

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

**Т.В. Карпова**

## **Электрический привод :**

*Учебно - методическое пособие для лабораторных работ на стенде  
«Гибридная силовая установка»*

Благовещенск

2022

**ББК 31.291-07**

*Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
энергетического факультета  
Амурского государственного  
университета*

Карпова Т.В. (составитель)

Электрический привод : учебно-методическое пособие для лабораторных работ на стенде «Гибридная силовая установка».- Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2022. – 74 с.

Пособие предназначено для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электрический привод» для бакалавров по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» дневной и заочной форм обучения. Лабораторные работы выполняются на стенде «ГСУ».

*Рецензенты: доцент каф. АППиЭ, канд. техн. наук А.Н. Рыбалёв*

***В авторской редакции***

© Амурский государственный университет

© Карпова Т.В., составитель

## Содержание

	с.
<b>Краткие теоретические сведения</b>	<b>5</b>
1. Первые гибридные автомобили	5
2. Общее знакомство с гибридными и электрическими автомобилями	10
3. Автомобили с электрической трансмиссией	10
4. Гибридные электрические автомобили <i>HEV – (Hybrid Electric Vehicle)</i>	11
4.1. Что такое гибридный электрический автомобиль <i>HEV – (Hybrid Electric Vehicle)</i> – и гибридная силовая установка?	11
4.2. Гибридные силовые установки с последовательной схемой трансмиссии	14
4.3. Гибридные силовые установки с параллельной схемой	16
4.4. Последовательно-параллельная гибридная силовая установка (Full Hybrid)	18
4.5. Гибридные автомобили последовательно-параллельной схемы с возможностью подзарядки аккумуляторной батареи от постороннего источника электрической энергии <i>PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)</i>	19
5. Электрические автомобили (EV)	21
6. Электрические автомобили на топливных элементах	21
7. Гибридная силовая установка автомобиля Toyota Prius	22
7.1. Основные особенности трансмиссии	22
7.2. Делитель мощности (Power Split Device (PSD))	24
7.3. Кинематическая схема трансмиссии	25
7.4. Двигатель внутреннего сгорания	32
7.5. Агрегаты электромеханической трансмиссии Toyota HSD	32
7.5.1. Мотор-генераторы	32
7.5.2. Что отсутствует на автомобиле Prius	35
7.6. Некоторые режимы работы трансмиссии автомобиля Prius	36
<b>Краткое техническое описание стенда</b>	<b>38</b>
1. Назначение	38
2. Технические характеристики	38
3. Состав	38
4. Функциональная схема стенда	39
5. Общие указания при работе со стендом	40
<b>Лабораторные работы</b>	<b>41</b>
Лабораторная работа № 1	
Исследование работы электромотора гибридной силовой установки в режиме холостого хода при питании от аккумуляторной батареи	41

Лабораторная работа № 2	
Исследование работы электромотора гибридной силовой установки в нагрузочном режиме при питании от аккумуляторной батареи	44
Лабораторная работа №3	
Исследование работы электромотора в режиме рекуперативного торможения при питании от аккумуляторной батареи	47
Лабораторная работа №4	
Исследование работы гибридной силовой установки в режиме холостого хода	50
Лабораторная работа №5	
Исследование работы гибридной силовой установки в нагрузочном режиме	52
Лабораторная работа №6	
Исследование работы гибридной силовой установки в тормозном режиме	55
Лабораторная работа №7	
Исследование работы гибридной силовой установки с моделью планетарного механизма в нагрузочном режиме	58
Лабораторная работа №8	
Исследование работы гибридной силовой установки с моделью планетарного механизма в тормозном режиме	61
Лабораторная работа № 9	
Исследование работы электромотора в переходных режимах торможения и разгона	64
<b>Контрольные вопросы</b>	<b>66</b>
<b>Примеры решения задач</b>	<b>68</b>
<b>Тестовые задания</b>	<b>70</b>

## КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1. Первые гибридные автомобили

В своем историческом развитии электрические автомобили переживали и бурные подъёмы, и падения, и забвение на долгие годы. Можно выделить три периода в развитии гибридных и электрических автомобилей:

- первоначальный период с 1890 года по 1920;
- период застоя с 1920 года по 1990;
- современный период с 1990 года по настоящее время.

