

$$0 = A_1 \sin \varepsilon_1 + A_2 \sin \varepsilon_2,$$

$$\varphi_0 = A_1 \frac{(2 - \sqrt{2})g}{[g - (r_{k_2} + h_k)](2 - \sqrt{2})g / r_{k_1}} \sin \varepsilon_1 - A_2 \frac{r_{k_1} (2 - \sqrt{2})g / (r_{k_2} + h_k)}{[g - (r_{k_2} + h_k)](2 + \sqrt{2})g / (r_{k_2} + h_k)} \sin \varepsilon_2$$

Из первых двух уравнений определим  $\cos \varepsilon_1 = \cos \varepsilon_2 = 0$ . Следовательно,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \pi/2$ . Для второй пары уравнений запишем:

$$0 = A_1 \sin \varepsilon_1 + A_2 \sin \varepsilon_2,$$

$$A_1 - A_2 = \varphi_0 \frac{(2 - \sqrt{2})g}{[g - (r_{k_2} + h_k)](2 - \sqrt{2})g / r_{k_1}},$$

следовательно,

$$A_1 = \varphi_0 \frac{(2 - \sqrt{2})g}{4 \cdot [g - (r_{k_2} + h_k)](2 - \sqrt{2})g / r_{k_1}}, \quad A_2 = -\varphi_0 \frac{(2 - \sqrt{2})g}{4 \cdot [g - (r_{k_2} + h_k)](2 - \sqrt{2})g / r_{k_1}}.$$

Частное решение для начальных условий будет иметь вид:

$$q_1 = \varphi_0 \frac{(2 - \sqrt{2})g}{[g - (r_{k_2} + h_k)](2 - \sqrt{2})g / r_{k_1}} / 4 (\cos k_1 t - \cos k_2 t), \quad q_2 = \frac{1}{2} \varphi_0 (\cos k_1 t + \cos k_2 t).$$

Главные колебания системы запишем в виде (19):

$$q_1^{(1)} = A_1 \sin(k_1 t + \varepsilon_1), q_2^{(1)} = \sqrt{2} A_1 \sin(k_1 t + \varepsilon_1), q_1^{(2)} = A_2 \sin(k_2 t + \varepsilon_2), q_2^{(2)} = -\sqrt{2} A_2 \sin(k_2 t + \varepsilon_2). \quad (19)$$

Из (19) видно, что плоское движение системы «колесо – опорная поверхность» (рисунок 1) осуществляется с амплитудами, зависящими от соотношений радиусов  $r_{k_1}$  и  $r_{k_2}$ , а также от величины  $h_k$ .

Таким образом, проделанный анализ показывает, что кинематические параметры в значительной мере определяют энергоэффективность колеса перекатывающегося типа.

Плоское движение КПТ совершается в основном за счёт внешнего силового гравитационного поля с применением в конструкции колеса опорно-приводного устройства, создающего момент силы путём смещения мгновенного центра давления по ходу движения транспортного средства. Возникающие при этом колебания могут войти в зону резонансных частот, которые отрицательно скажутся на плавности хода транспортного средства. Следовательно, обод колеса целесообразно выполнять из двух беговых дорожек, опорные башмаки которых должны быть смещены друг относительно друга на полшага их опорной поверхности.

### Литература

1. Сергеев А.И., Шарипов В.М., Щетинин Ю.С. Колёсный движитель перекатывающегося типа. Патент РФ №2467890. Опубл. 27.11.12. Бюл.№33.
2. Сергеев А.И., Чёрный И.В. Математическая модель формирования опорной поверхности движения колесом перекатывающегося типа. Известия МГТУ «МАМИ» № 2 (6), 2008. с. 74-78.
3. Сергеев А.И. Теоретический анализ плоского движения колеса перекатывающегося типа при формировании опорной поверхности. Известия МГТУ «МАМИ» научный рецензируемый журнал. – М., МГТУ «МАМИ», № 2 (14), 2012, Т.1, 430 с.

### **Проектирование и изготовление стенда для имитации движения транспортного средства с приводом от электродвигателя**

к.т.н. проф. Серебряков В.В., к.т.н. Баулина Е.Е., Кондрашов В.Н.

