

# Тяговый генератор с возбуждением от постоянных магнитов

В настоящее время на тепловозах с электрической передачей используются в основном неявнополюсные синхронные генераторы с обычной электрической системой возбуждения или же асинхронные генераторы. Массу синхронного генератора можно снизить при одновременном значительном повышении КПД, если для возбуждения использовать постоянные магниты. Применение этой техники дает еще ряд важных преимуществ, в том числе обеспечивает экономию дизельного топлива.

На современном тепловозе с электрической передачей механическая энергия, вырабатываемая дизелем, преобразуется с помощью генератора в электрическую. Полученное напряжение переменного тока поступает на выпрямитель. Выпрямленное напряжение подается на промежуточное звено, от которого получают питание тяговый инвертор и преобразователь собственных нужд. Генераторы могут быть как синхронными, так и асинхронными. Все они имеют определенные достоинства и недостатки.

В последнее время значительный прогресс достигнут в области синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов. Эта техника привлекла внимание также и разработчиков тяговых генераторов. При выборе типа машины решающую роль играют как экономические, так и конструкционные факторы. Следует учитывать КПД, массу, стоимость, удобство технического обслуживания, эксплуатационную надежность и много других аспектов. Такой параметр, как КПД, следует определять не только для одного конкретного случая применения электрической машины, но и для многих других областей, причем желательно за весь срок эксплуатации. В результа-

те полученные данные образуют базу для оценки при выборе наилучшего варианта машины применительно к конкретному случаю использования.

## Особенности конструкции генератора с постоянными магнитами

Машина, разработанная компанией Traktionssysteme Austria (TSA), представляет собой возбуждаемый постоянными магнитами синхронный генератор с жидкостным охлаждением и алюминиевым корпусом. Постоянные магниты размещены в роторе, внутри пакета железа (скрытое размещение магнитов). Коробка с выводами расположена сверху на корпусе. Крепится генератор с помощью двух приваренных по бокам кронштейнов. На глухом торце расположены штуцеры G 3/4 для подвода и отвода охлаждающей жидкости.

### Система жидкостного охлаждения

Электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов должна иметь герметичное исполнение. Это необходимо для того, чтобы в процессе эксплуатации в

корпус машины не проникали пыль и ферромагнитные продукты износа, в частности возникающие при работе фрикционных тормозов. Они притягиваются постоянными магнитами и ухудшают характеристики машины. Особо следует защищать от попадания ферромагнитных частиц ее магнитный зазор. В связи с этим было решено применить в конструкции генератора жидкостное охлаждение, что позволило полностью изолировать внутреннее пространство машины от попадания загрязненного воздуха.

Электрическая машина с жидкостным охлаждением имеет также следующие преимущества перед машинами с воздушным охлаждением:

- низкий уровень шума;
- отсутствие потребности в вентиляторе;
- возможность охлаждения во время стоянки;
- небольшой размер сечения охлаждающих каналов.

Недостатком обычных электрических машин с жидкостным охлаждением, используемых в системе тяги, является не только потребность в специальной холодильной системе, но и, прежде всего, сложность охлаждения ротора. Если отказаться от крайне редко применяемых сложных и дорогостоящих систем жидкостного охлаждения ротора, то в герметичной машине приходится довольствоваться его косвенным охлаждением через воздушный зазор от охлаждаемого статора. В случае машин с возбуждением от постоянных магнитов потери в роторе настолько малы, что такое косвенное охлаждение оказывается вполне достаточным.

