

## **Перспективы применения тягового электропривода на гусеничных машинах**

© А.А. Стадухин, Е.Б. Сарач

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрены преимущества и недостатки тягового электропривода при использовании на гусеничных машинах. Описаны трудности компоновки электромеханической трансмиссии и возможные пути их устранения. Представлены конструктивные схемы гусеничных машин с тяговым линейным электродвигателем.*

**Ключевые слова:** гусеничная машина, электрическая трансмиссия, мотор-колесо, линейный электродвигатель.

Использование тягового электропривода для гусеничных машин различного назначения началось достаточно давно (рис. 1).

Преимущества, которые может дать тяговый электропривод (ТЭП) гусеничной машине (ГМ), хорошо известны:

- эффективное использование двигателя внутреннего сгорания (ДВС): работа на номинальной частоте генератора в качестве ТЭП, возможность использования ДВС меньшей мощности;
- применение накопителей энергии, которые позволяют реализовывать суммарную мощность, превышающую мощность ДВС, могут заряжаться при рекуперативном торможении и работе генератора во время остановки ГМ;
- простота передачи электрической энергии к удаленным исполнительным механизмам;
- возможность кратковременной работы ТЭП с мощностью, превышающей номинальную;
- возможность бесступенчатого поворота, разгона и сопутствующие им увеличение средней скорости и удобство управления ГМ.

Однако в настоящее время ТЭП для ГМ широко используется лишь на легких тихоходных мобильных роботах. Большого распространения он до сих пор не нашел из-за ряда недостатков:

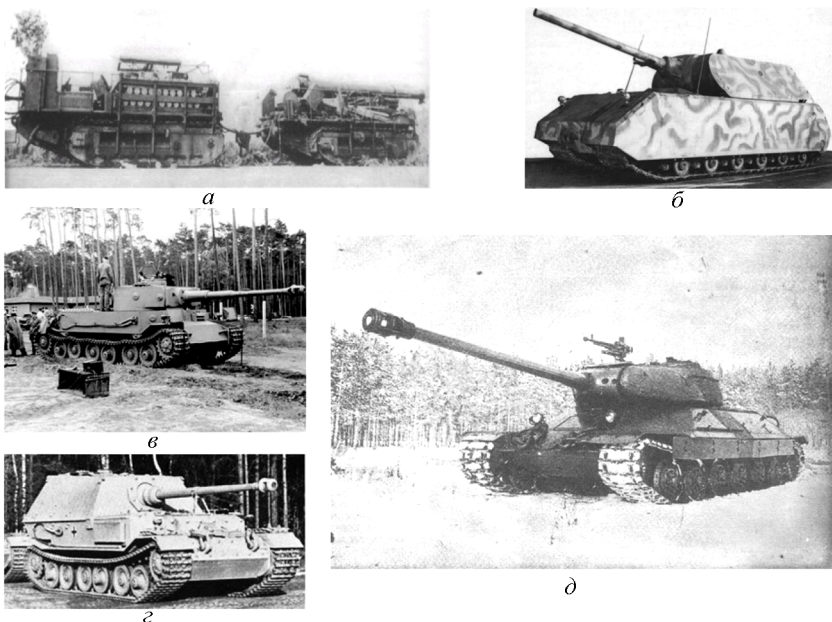
- большие масса и габариты;
- сложность эксплуатации;
- отсутствие приемлемых накопителей энергии, малая автономность;
- низкий КПД вследствие многократного преобразования энергии;

- несоответствие характеристик электродвигателей большинства типов изменяющимся условиям движения ГМ;
- необходимость применения вспомогательных устройств (в частности, дорогостоящих и крупногабаритных электрических преобразователей).

Следует отметить, что часть этих недостатков в настоящее время практически устранена [1]. Так, использование полупроводниковых силовых приборов с микропроцессорным управлением позволило получать для электродвигателей многих типов механические характеристики, повышающие эффективность их применения на транспортных машинах.

В качестве примера на рис. 2 приведена механическая характеристика вентильно-индукторного двигателя. Этот двигатель способен развивать высокий пусковой момент и стабильную силу тяги на низких скоростях.