Университет машиностроения

8(495)223-05-23 (1013) [vvs@mami.ru](mailto:vvs@mami.ru)

*Аннотация.* В статье описаны этапы проектирования, конструктивные и технологические решения при изготовлении агрегатов стенда для имитации движения

транспортного средства с приводом от электродвигателя.

*Ключевые слова:* специализированный стенд, электроприводное транспортное средство, согласующий редуктор, нагружающее устройство, инерционный аккумулятор кинетической энергии

Целью работы являлось создание специализированного стенда для проведения испытаний вновь создаваемых электроприводных транспортных средств (ЭТС). Стенд должен обеспечить имитацию реальных нагрузок на тяговый электродвигатель (ТЭД) со стороны трансмиссии ЭТС при его движении в различных дорожных условиях.

Предварительно в состав стенда должны входить:

- нагружающее устройство (нагружающий генератор (НГ)) мощностью не менее 40 кВт, для создания нагрузок на ТЭД, имитирующих сопротивление качению колёс ЭТС, сопротивление воздуха, сопротивление движению ЭТС на подъёме;
- инерционный аккумулятор кинетической энергии (инерционная масса (ИМ)) для создания нагрузок на ТЭД, имитирующих сопротивление ускорению ЭТС;
- автоматическая система управления нагружающим устройством стенда.

В зависимости от номинальных характеристик основных элементов, выбранных для применения на новом транспортном средстве, для согласования их рабочих параметров при проектировании ЭТС, а соответственно и стенда, может потребоваться установка на них дополнительных компонентов, не учтённых в данном перечне.

Стенд должен обеспечивать моделирование нагрузок на ТЭД при разгоне, равномерном движении, торможении и движении с уклоном для двух ЭТС, полные массы которых составляют  $m_{a1} = 1200$  и  $m_{a2} = 1800$  кг. Он должен позволять воспроизводить испытания транспортных средств по городскому циклу, приведённому в Правилах ЕЭК ООН № 101 [5].

В качестве тяговых электродвигателей выбраны две электромашины: для ЭТС полной массой  $m_{a1} = 1200$  кг – мощностью 30 кВт и максимальной частотой вращения вала 5800 об/мин, для ЭТС полной массой  $m_{a2} = 1800$  кг – 70 кВт и максимальной частотой вращения вала 6400 об/мин.

Передаточные числа трансмиссий рассчитывались исходя из обеспечения максимальной скорости ЭТС равной 100 км/ч [6]. В том случае, когда эта скорость обеспечивается при максимальной частоте вращения вала ТЭД, то передаточные числа трансмиссий ЭТС будут следующими (табл. 1).

Таблица 1

**Передаточные числа трансмиссий ЭТС**

Полная масса ЭТС, кг	Мощность ТЭД, кВт	Макс. частота вращения вала ТЭД, об/мин	Передаточное число трансмиссии ЭТС
1200	30	5800	5.57
1800	70	6400	7

Несмотря на то что предполагается создавать абсолютно новые ЭТС, целесообразно при их проектировании максимально использовать уже существующую компонентную базу автомобильной техники. Так, при проектировании механической трансмиссии ЭТС для передачи крутящего момента к ведущим колёсам разумно использовать редуктор главной передачи какого-либо серийного автомобиля соответствующего класса. В автомобилях малого класса (к которым можно отнести ЭТС полной массой  $m_{a1} = 1200$  кг) передаточные числа главной передачи, как правило, имеют значения от 3.0 до 3.5 [4]. В автомобилях среднего класса (к которым можно отнести ЭТС полной массой  $m_{a2} = 1800$  кг) – от 3.5 до 4.0 [4]. Использование выбранных для создания ЭТС тяговых электродвигателей из-за высоких значений максимальных частот вращения валов требует больших передаточных чисел для их трансмиссий. При применении главных передач серийных автомобилей для обеспечения заданной максимальной скорости потребуется установка дополнительного согласующего редуктора с передаточным числом около  $i_p = 1.85$  для ЭТС с ТЭД мощностью 30 кВт и  $i_p = 1.75$

для ЭТС с ТЭД мощностью 70 кВт. Такой редуктор предназначен для согласования высоких значений частот вращения вала тягового электродвигателя и низкого значения частоты вращения вала нагружающего генератора.