### Корпус и постоянные магниты

Для максимального снижения массы генератора его корпус изготовили из алюминиевого сплава. Масса корпуса составила 70 кг. При изготовлении опытного образца генератора алюминиевый

Таблица 1

Технические данные РМ-генератора

Параметр	Обозначение	Значение параметра
Механическая входная мощность, кВт	$P_{\text{mech}}$	390
Напряжение промежуточного звена, В	$U_{DC}$	860
Максимальное напряжение промежуточного звена, В	$U_{DC\text{max}}$	1100
Номинальная частота вращения, об/мин	$n_{\text{ном}}$	1900
Механический крутящий момент, Н·м	$M_{\text{mech}}$	1960
Диапазон изменения частоты вращения, об/мин	$n$	600–1900
Температура охлаждающей жидкости на входе, °С	$\vartheta_{\text{in}}$	65
Средний расход охлаждающей жидкости, л/мин	$V/t$	30
Перепад давления, Па	$\Delta_p$	10 000
Число пар полюсов	$2p$	8
КПД, %	$\eta$	>97
Масса (без муфты), кг	$m$	650
Момент инерции ротора (без муфты), кг·м <sup>2</sup>	$J$	3
Длина, мм	$l$	720
Диаметр, мм	$d$	530
Степень защиты согласно стандарту EN 60529	—	IP 56

корпус выполнили сварным, для серийного же исполнения предусмотрена литая алюминиевая конструкция. Аналогичный по размерам корпус из стали был бы тяжелее в 2 раза. Для того чтобы жесткость и прочность алюминиевого корпуса были не ниже, чем стального, предусмотрены специальные ребра жесткости и стенки увеличенной толщины.

Для монтажа постоянных магнитов в синхронной машине существует два разных способа. Первый — это способ наружного размещения магнитов, которые крепятся на поверхности ротора. Второй — способ «скрытого» размещения, когда магниты вдвигают в специальные пазы, подготовленные в пакете железа ротора и расположенные параллельно оси на определенном расстоянии от центра.

В электрических машинах с наружным размещением магнитов по-

следние крепятся к поверхности ротора с помощью клея. Однако клей применяется лишь как вспомогательное монтажное средство. Для восприятия центробежных сил магниты дополнительно крепятся бандажами из углеродного волокна. Эксперименты с такими машинами показали, что при возникновении слишком больших центробежных сил бандажи из углеродного волокна на ребрах магнитов могут повреждаться. Это приводит к разрушению бандажей и, как следствие, к выходу из строя машины.

Чтобы избежать этих проблем, от наружного расположения магнитов отказались в пользу скрытого их размещения. Вдвигаемые в пазы магниты дополнительно фиксируют с помощью заливаемой синтетической смолы.

Для изготовления постоянных магнитов используется сплав неодим — железо — бор (NdFeB). Леги-

рование сплава редкими металлами значительно улучшает его антикоррозионные свойства. Однако при использовании ручной сварки происходит выгорание легирующих элементов. Кроме того, в сварочный шов из обмазки сварочного электрода попадают содержащие кислоты вещества. Все это приводит к коррозии магнитов. Чтобы максимально снизить возможность коррозии, все монтажные операции выполняют в перчатках. При этом стремятся избегать резких ударных нагрузок, чтобы не повредить магниты, имеющие пористую структуру.

### Механические нагрузки

Генераторы, предназначенные для систем тяги железнодорожного подвижного состава, в настоящее время размещают в составе компактных дизель-электрических тяговых агрегатов, конструкция которых получила название Powerpack. Эти агрегаты в полностью подресурсированном исполнении могут размещаться как внутри кузова, так и под ним, а также на крыше. Для последнего варианта размещения особенно важным параметром является низкая масса генератора. Стыковка с дизелем неподвижных частей осуществляется с помощью стандартного фланца SAE, а вращающихся — через высокоэластичную дисковую муфту.

В соответствии со спецификацией генератор, используемый в тяговых агрегатах, должен выдерживать следующие нагрузки продолжительного режима:  $a_x = \pm 3 \text{ м/с}^2$ ;  $a_y = \pm 1,5 \text{ м/с}^2$ ;  $a_z = -10 \pm 2 \text{ м/с}^2$ .

При расчетах генераторов следует также учитывать моменты и вибрации, вызываемые работой дизеля. Путем выбора соответствующих характеристик муфты, соединяющей генератор с дизелем, можно нейтрализовать вредные воздействия на генератор вибраций, вызываемых, например, пропуском вспыш-

ки в цилиндре или возникновением колебательных процессов в тяговом тракте. В табл. 1 приведены технические данные генератора с возбуждением от постоянных магнитов (РМ-генератор).