Участок механической характеристики, близкий к кривой постоянной мощности, можно использовать для основных эксплуатационных скоростей, обеспечивая максимальную загрузку двигателя. Также для этого участка характерно автоматическое увеличение силы тяги в случае уменьшения скорости вследствие возрастающего сопротивления движению, что облегчает управление ГМ.



**Рис. 1.** Гусеничные машины с тяговым электроприводом:

*а* — самоходный артиллерийский комплекс начала XX в., состоящий из машины-генератора и машины-носителя вооружения; *б* — танк Maus; *в*, *г* — танк Tiger (P) и самоходная артиллерийская установка Ferdinand, созданная на его основе; *д* — танк ИС-6

Подобную механическую характеристику с помощью современных систем управления можно получить и для электродвигателей других типов, например бесколлекторных постоянного тока или асинхронных [2].

Как решение проблемы больших габаритов и массы электрических трансмиссий достаточно давно обозначилась тенденция к совмещению исполнительного органа машины с электродвигателем. Электрическая трансмиссия позволяет размещать исполнительные механизмы транспортной машины на большом расстоянии друг от друга, поэтому достаточно популярно такое техническое решение, как мотор-колесо (рис. 3) и мотор-звездочка.

Преимущества этого подхода очевидны — упрощается конструкция трансмиссии, вследствие чего повышается КПД и экономится место в кузове шасси. Недостатки подобного решения — это большие неподрессоренные массы и жесткое ограничение размеров встраиваемых в колесо элементов (в частности, ТЭП), сложность подвода электропитания и охлаждения.

Кроме того, как дальнейшее развитие описанной тенденции отмечаются совмещение рабочего элемента со статором или с ротором электродвигателя, отказ от редукторов, организация так называемого ТЭП прямого действия. Благодаря этому кинематически упрощается трансмиссия, что положительно влияет на КПД и также дает значительные компоновочные преимущества.

В многоосных колесных машинах большое количество ведущих колес позволяет реализовать на каждом из них относительно небольшой момент, но в итоге получить необходимую силу тяги. Можно сказать, сцепление колес с землей является естественным сумматором мощности. Это делает возможным разместить в корпусе ма-

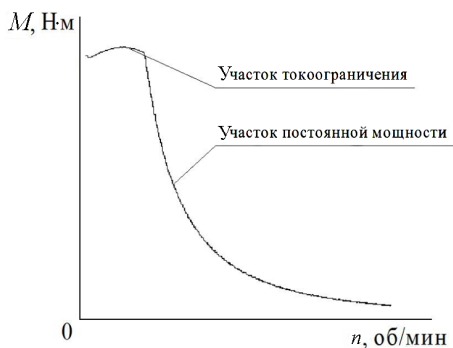


Рис. 2. Механическая характеристика вентильно-индукторного двигателя

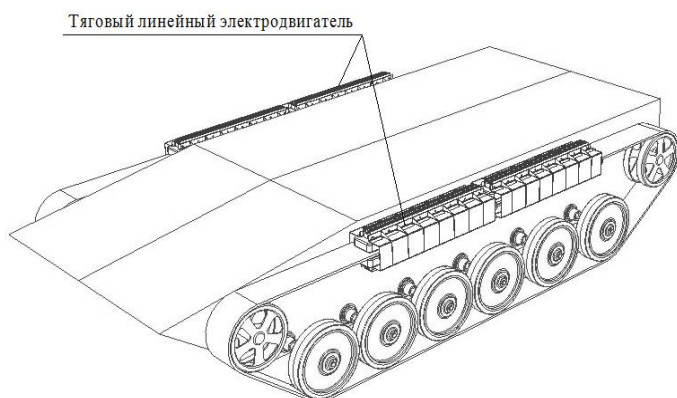


Рис. 3. Мотор-колесо лунохода

шины небольшие электродвигатели для каждого колеса или использовать мотор-колеса.

Применительно к ГМ создание мотор-звездочек затруднено вследствие сравнительно небольших диаметров ведущих колес (обычно их два) и большой потребной мощности, особенно при повороте.

