

А. И. Гурджи, К. Ю. Машков, В. С. Лапшов

**МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ С ГИБРИДНОЙ  
ТРАНСМИССИЕЙ**

*В рамках исследований, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана, рассмотрены проблемы роботизации, в частности, влияние внешней среды на возможные схемы трансмиссии мобильных роботов, а также методы повышения подвижности за счет применения гибридных силовых установок и предлагаются некоторые пути их решения.*

**E-mail:** robot@sm.bmstu.ru

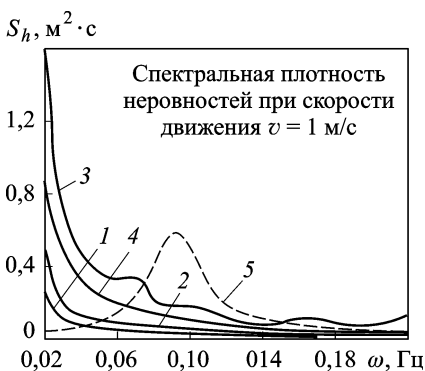
**Ключевые слова:** мобильные роботы, гибридная трансмиссия, силовая установка, повышение подвижности.

Решению задач обороны и защиты национальной безопасности посвящена единая программа по робототехнике, принятая в США еще шесть лет назад. Современные требования предполагают, что семейство безэкипажных наземных машин должно быть разнообразным по применению, габаритным размерам, источникам энергии, трансмиссии, системам управления. Автоматизированные экскаваторы и бульдозеры для нужд МЧС, патрульные машины для выполнения задач противодействия терроризму, малые переносные робототехнические системы для войсковых задач, универсальные телеуправляемые транспортные системы для боевого применения – все это многообразие робототехнических средств требует специальных подходов к проектированию подобных машин и агрегатов.

Особенности управления колесными и гусеничными мобильными роботами и условий их эксплуатации приводят к необходимости использования в качестве энергетической установки как двигателя внутреннего сгорания (ДВС), так и аккумуляторных батарей, источников солнечной энергии.

Анализ задач, стоящих перед роботизированными средствами боевого обеспечения, среди которых можно отметить такие, как робот-имитатор боевой техники, робот-мишень, робот-санитар, подвоза боеприпасов и другие [1], показал, что а также маршруты передвижения машин обеспечения пролегает в основном по дорогам и бездорожью.

Проведенные ранее исследования [2, 3] по влиянию неровностей на движущиеся с различными скоростями шасси показали степень воздействия профиля местности (длины неровности  $L$  и высоты  $H$ ) на движущее транспортное средство. Так, неровности длиной менее  $L_{\min}$  влияют на отдельные детали движителя, но не вызывают колебаний машины в целом. Неровности длиной больше  $L_{\max}$  не влияют на шасси, но изменяют силу сопротивления прямолинейному движению. Неровности длиной от  $L_{\min}$  до  $L_{\max}$  вызывают вынужденные



**Рис. 1.** Спектральная плотность неровностей

Для роботов среднего класса, характерного для большинства средств боевого обеспечения, в отличие от полноразмерных боевых машин, минимальная и максимальная длины микропрофиля дорог при принятых значениях  $L_6 = 2 \dots 4$  м,  $v_{\max} = 6 \dots 10$  м/с,  $\Omega = 0,5 \dots 1$  Гц находятся в пределах от 1,5 до 10 м.

Ранее отмечалось, что неровности длиной более  $L_{\max}$  не влияют на колебания машины, но изменяют сопротивление движению шасси  $f_0$ .

Рассматривая спектральную плотность распределения высот неровностей для каждого типа местности можно определить обобщенные характеристики неровностей местности вне дорог в целом (рис. 1) (кривая 4), где пашня (1), луговина (2) и особая среда — поле боя (3). Следует отметить, что спектральная плотность микропрофиля различного типа для танковых и полигонных трасс (5) отличается четко выделенной полосой частот, соизмеримой с удвоенной базой тяжелых машин (8...12 м), а для местности вне дорог носит преимущественно низкочастотный характер и монотонно убывает.