### Определение электромагнитных параметров

Определение электромагнитных параметров РМ-генератора выполняли с помощью аналитической программы. После этого был применен расчет по методу конечных элементов, на основании которого можно было приступить к исследованию реактивного сопротивления (реактанца) ротора в его различных положениях и определению размеров и расположения постоянных магнитов.

#### Постоянные магниты

Для того чтобы добиться высокой остаточной магнитной индукции в роторе, потребовалось применить постоянные магниты из ферромагнитных сплавов на базе редкоземельных элементов. Как уже отмечалось, был использован сплав NdFB, обеспечивший высокую остаточную магнитную индукцию  $B_r$  (при температуре 120 °С около 1,05 Тл) и большую коэрцитивную силу  $H_c$  (до 1250 кА/м). Высокие качественные характеристики постоянных магнитов достигнуты не только легированием редкоземельными элементами, но также благодаря применению уникальных технологий изготовления (изостатическое, а также поперечное или осевое прессование).

При использовании постоянных магнитов следует обращать особое внимание на зависимость характера кривых размагничивания от температуры. С ее повышением возникают как обратимые, так и необратимые эффекты. После необратимого размагничива-

ния рабочие характеристики постоянного магнита могут быть восстановлены только путем повторного намагничивания. Для магнита, размещенного в железе статора, эту операцию можно провести лишь с большими затратами. Эффект размагничивания под действием температуры особо характерен для магнитов из сплава NdFB. Из-за склонности к необратимому размагничиванию постоянные магниты ротора не должны нагреваться в эксплуатации выше 200 °С.

#### Особенности магнитного поля в электрической РМ-машине

Исследования показали, что магнитная проводимость по осям  $d$  и  $q$  ротора с постоянными магнитами различна (рис. 1). Отсюда вытекает и неравенство реактивного сопротивления по этим осям. Постоянные магниты имеют низкую магнитную проницаемость  $\mu$ . Она близка к единице, как у воздуха. В то же время в пакете железа в зависимости от насыщения величина ее может достигать значения  $\mu = 1000$ . Таким образом, по оси  $d$ , на которой располагается постоянный магнит, магнитная проницаемость будет невелика. В этом направлении магнитное сопротивление высокое и, соответственно, индуктивность низкая. Отсюда следует, что реактанс  $X_d$  в этом направлении будет небольшим.

Ось  $q$ , проходящая через зазор между постоянными магнитами, пронизывает на своем пути только железо ротора, следовательно,

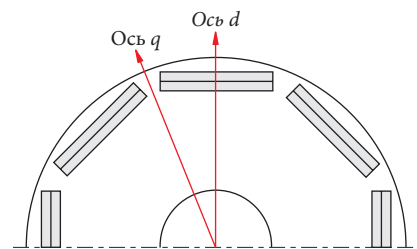


Рис. 1. Скрытое расположение постоянных магнитов в пакете железа ротора

магнитная проницаемость в этом направлении велика, а значит, индуктивность и реактанс  $X_q$  также велики. Таким образом  $X_d < X_q$ . Благодаря разнице между этими величинами РМ-машина развивает реактивный момент.

#### Потери

В любой электрической машине потери складываются из следующих наиболее важных компонентов — потерь в железе и меди, а также из ряда дополнительных потерь, процент которых не так велик. В машине с постоянными магнитами потери в роторе ограничиваются только потерями в железе, так как обмотки здесь нет.

В постоянных магнитах под действием внешних переменных магнитных полей наводятся вихревые токи, которые обуславливают дополнительные потери и зависят от частоты и проводимости магнитного материала. Вихревые токи наводятся везде, где действуют переменные магнитные поля и имеются проводящие элементы достаточной толщины. В электрических машинах этого удастся избежать благодаря тому, что пакет железа состоит из тонких листов. В то же время постоянные магниты являются достаточно массивными.