Так как, согласно предварительно проведённому тяговому расчёту, передаточные числа согласующих редукторов для ЭТС массами  $m_{a1} = 1200$  и  $m_{a2} = 1800$  кг оказались достаточно близки, то принято решение установить на стенде согласующий редуктор с передаточным числом  $i_p = 1.7$ . В этом случае частоты вращения валов ТЭД и НГ будут согласованы и составят: при  $n_{ТЭД} = 5800$  об/мин,  $n_{НГ} = 3412$  об/мин; при  $n_{ТЭД} = 6400$  об/мин,  $n_{НГ} = 3765$  об/мин.

Это является приемлемым как для НГ, так и для ИМ.

При проектировании и изготовлении стенда, с учётом выбранного значения передаточного числа согласующего редуктора, целесообразно скорректировать передаточные числа главных передач проектируемых ЭТС для сохранения необходимого значения общего передаточного числа трансмиссии.

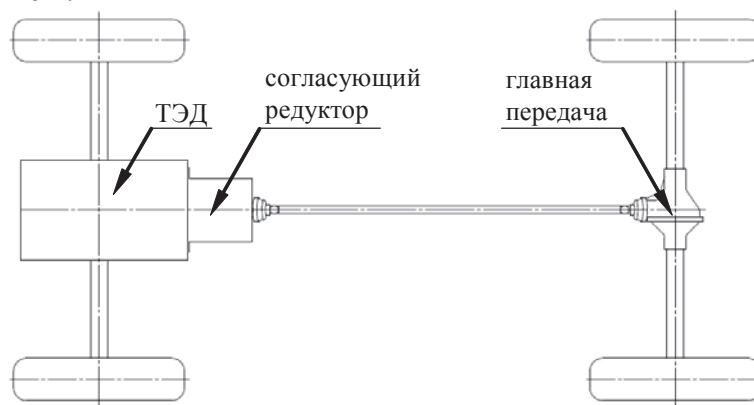
Как видно из таблицы 2, значения передаточных чисел трансмиссий ЭТС достаточно близки значениям, представленным в таблице 1.

Таблица 2

**Значения скорректированных передаточных чисел главных передач и передаточных чисел трансмиссий ЭТС**

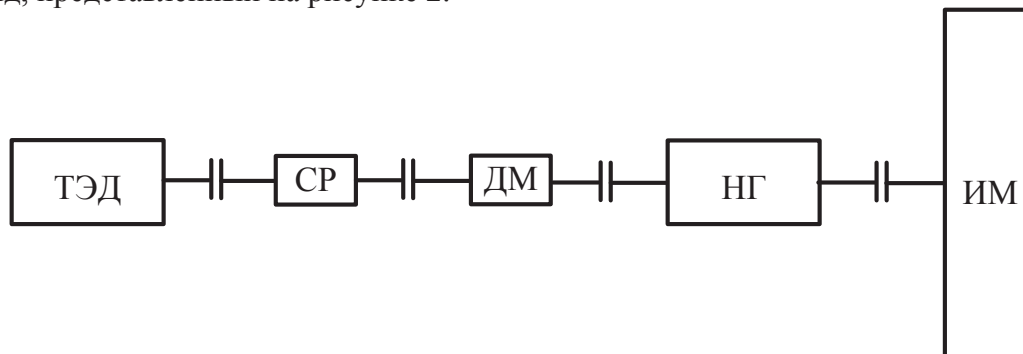
	$i_0$	$i_p$	$i_{mp}$
ЭТС 1	3.336	1.7	5.67
ЭТС 2	4.196	1.7	7.13

Возможная схема ЭТС с установленным в его трансмиссии согласующим редуктором приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1. Схема электроприводного транспортного средства**

В соответствии с рисунком 1 принципиальная схема проектируемого стенда будет иметь вид, представленный на рисунке 2.