Отсюда следует, что для роботизированных комплексов (РТК) среднего класса с уменьшенной базой значительная часть опорных поверхностей (порядка 45 %) попадают в зону, мало влияющую на сопротивление прямолинейному движению, что необходимо учитывать при определении различных параметров силовой установки и шасси в целом.

Исследование технических путей создания РТК боевого обеспечения, предназначенного для решения различных задач, в том числе для оказания первой помощи и эвакуации раненных, доставки боеприпасов в любое время суток и в сложных погодных условиях при огневом воздействии противника, позволило определить ряд требований, необходимых для успешного функционирования комплекса.

Это — развитие дистанционно управляемых образцов, которое предполагает постепенный переход от простейших форм дистанцион-

продольные и поперечные колебания корпуса, а также вертикальные линейные колебания затрудняют работу оператора, системы технического зрения и ухудшают функционирование спецоборудования.

Минимальная и максимальная длины неровностей определяются базой шасси  $L_6$ , частотой колебаний  $Q$  и скоростью  $v$  их движения:

$$L_{\min} = 0,75L_6;$$

$$L_{\max} = v_{\max} \sqrt{\frac{2}{\Omega}}.$$

ного управления к уровню интерактивного (без непрерывного участия человека) супервизорного управления за счет введения элементов автономного функционирования образца при управлении движением и специальным оборудованием.

Управление движением РТК обеспечивается на следующих основных режимах движения по:

- заданным траекториям с учетом динамики шасси;
- дорогам;
- пересеченной местности.

Архитектура силового привода должна позволять передвижение с транспортными скоростями по местности до 20 км/ч, а по дорогам — до 40 км/ч и обеспечивать кратковременные режимы скрытого перемещения на дистанцию не менее 500 м. Отсюда можно определить ряд требований к силовому приводу РТК:

1) обеспечение движения в экономичном режиме при малых сопротивлениях прямолинейному движению (например, шасси  $6 \times 6$  в режиме  $6 \times 2$ );

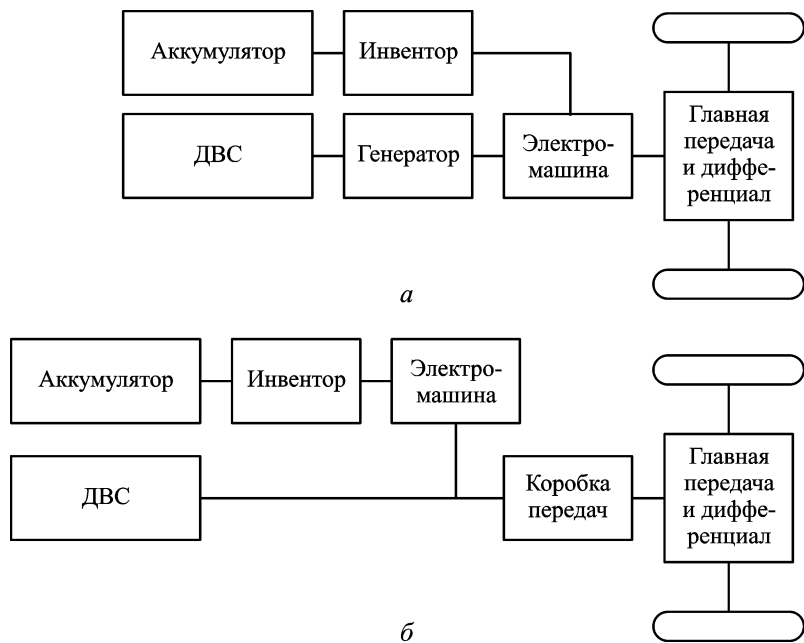
2) движение в условиях повышенного коэффициента сопротивления движению ( $6 \times 6$ );

3) режим скрытого перемещения при выключенной силовой установке. Одним из способов реализации данной задачи может быть применение гибридной силовой установки.