Паза статора способствуют возникновению в воздушном зазоре машины периодических колебаний с частотой

$$f \sim nN,$$

где  $n$  — частота вращения ротора;  $N$  — число пазов статора.

Как уже отмечалось, в конструкции машин с постоянными магнитами от наружного размещения магнитов отказались в пользу скрытого. Это предпочтительнее и с электромагнитной точки зрения, так как при скрытом расположении магнитов в пакете железа паза статора не оказывают на них непосредственного воздействия. Благодаря этому

вихревые токи в магнитах имеют небольшую величину. Критичными остаются углы магнитов, которые оказываются наиболее близко расположенными к воздушному зазору машины, поэтому для дальнейшего снижения вихревых токов используют более короткие магниты.

### Исполнение механической части

Для наиболее точной оценки нагрузок, которые будут воздействовать на корпус в процессе эксплуатации, проведены расчеты по методу конечных элементов всего корпуса и его сварных швов. При этом рассматривались нагрузки различных видов и разной величины. Последняя определялась по величине ускорений, возникающих под действием этих нагрузок. Предельные значения ускорений оговариваются техническим заданием.

Для ротора проводят отдельный расчет по методу конечных элементов, с тем чтобы определить нагрузки, обусловленные действием центробежных сил на его компоненты. При этом определяли напряжения в теле ротора, в том числе в зоне, близкой к его наружной поверхности. Особое внимание уделяли угловым зонам магнитов, наиболее близко расположенным к воздушному зазору.

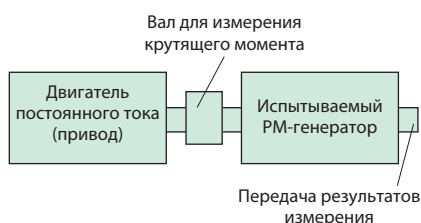


Рис. 2. Схема установки, разработанной компанией TSA для определения параметров генератора

Процессы изготовления электрических традиционных и РМ-машин существенно различаются. При размещении постоянных магнитов в пакете железа ротора возникают значительные усилия. Во

Таблица 2

Уровень гармоник в кривой напряжения холостого хода

Номер гармоники	Фазное напряжение, В
1	446,8
3	0,4
5	0,9
7	1,6
9	0,1
11	0,5
13	5
15	0,1
17	0,1
19	0

время приближения магнита к подготовленному пазу действуют отталкивающие силы, а в момент совмещения его с пазом начинают действовать большие силы магнитного притяжения. Если же учесть необходимость применения клея или смолы, которыми покрывают вдвигаемый магнит, то операция еще больше усложняется.

В процессе сборки ротора, когда нужно напрессовать на вал собранные секции пакета железа со вставленными в них постоянными магнитами, также действуют большие отталкивающие силы, поскольку при этой операции производится сближение одноименных полюсов магнитов. В связи с этим данную операцию выполняют в специальном приспособлении.

Для установки ротора в статор также требуется специальное приспособление из-за действия магнитных сил. Здесь происходит отталкивание ротора от внутренней поверхности статора, которое после окончания сборки действует в воздушном зазоре. Во время всего процесса сборки необходимо тщательно следить за тем, чтобы к компонентам, содержащим постоянные магниты, не притягивались мелкие металлические предметы и металлическая пыль. Такие же требования предъявляются и к складскому хранению компонентов и генераторов в сборе.