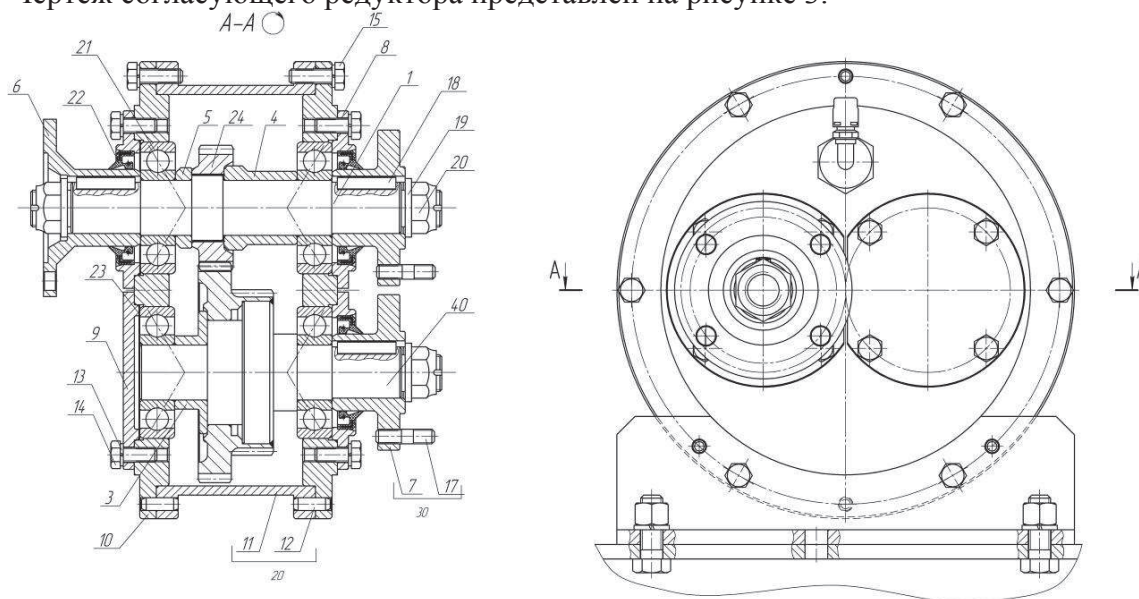
**Рисунок 2. Схема стенда:**

ТЭД – тяговый электродвигатель, СР – согласующий редуктор,  
ДМ – датчик момента, НГ – нагружающий генератор, ИМ – инерционная масса

Для изготовления согласующего редуктора была использована пара цилиндрических косозубых шестерён от автомобильной коробки передач. По конструктивным и технологиче-

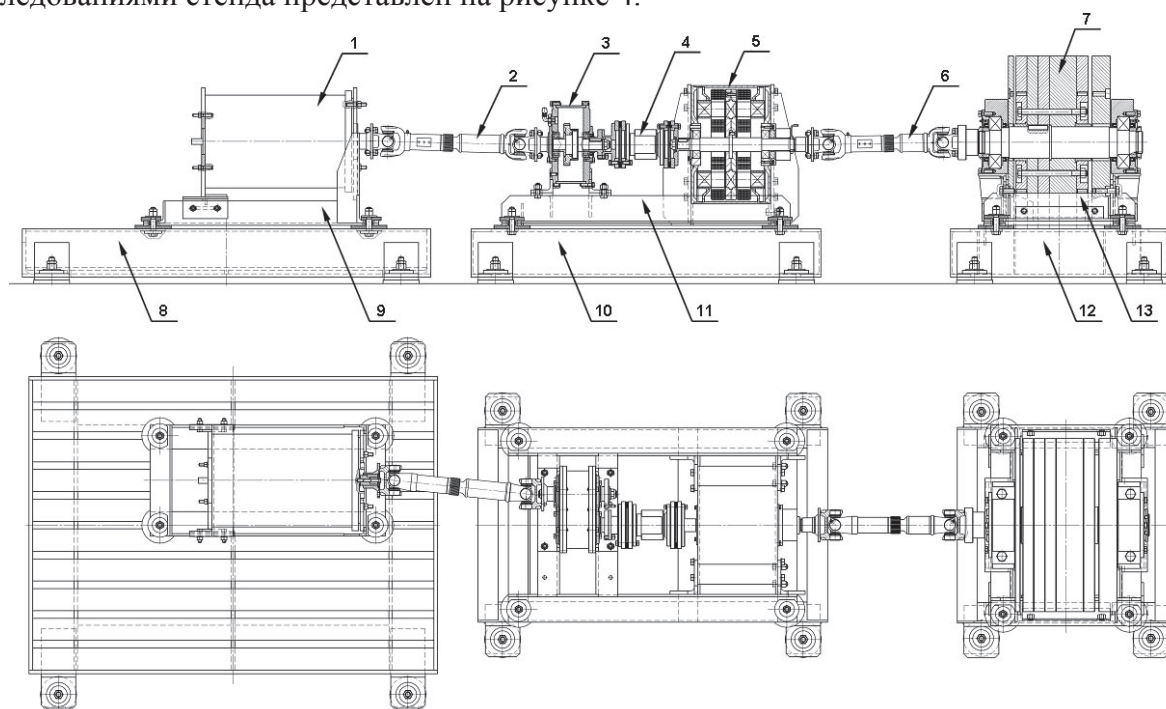
ским соображениям корпус согласующего редуктора сделан цилиндрической формы, а на ведущем вале установлены два фланца для того, чтобы он мог работать как с передаточным числом 1.7, так и с передаточным числом 1.0.