Вместе с тем все больший интерес проявляется к так называемым гибридным трансмиссиям, где подвод мощности осуществляется от нескольких видов источников энергии и, соответственно, увеличивается число посвященных этой теме исследований. Гибридные трансмиссии дают возможность получить тяговую характеристику, близкую к гиперболической, снизить расход топлива и увеличить пробег транспортного средства, уменьшить выброс вредных веществ. Кроме того, частота вращения двигателя не будет зависеть от скорости транспортного средства. Однако гибридные трансмиссии требуют мощных электродвигателей, а поскольку их нужно устанавливать на движущийся объект, то необходимым условием является их компактность. Кроме того, нужны аккумуляторные батареи большой емкости.

Существует много вариантов построения гибридных трансмиссий. Наиболее часто встречаемые — это последовательные (рис. 2, *а*) и параллельные (рис. 2, *б*) варианты. В настоящее время все большее распространение получают гибридные трансмиссии с разделением мощности ДВС (см. рис. 2, *б*).

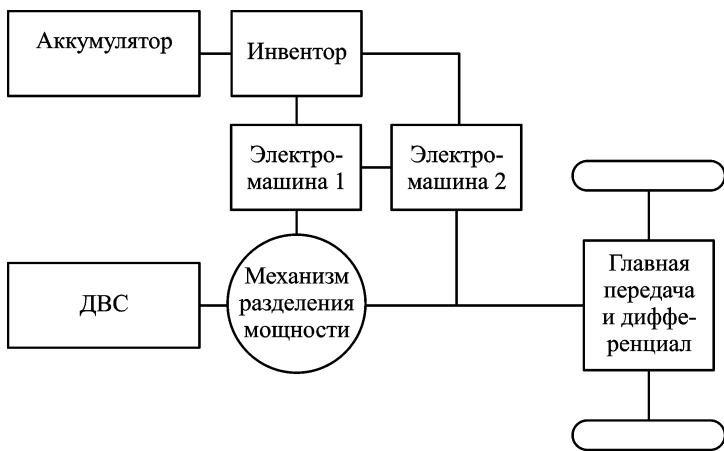
При последовательном варианте (см. рис. 2, *а*) мощность передается от ДВС на генератор, далее к электродвигателю, который соединен с ведущими колесами. Между ДВС и ведущими колесами отсутствует прямая механической связь (ДВС и ведущие колеса — независимы



**Рис. 2. Последовательный (а) и параллельный (б) варианты построения гибридной трансмиссии**

друг от друга). Пара электродвигатель–генератор совместно с аккумуляторами представляет собой электрическую трансмиссию, которая обеспечивает бесступенчатое изменение передаточного отношения и регулирование мощности между ДВС и ведущими колесами. В этом случае происходит двойное преобразование энергии ДВС: механической в электрическую и обратно. Каждое преобразование приводит к потере в среднем 10 % мощности [2]. Таким образом, КПД трансмиссии в этом случае может быть не более 81 %. Кроме того, максимальная мощность, по крайней мере одной электромашины, должна соответствовать максимальной мощности ДВС. Это условие приводит к увеличению габаритных размеров и массы трансмиссии. Поэтому последовательные варианты построения гибридной трансмиссии используются, главным образом, для коммерческих транспортных средств, работающих в режиме “stop-and-go”.

В случае параллельной гибридной трансмиссии (см. рис. 2, б) электромашина располагается параллельно обычной механической трансмиссии. Электрическая машина может быть объединена с ДВС, трансмиссией или просто соединена с ведомым валом. В этом случае существует два независимых потока мощности. Регулирование передаточного отношения осуществляется с помощью механической коробки передач, а регулирование мощности — с помощью электромашины. Поскольку имеется прямая механическая связь между ДВС и ведущими колесами, то частоты их вращения являются зависимыми друг от друга. Параллельные гибридные трансмиссии хорошо себя зареко-