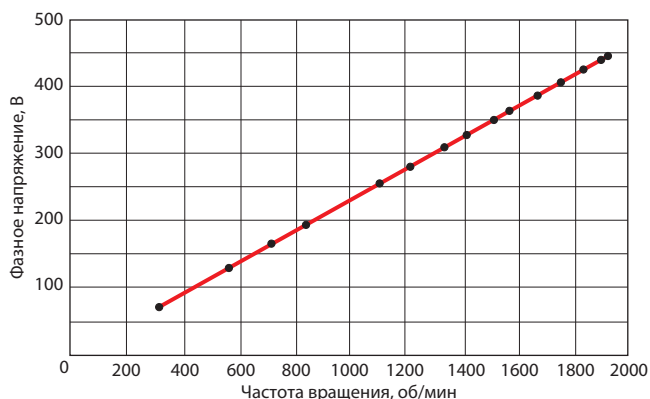


Рис. 3. Кривая зависимости фазного напряжения генератора  $U_{\phi n}$  от частоты вращения ротора  $n$

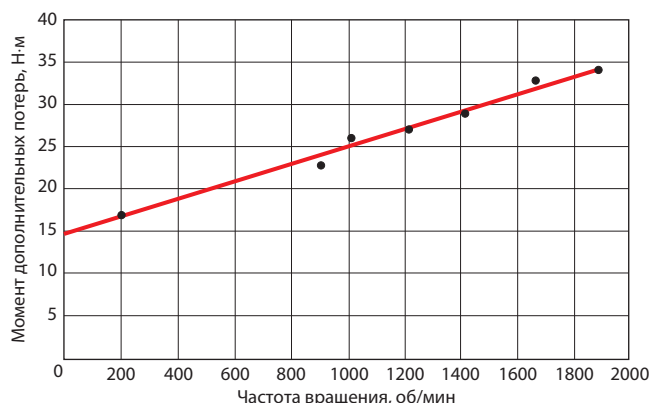


Рис. 4. Зависимость момента дополнительных потерь  $M_s$  от частоты вращения ротора  $n$

Испытания

Таблица 3

Результаты исследования температурного режима РМ-генератора

Параметр	Обозначение	Значение параметра
Напряжение, В	$U$	612
Ток, А	$I$	354
Частота, Гц	$f$	126,46
Частота вращения, об/мин	$n$	1 897
Крутящий момент, Н·м	$M$	1 952
Подводимая механическая мощность, Вт	$P_{mech}$	387 670
Потери в меди статора, Вт	$P_{Cu}$	4860
Дополнительные потери, Вт	$P_S$	6750
Прочие потери, Вт	$P_R$	1240
Суммарные потери, Вт	$P_V$	12 850
Отдаваемая электрическая активная мощность, Вт	$P_{ab}$	374 820
Средняя температура, °С:		
обмотки статора	$\vartheta_{Wck}$	151
постоянных магнитов	$\vartheta_{PM}$	164
лобовых частей обмотки статора	$\vartheta_{WK}$	162
Температура подшипников, °С:		
со стороны дизеля	$\vartheta_{AS}$	85
с глухой стороны	$\vartheta_{NS}$	80
Средняя температура охлаждающей жидкости, °С	$\vartheta_{KM}$	65

Все измерения параметров генератора выполнялись на установке компании TSA. Схема этой установки показана на рис. 2. Кривая зависимости фазного напряжения от частоты вращения снималась в режиме холостого хода. Характер этой кривой, показанной на рис. 3, является типичным для машин, возбуждаемых от постоянных магнитов. Анализ Фурье полученной кривой показал, что содержание высших гармоник во всем диапазоне частот вращения (от 0 до 1921 об/мин) минимально (табл. 2).

Для точного определения общей величины потерь в генераторе потребовалось применить метод прямого измерения КПД. Он предусматривает определение крутящего момента с помощью специального измерительного вала и использование результата этого измерения для расчета величины подводимой мощности. Потери мощности определяют путем расчета величины тепловой составляющей (потери в меди статора) и дополнительных потерь. К последним относятся потери на трение вращения ротора, а также потери в железе ротора и статора, обусловленные только воздействием поля постоянных магнитов. На рис. 4 представлена кривая зависимости момента дополнительных потерь от частоты вращения ротора.