Первые попытки создания электрического автомобиля были отмечены в первой половине 19 века. Автомобили с двигателем внутреннего сгорания появились почти через 60 лет в 1895 году. Начальное бурное развитие автомобиля, отмеченное большим разнообразием конструкций, относится к концу 19 века. На рубеже 19 – 20 веков автомобили с привычными для нас двигателями внутреннего сгорания совсем не были доминирующими. Большая часть выпускаемых в то время автомобилей были оснащены электрическими или паровыми двигателями. В тоже время и появились первые гибридные автомобили. Тут, правда, хоть чуть-чуть необходимо определиться, что такое гибридный автомобиль. Гибридным называется автомобиль, использующий для своего движения несколько источников энергии (не менее двух). Следовательно, гибридный автомобиль может быть не только электрическим. В качестве второго источника энергии, в дополнение к ДВС, может использоваться сжатый воздух, гидроаккумуляторы и маховики. Но большая часть, выпущенных за всю историю гибридных автомобилей, в качестве второго источника энергии использовала электричество, накопленное в аккумуляторных батареях. В последнее время все автомобили, в которых используется не менее двух приводов, стали называть гибридными.

Практически ничего и нигде не создаётся одним человеком, любой изобретатель чаще всего использует наработки большого числа предшественников. Довольно часто автором какого-либо изобретения признаётся не человек, принёсший наибольший вклад в это изобретение, а человек, первый добежавший до патентного бюро. Первые гибридные автомобили появились приблизительно в одно и то же время в нескольких странах. Но многие признают, что одним из первых, кто изобрёл и, главное, сумел наладить массовое производство гибридных автомобилей, был великий немецкий конструктор Фердинанд Порше, сыгравший большую роль в общем развитии автомобилестроения. В 1898 году Порше создал автомобиль, в котором электрический генератор, преобразовывал механическую энергию, выработанную ДВС, в электрическую энергию. По проводам электрическая энергия поступала к тяговым электрическим двигателям (ТЭД), встроенным в ведущие колёса автомобиля. Такая конструкция называется мотор-колесо.

Многим известно, что Порше создал недорогой народный автомобиль Фольксваген Жук. Первоначально этот автомобиль назывался Фольксваген KDF. Много чего писалось об этом ярком человеке, но почему то мало

писалось, что Фердинанд Порше успел поработать в Советском Союзе в качестве конструктора авиационных двигателей. Но про его первый гибридный автомобиль не писалось практически ничего, да и названия «гибридный» еще не было.

О первом гибридном автомобиле стало известно из книги о создании самоходной пушки «Элефант» и танка «Тигр» времён второй мировой войны. Эти машины имели электрическую трансмиссию. То есть у этих военных машин отсутствовало сцепление, коробка передач и различные механизмы, передающие крутящий момент двигателя внутреннего сгорания на гусеницы. Вместо них двигатель внутреннего сгорания вращал генератор, который вырабатывал электрический ток. Электрический ток использовался для питания тяговых электрических двигателей, вращающих ведущие звёздочки гусениц. Там же упоминалось, что ещё в молодости Фердинанд Порше ездил на чудной тележке, трансмиссия которой была устроена аналогично. Когда вернулась мода на электрические и гибридные автомобили (довольно часто потребители действительно рассматривают электрический или гибридный автомобиль как моду, а не как техническую необходимость), многие вспомнили про первый гибридный автомобиль Фердинанда Порше.

Фердинанд Порше начал конструировать автомобили в 1896 году. Первой удачной попыткой Фердинанда стал автомобиль Лохнер-Порше с тяговыми электродвигателями, установленными непосредственно в два ведущих передних колеса (рис. 1).



