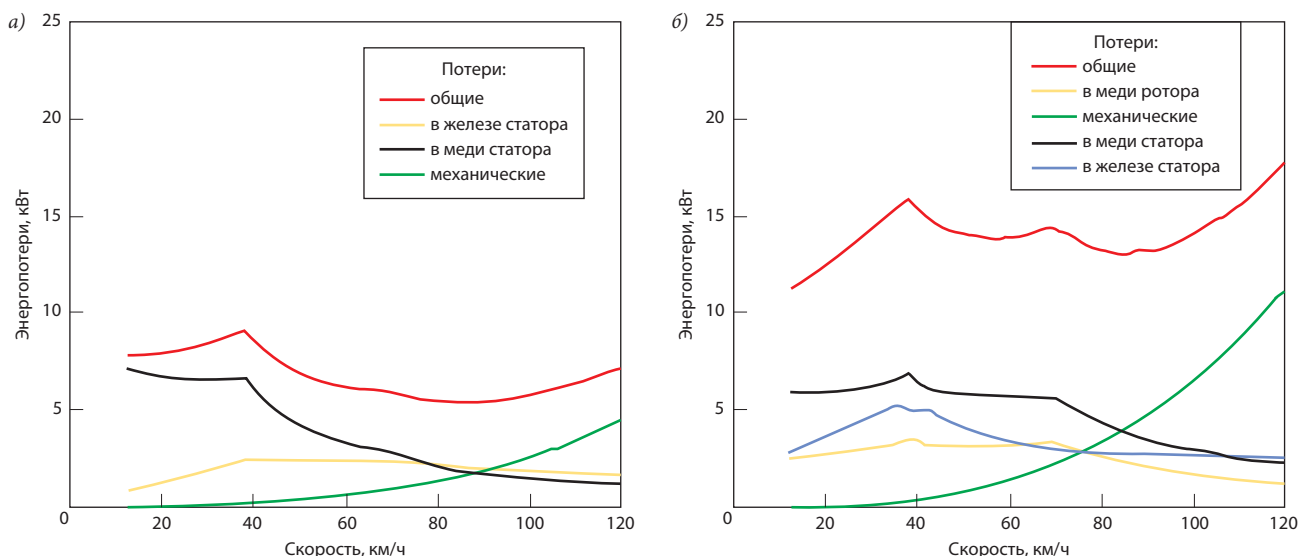


Рис. 7. Характеристики энергопотерь тяговых двигателей:
а — обычного; б — опытного

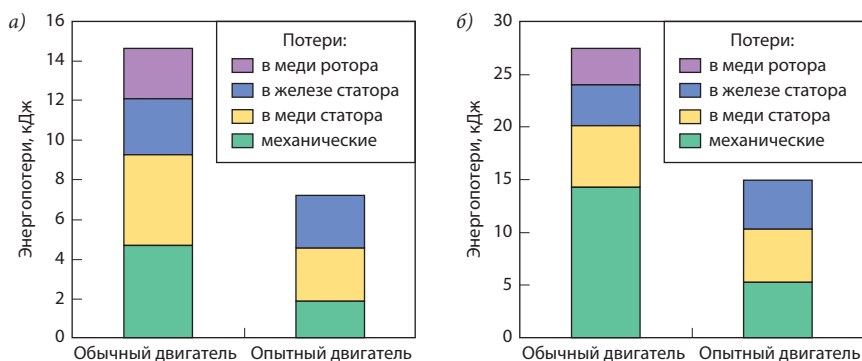


Рис. 8. Результаты расчета энергопотерь тяговых двигателей:
а — местного поезда; б — скоростного поезда

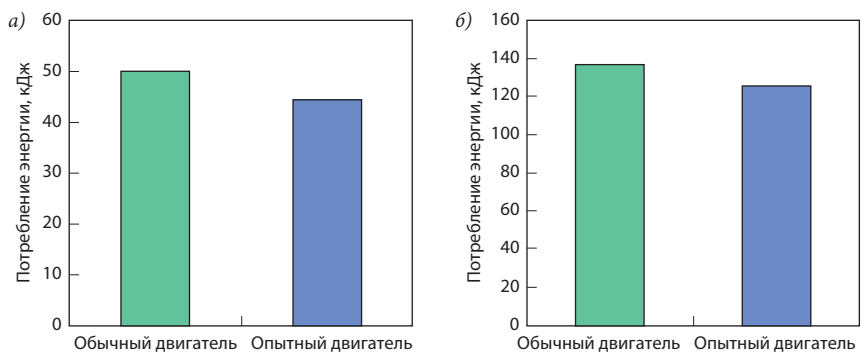


Рис. 9. Расчетное потребление энергии тяговыми двигателями:
а — местного поезда; б — скоростного поезда

гателем с постоянными магнитами приблизительно на 10 %, что отражено на рис. 9.

Вместе с тем в условиях реальной эксплуатации рекуперативное торможение не всегда можно применять из-за отсутствия нагрузки (других поездов, потребляющих

энергию), а энергопотери других видов в расчете не рассмотрены. Поэтому в таких условиях фактическое относительное снижение энергопотерь синхронного тягового двигателя с постоянными магнитами будет, по-видимому, меньше расчетного.

Заключение

Результаты многоаспектных сопоставительных испытаний опытного тягового двигателя показали, что температура его нагрева не выходит за определенные пределы, а уровень шума на 10 дБ ниже, чем у обычных тяговых двигателей.

Расчет энергозатрат для опытного и обычных тяговых двигателей, выполненный на основе результатов стендовых испытаний и моделирования (при допущении, что двигатели обоих типов предназначены для эксплуатируемых в типичных условиях электропоездов пригородного сообщения), показал, что новый двигатель потребляет приблизительно на 10 % меньше электроэнергии, чем обычные.

Таким образом, задачу создания тягового двигателя нового типа на базе герметизированного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами, обладающего сравнимыми с обычными тяговыми двигателями массогабаритными и мощностными параметрами, но превосходящего их с точки зрения нагрева, акустических характеристик и энергопотребления, можно считать решенной.

M. Kondo et al. Quarterly Report of RTRI, 2005, № 2, p. 90 – 96.