Тепловые потери за период выхода на максимально допустимую температуру (увеличение на 2 К в течение 1 ч в соответствии с европейским стандартом EN 60349) сопоставляли с подводимой механической мощностью, равной 390 кВт. Для того чтобы получить как можно более точную картину распределения тепловых потерь, использовали 28 температурных датчиков типа Pt-100. Максимальная температура постоянных магнитов составила 166 °С, из чего следовало, что для их нагрева обеспечивался значительный

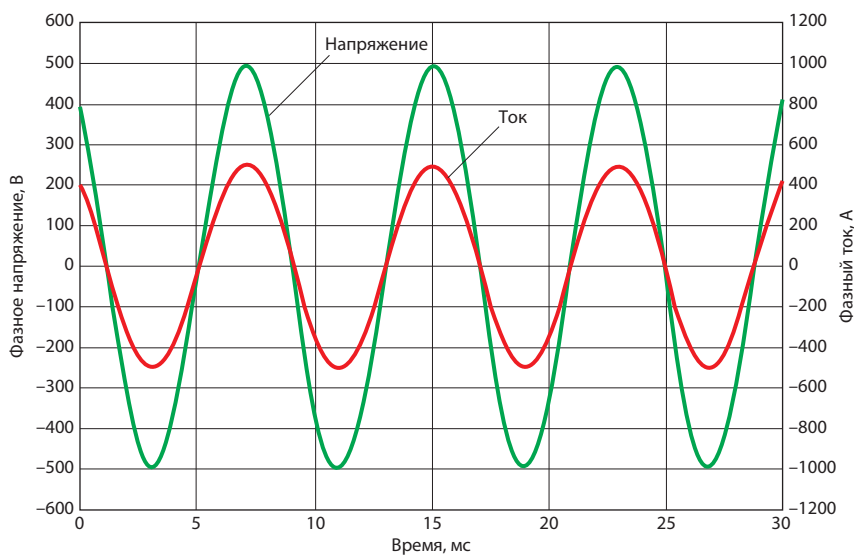


Рис. 5. Кривые фазного напряжения и фазного тока при чисто активной нагрузке

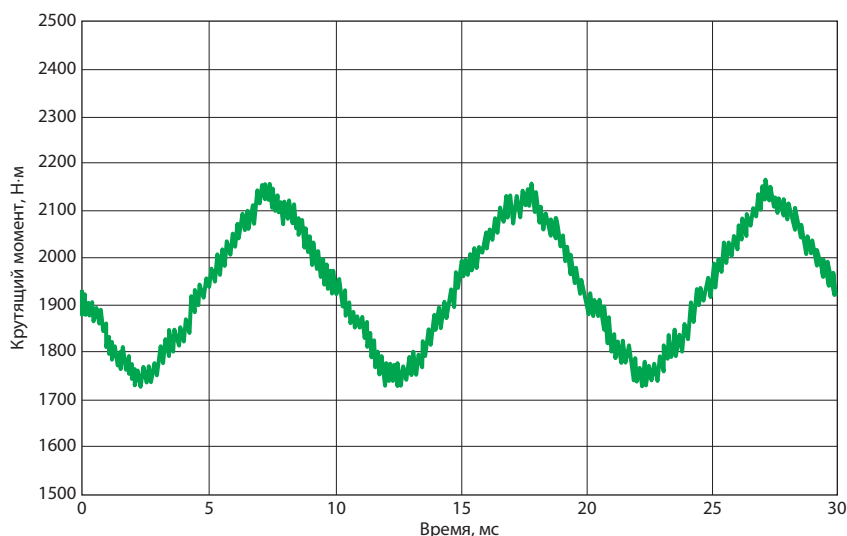


Рис. 6. Колебания величины крутящего момента относительно среднего значения 1952 Н·м

резерв. Как уже упоминалось, максимальная допустимая температура магнитов равна 200 °С. Результаты исследования температурного режима приведены в табл. 3.

Как положительное влияние малых потерь в роторе можно рассматривать относительно низкую температуру подшипников (от 80 до 90 °С). Это позволяет проводить набивку смазкой обоих подшипни-

ков генератора с увеличенным временным интервалом.