Чертёж согласующего редуктора представлен на рисунке 3.



**Рисунок 3. Согласующий редуктор**

Чертёж общего вида построенного в соответствии с проведёнными предварительными исследованиями стенда представлен на рисунке 4.



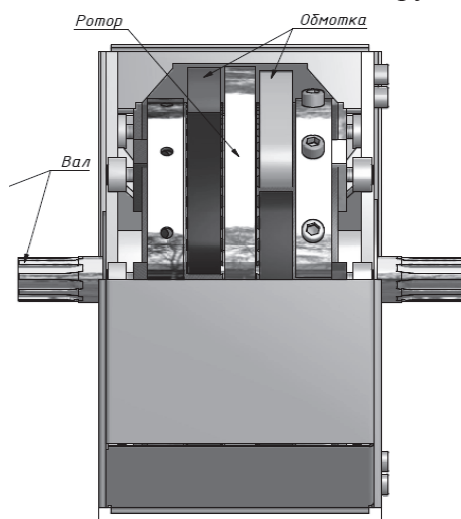
**Рисунок 4. Общий вид стенда: 1 – тяговый электродвигатель, 2 – карданный вал 1, 3 – согласующий редуктор, 4 – датчик крутящего момента и частоты вращения, 5 – нагружающий генератор, 6 – карданный вал 2, 7 – инерционный аккумулятор кинетической энергии, 8 – рамы агрегатов, 9 – основания**

На стенде, как и на ЭТС, согласующий редуктор с передаточным числом  $i_p = 1.7$  установлен непосредственно за тяговым электродвигателем. Стенд позволяет использовать для привода и другие ТЭД. При этом, если максимальная частота вращения вала ТЭД не превышает 3500 об/мин, имеется возможность использовать этот согласующий редуктор с передаточным числом  $i_p = 1.0$ . Для этого необходимо переставить согласующий редуктор на другие



установочные отверстия в положение, при котором с датчиком момента будет соединён второй фланец ведущего вала редуктора.

В качестве нагружающего устройства на стенде использована торцевая асинхронная двухстаторная обратимая электрическая машина (ОЭМ), общий вид которой и технические характеристики представлены на рисунке 5. Торцевая конструкция ОЭМ обладает рядом преимуществ по сравнению с асинхронной машиной классической конструкции. Она имеет меньшую массу на единицу мощности и меньшие габариты в осевом направлении, что даёт ей определённые преимущества при установке на ЭТС. Условия для теплоотдачи, охлаждения и вентиляции, в силу разнесения источников тепловыделения у неё также лучше, чем у машины классической конструкции.