Однако использовать гусеницу в качестве сумматора тяговой силы вполне возможно. Например, можно совместить гусеничный движитель и тяговое устройство благодаря использованию линейного электродвигателя. В этом случае тяговый линейный электродвигатель целесообразно разместить в обычно малоиспользуемом пространстве — вокруг верхней ветви гусеницы (рис. 4), видоизмененные траки которой будут выполнять функцию ротора линейного электродвигателя [3].



**Рис. 4.** Размещение тягового линейного электродвигателя на ГМ

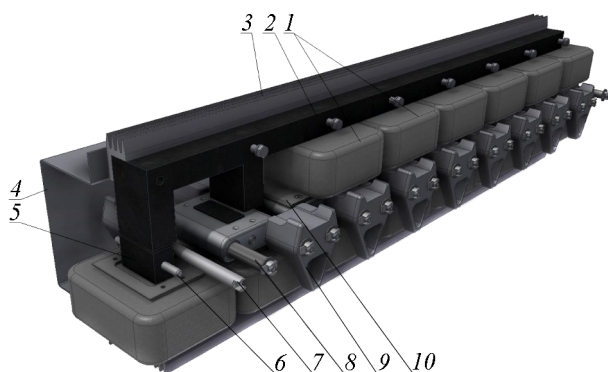
Помимо компоновочных преимуществ такой привод исключает высоконагруженное зацепление ведущего колеса с гусеницей либо облегчает его работу. Становится также возможным не использовать в ходовой части ГМ жестко прикрепленные к корпусу колеса.

Важно отметить, что линейный двигатель отличается от обычного кругового двигателя вращения только конструктивно. Различий в управлении практически нет. Однако применение этого привода накладывает и на тяговый электродвигатель (ТЭД), и на гусеницу ряд ограничений. Так, гусеница-ротор должна обладать всеми свойствами, присущими обычной гусенице: прочностью, жесткостью, износостойкостью, хорошим сцеплением с грунтом, сопротивлением срыванию и т. д.

В связи с этим размещение в гусенице обмоток или постоянных магнитов крайне нежелательно. Поэтому из всего многообразия электрических двигателей для данной области применения был выбран вентильно-индукторный электродвигатель (ВИД), имеющий один из самых простых роторов.

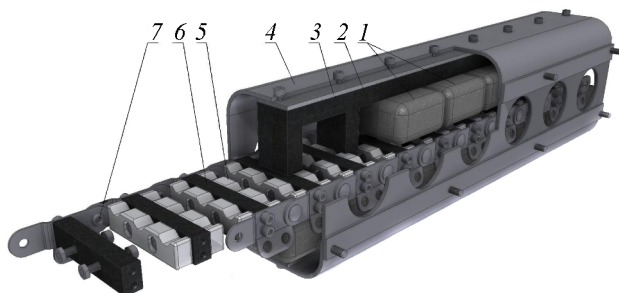
Данный тип электродвигателя состоит из простой, дешевой и надежной электрической машины с неодинаковым числом явно выраженных полюсов на статоре и роторе и электрического силового преобразователя с развитым микропроцессорным управлением. По основным массогабаритным и энергетическим показателям ВИД не уступает, а по ряду показателей даже превосходит прочие распространенные типы двигателей.

С помощью специально разработанных методик [4 — 6] были определены основные параметры электрических двигателей для шасси ГМ массой 16 т и мобильного робота массой 80 кг. На рис. 5 и рис. 6 показаны возможные конструкции ТЭД и траков этих машин.



**Рис. 5.** Устройство ТЭД и гусеницы-ротора для БМП-2:

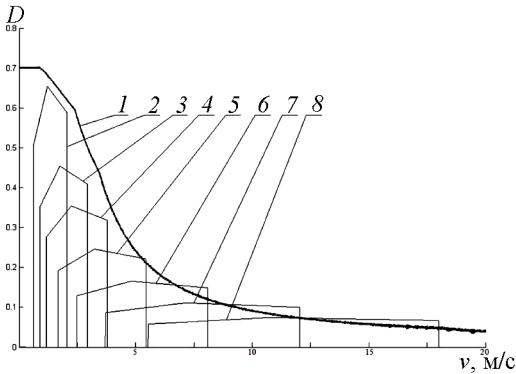
1 — обмотки фаз; 2 — статор; 3 — радиатор; 4 — корпус ТЭД; 5 — магнитопровод трака (ротор); 6 — ось крепления ротора; 7 — палец гусеницы; 8 — подшипник скольжения; 9 — серьга трака с грунтозацепами и гребнем; 10 — износостойкая накладка трака