На рис. 5 показаны кривые фазного напряжения и тока при чисто активной нагрузке. За счет соответствующего конфигурирования роторного пакета железа удалось в значительной степени добиться сглаживания колебаний крутящего момента. На рис. 6 приведена кривая колебаний во времени величин

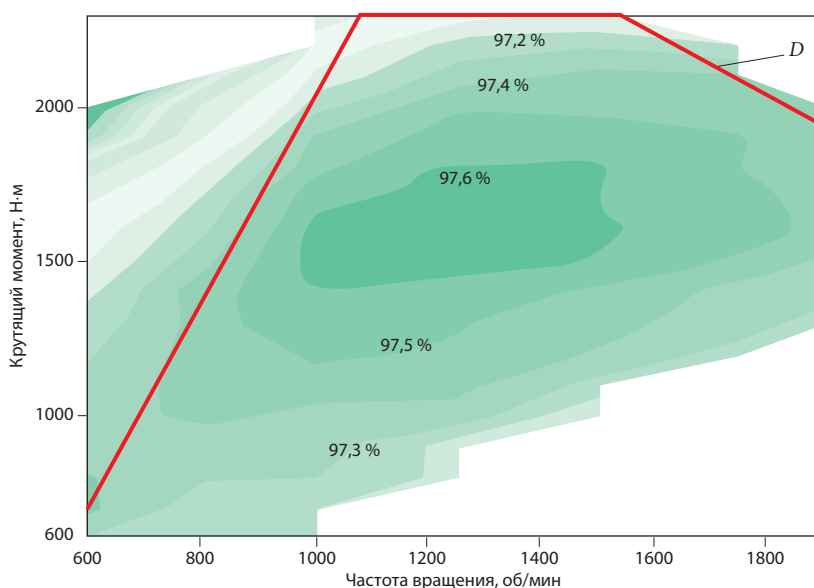


Рис. 7. Кривые КПД генератора, возбуждаемого от постоянных магнитов, и рабочая характеристика D дизеля

ны момента, среднее значение которой равно 1952 Н·м.

Одним из наиболее существенных преимуществ РМ-генератора перед традиционным является то, что он обеспечивает высокий КПД (от 96 до 98%) во всех эксплуатационных режимах, характеризуемых зависимостью крутящего момента  $M$  от частоты вращения  $n$ . На рис. 7 показаны значения КПД генератора с возбуждением от постоянных магнитов, измеренные при средней температуре обмоток около 120 °С, а также приведена кривая зависимости  $M(n)$  дизеля. Из рисунка видно, что даже за пределами этой характеристики дизеля лежат значения КПД, равные 96–97%.

### Сравнение генераторов и моделирование дизель-электрического тягового агрегата

Прямое сравнение обычных стандартных синхронных и асинхронных генераторов, находящихся в эксплуатации, с генератором той же мощности, возбуждаемым постоянными магнитами, показывает неоспоримые преимущества последнего, прежде всего в отношении массы и объема. Его масса на 50% ниже, чем синхронного генератора с обычной схемой возбуждения, и на 36% ниже, чем асинхронного. Кроме того, благодаря герметичному исполнению и жидкостному охлаждению уровень шума РМ-генератора лежит в пределах от 80 до 87 дБ(А), что значительно ниже, чем у традиционных генераторов с воздушным охлаждением.

Для того чтобы оценить потенциал экономии за счет использования РМ-генераторов, специалисты компании TSA выполнили моделирование всего дизель-электрического тягового тракта.