Максимальный, кратковременный, в течение 10 с, момент до 500 об/мин, Н·м	330
Максимальный длительный момент до 1800 об/мин, Н·м	190
Рабочий диапазон частоты вращения, об/мин	0 ÷ 3000
Охлаждение	воздушное
Масса, кг	76
Габаритные размеры, без учета вылета валов, длина × ширина × высота, мм	240×340×340

**Рисунок 5. Торцевая асинхронная двухстаторная обратимая электрическая машина**

Инерционный аккумулятор кинетической энергии, изначально спроектированный для стенда, предназначен для имитации инерционных нагрузок при разгоне и торможении ЭТС массами  $m_{a1} = 1200$  и  $m_{a2} = 1800$  кг при передаточных числах их трансмиссий  $i_{mp} = 5.67$  и  $i_{mp} = 7.13$  соответственно.

Расчёт параметров инерционной массы производился с использованием следующих исходных данных (таблица 3).

Таблица 3

Параметр	Обозначение	Значение	
		ЭТС 1	ЭТС 2
		$m_{a1}$	$m_{a2}$
Масса, кг	$m_a$	1200	1800
Статический радиус колеса, м	$r_k$	0.3	0.3
Момент инерции колеса, кг·м <sup>2</sup>	$I_k$	1.634	1.634
Передаточное число главной передачи	$i_0$	3.336	4.196
Передаточное число согласующего редуктора	$i_p$	1.7	1.7
Передаточное число трансмиссии	$i_{mp}$	5.67	7.13

Момент инерции маховика, эквивалентного заданной массе ЭТС, вычислялся исходя из равенства кинетических энергий ЭТС и эквивалентного маховика [1].

Моменты инерции маховиков, эквивалентных моментам инерции ЭТС массами  $m_{a1} = 1200$  и  $m_{a2} = 1800$  кг, полученные в результате расчётов, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Масса ЭТС, $m_a$ , кг	Момент инерции эквивалентного маховика, $I_{ИМ}$ , кг·м <sup>2</sup>
1200	10.292
1800	9.572

Маховик, имитирующий момент инерции ЭТС массой  $m_{a2} = 1800$  кг принят за основ-

ной, так как он имеет минимальный момент инерции при заданных передаточных числах главной передачи и трансмиссии транспортного средства.

Момент инерции ЭТС массой  $m_{a1} = 1200$  кг имитируется путём присоединения к основному маховику дополнительного диска толщиной 0.015 м. с моментом инерции 0.719 кг·м<sup>2</sup>.

На стадии изготовления инерционного аккумулятора кинетической энергии было принято решение расширить возможности по имитации моментов инерции большего количества ЭТС за счёт увеличения количества дополнительных дисков до двух.

В результате конструкция инерционного аккумулятора кинетической энергии представляет собой набор стальных дисков диаметром 500 мм различной толщины. Часть этих дисков образует основной маховик (1) (рисунок 6), момент инерции которого эквивалентен моменту инерции ЭТС массой  $m_{a2} = 1800$  кг. К основному маховику могут быть прикреплены два дополнительных диска (2, 3), толщиной  $h = 0.015$  м и  $h = 0.053$  м.

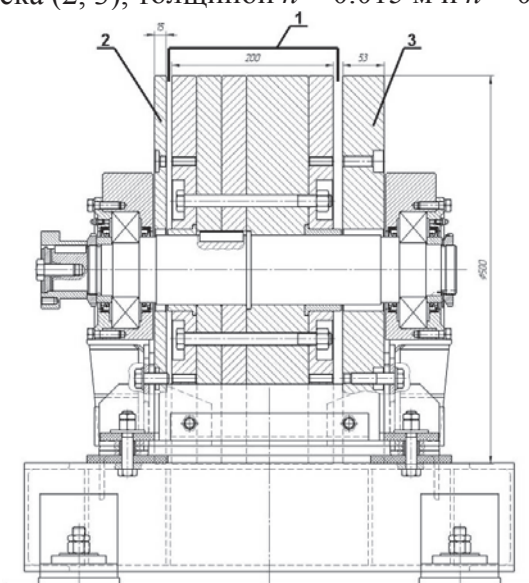


Рисунок 6. Инерционная масса: 1 – основной маховик; 2, 3 – дополнительные диски

Дополнительные диски крепятся к основному маховику с двух сторон специальными болтами по 6 штук с каждой стороны. В нерабочем положении они закреплены на опорах инерционной массы технологическими болтами.