**Рис. 6.** Устройство ТЭД и гусеницы-ротора для мобильного робота:

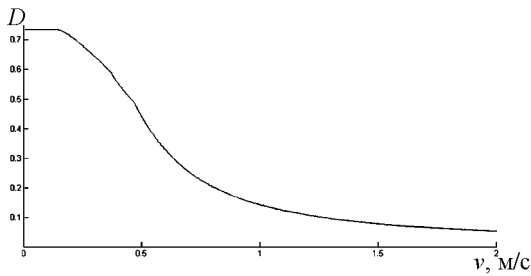
1 — обмотки фаз; 2 — статор; 3 — прокладка; 4 — корпус ТЭД; 5 — подушка трака с грунтозацепами; 6 — магнитопровод трака (ротор); 7 — заклепка, шарнир трака

Оценить подвижность разработанных ГМ можно с помощью динамических факторов, приведенных на рис. 7 и 8.



**Рис. 7.** Сравнение динамического фактора для 16-т шасси:

1 — шасси с ТЭД; 2 – 8 — первая пониженная, первая, вторая пониженная, вторая – пятая передачи механической трансмиссии БМП-2 соответственно



**Рис. 8.** Динамический фактор мобильного робота с ТЭД

В последние годы были разработаны и запущены в серийное производство легковые автомобили с гибридными (параллельными) электрическими трансмиссиями. В этих машинах только часть механической мощности (Mercedes-Benz S 400 Hybrid — 9 %, Toyota Prius-1 — 50 %) преобразуется в электрическую для привода ТЭП, остальная же часть служит для непосредственного привода ведущих колес, как это предусмотрено в классических механических трансмиссиях.

Подобное решение позволило, с одной стороны, использовать сравнительно небольшие, легкие и дешевые электрические машины и накопители энергии, а с другой, — получить преимущества электрической трансмиссии: интенсивный разгон за счет энергии, запасенной в накопителях, и малый расход топлива, особенно в городском цикле.

Применение гибридной параллельной схемы электрической трансмиссии для ГМ может быть еще более полезным, если использовать механический поток мощности для прямолинейного движения

ГМ, а электрический — при повороте, интенсивном разгоне, движении в сложных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бычков М.Г. *Основы теории, управление и проектирование вентиляционно-индукторного электропривода*. Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1999, 482 с.
- [2] Харитонов С.А., Сарач Е.Б., Нагайцев М.В., Юдин Е.Г. *Анализ и проектирование гибридных трансмиссий транспортных средств на основе планетарных механизмов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 92 с.
- [3] Стадухин А.А. Тяговый линейный электродвигатель быстроходного гусеничного шасси. *Изв. Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Сер. Транспортно-технические машины и комплексы*. Москва; Н. Новгород, Изд-во НГТУ, 2006, т. 19, с. 202 — 207.
- [4] Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Применение линейного электродвигателя в качестве альтернативного тягового привода гусеничного шасси. *Оборонная техника*, 2007, № 3 — 4, с. 74 — 77.
- [5] Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Особенности моделирования электрической трансмиссии транспортного средства на примере линейного тягового электрического привода. *Наука и образование*, 2011, т. 10.
- [6] Сарач Е.Б., Стадухин А.А. Математическая модель гусеничного обвода. *Наука и образование*, 2011, т. 10.

Статья поступила в редакцию 10.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Стадухин А.А., Сарач Е.Б. Перспективы применения тягового электропривода на гусеничных машинах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/977.html>

**Стадухин Антон Алексеевич** родился в 1983 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Ассистент кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 5 научных работ в области транспортного машиностроения. e-mail: [kjlactep@ya.ru](mailto:kjlactep@ya.ru)

**Сарач Евгений Борисович** родился в 1975 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области транспортного машиностроения. e-mail: [kjlactep@ya.ru](mailto:kjlactep@ya.ru)