За основу моделирования взяты моторный вагон дизель-поезда компании Stadler, имеющий два независимых тяговых агрегата, каж-

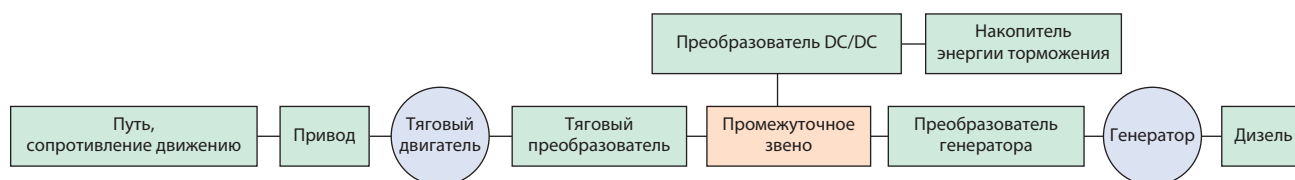


Рис. 8. Блок-схема, использовавшаяся при моделировании дизель-электрического тягового тракта

дый из которых состоит из дизеля, генератора, двух параллельно включенных модулей инвертора, одного тягового двигателя и одной моторной колесной пары. Соответствующий поезд компании Stadler серии GTW2 2/8 в 8-осной версии имеет массу 87 т и располагает 185 местами для сидения. Каждый из компонентов тягового тракта, представленных на рис. 8, моделировали на базе известных их КПД. Для генераторов рассматривали три различных варианта исходных данных, приведенных в табл. 4.

Для получения максимальных результатов в модель были заложены характеристики реального участка второстепенной линии Винер-Нойштадт – Аспанг – Фридберг, а поездная нагрузка моделировалась на базе технических данных региональных поездов и экспрессов, обращающихся на этой линии. Помимо этого, в модели использовали другие современные разработки, в частности накопитель рекуперированной энергии на двухслойных конденсаторах Ultracaps. В табл. 5 приведены некоторые результаты моделирования.

Из табл. 5 видно, что наибольшая экономия дизельного топлива, т. е. 4–5%, достигается, если сравнивать его расход дизель-электрическими тепловозами с РМ-генератором и с обычным синхронным генератором. Для региональных поездов на участке Винер-Нойштадт – Аспанг при реальных условиях эксплуатации (9 пар поездов в сутки и 250 дней эксплуатации в году) абсолютная экономия дизельного топлива составит 5000–10 000 л в год. Это соответствует годовому снижению выбро-

Таблица 4

**Технические данные сравниваемых генераторов одного класса мощности**

Параметр	Традиционные генераторы		РМ-генератор
	Синхронный	Асинхронный	
Мощность, кВт	408	370	390
Напряжение, В	816 (постоянный ток)	429 (переменный ток)	860 (постоянный ток)
Масса, кг	1320	1020	650
Число пар полюсов	6	4	8
Высота, мм	660	630	530
Ширина, мм	720	620	530
Длина, мм	1200	880	720
Система охлаждения	Самовентиляция		Жидкостная
Прочее	Вращающиеся диоды	Короткозамкнутый ротор	Магниты скрытой установки

Таблица 5

**Сравнение экономии дизельного топлива при использовании РМ-генератора по сравнению с традиционными**

Участок	Тип поезда	Уровень энергии в накопителе <sup>1</sup> , кВт·ч	Экономия топлива по сравнению с традиционными генераторами, %		Экономия с накопителем, %
			Синхронный	Асинхронный	
Винер-Нойштадт – Аспанг	R <sup>2</sup>	0	4,6	2,5	–
		6	5		29,9
	REX <sup>3</sup>	0	4,4	2,4	–
		6	4,6		16,2
Аспанг – Фридберг		0	4,8		–
		6	4,6		17,3

<sup>1</sup>При напряжении от  $U_{max}$  до  $0,5U_{max}$ .

<sup>2</sup>Региональный поезд.

<sup>3</sup>Региональный экспресс.

сов CO<sub>2</sub> на 13,3–26,5 т. Такая экономия при использовании РМ-генераторов в основном обусловлена лучшим КПД, поскольку для обеспечения требуемой электрической мощности затрачивается меньше топлива. Кроме того, благодаря меньшей массе РМ-генера-

тора и повышенной максимальной мощности (поскольку максимальная мощность дизеля передается с большим КПД) сокращается общее время хода поезда.

H. Neudorfer. *Glaser's Annalen*, 2008, *Tagungsblatt SFT, Грац*.