Возможные сочетания массы основного маховика и масс прикрепленных к нему дополнительных дисков позволяют имитировать на стенде моменты инерции ЭТС, значения масс которых приведены в таблице 6.

Обозначения в таблице 6:  $R$  – радиус диска,  $h$  – толщина диска,  $S$  – площадь поперечного сечения диска,  $V$  – объём диска,  $m_{ИМ}$  – масса диска,  $I_{ИМ}$  – момент инерции диска,  $m_a$  – масса ЭТС.

Таблица 6.

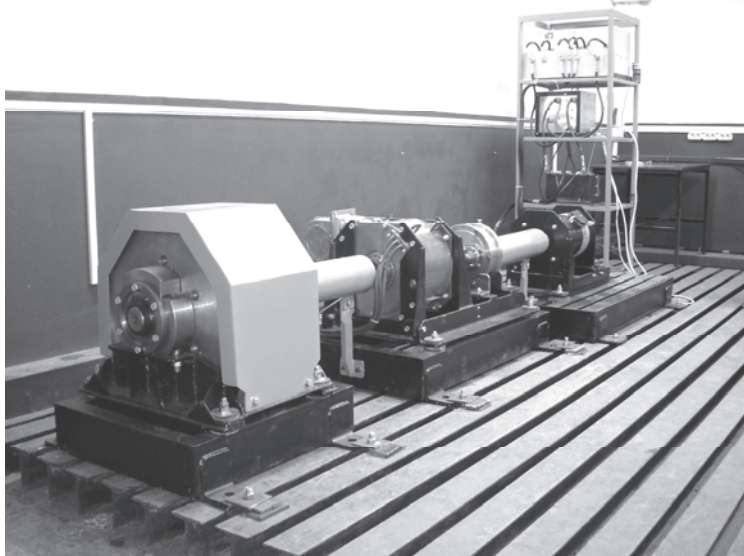
состав ИМ, мм	$i_0 = 4.196$				$i_0 = 3.336$			
	200	200+15	200+53	200+15+53	200	200+15	200+53	200+15+53
$R$ , м	0.250	0.250	0.25	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
$h$ , м	0.200	0.215	0.253	0.268	0.200	0.215	0.253	0.268
$S$ , м <sup>2</sup>	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196
$V$ , м <sup>3</sup>	0.039	0.042	0.050	0.053	0.039	0.042	0.050	0.053
$m_{ИМ}$ , кг	306	329	387	410	306	329	387	410
$I_{ИМ}$ , кг·м <sup>2</sup>	9.572	10.290	12.109	12.827	9.572	10.290	12.109	12.827
$m_a$ , кг	<b>1800</b>	1940	2296	2437	1111	<b>1200</b>	1425	1513

Основными задачами системы автоматического управления, спроектированной и изготовленной для стенда, являются: задание режимов работы нагружающего устройства, слежение за параметрами, характеризующими его функционирование в реальном времени и запись этих параметров для последующего анализа.

Задание режимов работы нагружающего устройства осуществляет программа, учитывающая нагрузки на элементы трансмиссии, создаваемые сопротивлением качению колёс, сопротивлением воздуха, в зависимости от скорости ЭТС, и сопротивлением подъёму.

Скорость и ускорение ЭТС задаются водителем, воздействующим на элементы управления ТЭД. Эти функции на стенде осуществляет оператор или специальная программа, имитирующая действия водителя при движении ЭТС. В частности эта программа позволяет воспроизводить испытания ЭТС по городскому циклу, приведенному в Правилах ЕЭК ООН № 101 [5].

Общий вид спроектированного и изготовленного стенда представлен на рисунке 7.



**Рисунок 7. Общий вид стенда**

При проектировании и изготовлении стенда были учтены требования по технике безопасности [2, 3], предъявляемые к защите обслуживающего персонала от механических и электрических поражающих воздействий во время его эксплуатации. Кроме того, крепление всех несущих элементов стенда к установочным поверхностям осуществлено через виброизолирующие и шумопоглощающие прокладки. Такие же прокладки использованы для соединения отдельных механизмов стенда с несущими элементами. Эти мероприятия позволили значительно уменьшить шум при работе стенда.