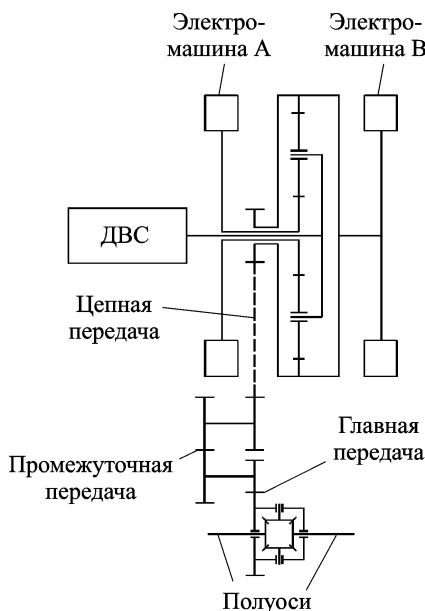
**Рис. 3.** Трансмиссия с разделением мощности ДВС

мендовали при движении по магистрали, но оказались непригодными по экономическим соображениям для городских условий движения. Жесткая связь частот вращения ДВС и ведущих колес требует в этом случае использования в составе трансмиссии коробки передач или вариатора.

Простые варианты параллельного построения гибридной трансмиссии используются, главным образом, для систем, в которых мощность, проходящая через электрическую часть трансмиссии, не превышает 15 % мощности ДВС.

Трансмиссия с разделением мощности ДВС (рис. 3) является другим, наиболее перспективным вариантом построения гибридной трансмиссии, который с недавнего времени пользуется повышенным вниманием со стороны разработчиков трансмиссий. Следует отметить, что в этом случае для разделения потока мощности ДВС в настоящее время используются как простые, так и сложные планетарные механизмы.

Первая серийно выпускаемая гибридная трансмиссия — трансмиссия с разделением мощности ДВС (рис. 4), называемая Toyota Hybrid System (THS), используется в автомобилях Prius. Она фактически представляет собой электромеханический механизм, в котором мощность передается от ДВС на ведомый вал трансмиссии двумя потоками (механиче-



**Рис. 4.** Трансмиссия THS

ским и электрическим) независимо от того используется или не используется энергия аккумуляторных батарей. Трансмиссия THS позволяет бесступенчато изменять передаточное отношение, но для этого потребовалось использовать две электромашины.

Во всех гибридных трансмиссиях фирмы Toyota использованы синхронные электромашины переменного тока с постоянными магнитами. В таблице представлены характеристики электромашин, используемых в различных автомобилях.

Параметр	Prius	Camry HV	RX 400h/Highlander	GS 450h
Номинальная мощность, кВт	50	105	123	147
Максимальное число оборотов, об/мин	6700	12400	12400	14400
Номинальный момент, Н·м	400	270	333	275
Время разгона до скорости 60 миль в час, с	10,1	8,5	6,9	5,2
Максимальное напряжение, В	500	650	650	650

Перечисленные преимущества и ограничения показывают, что для мобильных роботов, особенно крупногабаритных, применение гибридных трансмиссий целесообразно и перспективно.

Используя гибридную трансмиссию можно уменьшить тепलोэметность военного робота, улучшить его эксплуатационные качества, в частности, стратегическую и тактическую мобильности, автономность, маневренность.

Следовательно, разрабатывая подобную технологию для перспективных робототехнических систем, можно повысить эффективность выполнения основных задач, стоящих перед робототехническими комплексами как оборонного, так и гражданского назначения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М а ш к о в К. Ю., Н а у м о в В. Н. О повышении проходимости транспортных роботов // Оборонная техника. – 2008. – № 1–2. – С. 63–67.
2. Т е о р и я и конструкция. Т. 8. – М.: Машиностроение, 1987. – 196 с.
3. М а ш к о в К. Ю., Р у б ц о в И. В., Н а у м о в В. Н. Боевые минироботы и обеспечение их подвижности на поле боя // Материалы III Науч. практич. конф. Перспективные системы и задачи управления. Т. 1. – Таганрог, 2008. С. 145–147.
4. Н а у м о в В. Н., М а ш к о в К. Ю., Р у б ц о в И. В. Существующие роботы специального назначения и методы повышения их эффективности для борьбы с террористами // Вопросы оборонной техники. – 2009. – № 5–6. – С. 42–47.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012