На изготовленном в результате работы стенде можно проводить исследования, результаты которых позволят уже на стадиях проектирования, расчёта и конструирования решать научно-технические задачи по созданию транспортных средств с приводом от электродвигателя. Кроме того, исследования, проводимые на разработанном стенде, позволят получить новые теоретические знания в части создания методов проектирования, расчёта и конструирования электроприводных транспортных средств с оптимальными значениями показателей энергообмена и тягово-скоростных свойств.

Такого типа работы являются дальнейшим развитием теоретических и экспериментальных исследований, проводимых многими ведущими зарубежными автомобильными фирмами, по созданию электромобилей.

#### **Литература**

1. Баженов П.В., Иванов С.Н., Селифонов В.В., Серебряков В.В. Инерционные, жёсткостные и демпфирующие свойства агрегатов и узлов отечественного автомобиля. Учебное пособие по дисциплине "Конструирование и расчет автомобиля". М.: МАМИ, 1986. 29 с.
2. ГОСТ 12.2.003-91 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2007. 11 с.

3. ГОСТ 12.3.002-75. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2007. 8 с.
4. Гришкевич А.И. и др. Проектирование трансмиссий автомобилей. Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. 272 с.
5. Правила № 101 ЕЭК ООН. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, приводимых в движение только двигателем внутреннего сгорания либо приводимых в движение при помощи гибридного электропривода, в отношении измерения объема выбросов двуокиси углерода и расхода топлива и/или измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге, а также транспортных средств категорий M<sub>1</sub> и N<sub>1</sub>, приводимых в движение только при помощи электропривода, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге. Добавление 100. Пересмотр 2.
6. Селифонов В.В. Теория автомобиля. Учебное пособие. М.: ООО "Гринлайт", 2009. 208 с.

### **Устройство для регистрации микропрофиля автомобильной дороги**

к.т.н. проф. Степанов И.С., к.т.н. доц. Бернацкий В.В.

Университет машиностроения

8 (495) 223-05-23, i\_stepanov@list.ru, vladislav\_bern@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрены принципиальные схемы устройств, используемых для регистрации микропрофиля автомобильных дорог, их достоинства и недостатки. Предложена конструктивная схема устройства, свободного от большинства недостатков.

*Ключевые слова:* автомобильная дорога, дорожные неровности, микропрофиль

При исследованиях, связанных с плавностью хода автомобиля и определением режимов работы его подвески, обычно проводится моделирование движения машины по реальной дороге с определенными неровностями. Целью таких работ является получение статистических характеристик интересующих параметров автомобиля. Компьютерное моделирование может проводиться двумя способами.

При первом способе выходные параметры модели определяют с помощью статистических характеристик микропрофиля дороги (функции спектральной плотности) и передаточных функций расчетной модели. Производят это перемножением ординат амплитудно-частотной характеристики системы поддрессирования автомобиля и ординат функции спектральной плотности дороги на соответствующих частотах. Передаточные функции автомобиля как колебательной системы могут быть определены подачей на вход модели детерминированного воздействия, например синусоидального. При несложных «плоских» расчетных схемах получают достаточно информативные данные, однако если используется более сложная «объемная» многомассовая расчетная модель, учитывающая движение правых и левых колес автомобиля по различному микропрофилю, этот способ неприменим.

При втором способе на вход расчетной модели последовательно, с определенным шагом, подают ординаты микропрофиля дороги и определяют выходные параметры модели, например вертикальные ускорения в характерных точках автомобиля, динамические прогибы подвесок и т.п. Иначе говоря, проводят ряд последовательных решений дифференциальных уравнений, описывающих автомобиль как колебательную систему, при начальных условиях, определяемых ординатами микропрофиля дороги под каждым из колес с учетом результатов предыдущего решения этих уравнений. В итоге также определяют статистические характеристики выходных величин.

Полученные результаты проверяются натурными испытаниями. Важно, чтобы исследования расчетной модели и реальные испытания автомобиля проводились на дорогах с одним и тем же микропрофилем, иначе подтверждение соответствия моделирования и реального объекта невозможно.