Рис. 1

Этот автомобиль стал сенсацией на всемирной выставке в Париже в 1900 году. Но очень быстро Порше разработал новый технически улучшенный автомобиль. В каждое колесо этого спортивного автомобиля был вставлен отдельный электрический двигатель, поэтому новый автомобиль был заявлен как первый в мире полноприводный автомобиль. Каждое колесо этого автомобиля было оборудовано тормозами, что тоже было впервые на автомобилях того времени. Но самое большое новшество этого автомобиля, предложенное Фердинандом Порше, было не так заметно. В 1900 году Порше на автомобиль с электрическими тяговыми электродвигателями, получавшими электрическую энергию от аккумуляторной батареи, установил

**дополнительный двигатель внутреннего сгорания.** Так впервые был построен автомобиль, работающий по принципу **последовательного гибрида.**

Другой автомобиль Фердинанда Порше, названный «Вечно живой», был первым полным гибридным автомобилем в мире. На этом автомобиле два генератора, приводимые при помощи двух одинаковых двигателей внутреннего сгорания являлись единой зарядной станцией, поставляющий электрический ток как для работы всех мотор-колёс, так и для подзарядки блока аккумуляторных батарей. Осенью 1900 года Фердинанд Порше приступил к конструированию первого прототипа с бензоэлектрическим приводом. Предположительно основой этого автомобиля стал обычный электрический автомобиль, предназначенный для автомобильных гонок. В конечном результате Фердинанд Порше предложил комбинацию из электрических двигателей, встроенных в колёса автомобиля, с двумя двигателями внутреннего сгорания, не имеющих какой-либо механической связи с ведущими колёсами. Двигатели внутреннего сгорания просто являлись источниками механической энергии для генераторов, которые в свою очередь обеспечивали электрическим током тяговые электродвигатели и зарядку аккумуляторных батарей. Так произошло создание первого последовательного гибридного автомобиля. Этот автомобиль мог проехать значительное для того времени расстояние, используя энергию только аккумуляторной батареи и только после этого включались двигатели внутреннего сгорания зарядной станции.

Наибольшее развитие электрические и ранние гибридные автомобили получили в Соединённых Штатах. Электрические автомобили в то время имели явное преимущество по сравнению со своими конкурентами - автомобилями с паровым двигателем или автомобилями с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Они были чистыми, бесшумными, не имели того ужасного запаха, который был свойственен автомобилям с ДВС, у электрических автомобилей отсутствовала проблема с запуском двигателя. Первые автомобиль с двигателем внутреннего сгорания не только не имели электрического стартера для запуска двигателя, но часто даже не имели глушителя. Представьте как пугал грохот подобного автомобиля лошадей, на которых в то время осуществлялись все перевозки. В то время запуск двигателя внутреннего сгорания был довольно сложной, а иногда и опасной, процедурой, требующей определённых технических знаний, умений и просто цирковой ловкости. Не было автоматической регулировки угла опережения зажигания, эту регулировку водитель выполнял самостоятельно при помощи специального рычажка, установленного на рулевом колесе. При неправильной установке опережения зажигания во время запуска в двигателе возникали, так называемые обратные вспышки. Повернувшись в противоположном направлении заводная ручка двигателя часто ломала руки и наносила другие повреждения запускающему двигатель водителю. Особенно трудно было эксплуатировать автомобиль с ДВС женщинам. Недаром первый автомобиль в США, который купила женщина, был электрическим. Даже знаменитый автомобильный инженер и организатор автомобильного производства, массово выпускавший

автомобили с двигателями внутреннего сгорания Генри Форд подарил своей жене электрический автомобиль.

Бурное развитие автомобилей в 20 веке привело к тому, что автомобиль стал одной из основных причин загрязнения воздушной среды и выброса в атмосферу двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), чаще называемым углекислым газом. Углекислый газ относится к газам, получившим общее название парниковые газы. Скапливаясь в верхних слоях атмосферы парниковые газы, ограничивают рассеивание тепловой энергии земли в космическое пространство, что приводит к глобальному потеплению климата земли.

Абсолютное большинство современных автомобилей и других транспортных средств приводится в движение двигателем внутреннего сгорания, использующим в качестве топлива продукты переработки нефти. По мнению многих учёных количество ископаемой нефти на Земле ограничено. Кроме того развитые страны, большинство из которых не имеют значимых запасов нефти, попали в критическую нефтяную зависимость от нефтедобывающих стран. Общественное движение многих развитых стран, вставшее на защиту окружающей среды, заставило свои правительства принять законодательство, строго регламентирующее выброс автомобилями в атмосферу, как вредных веществ, так и углекислого газа. Выполнение строгих современных норм по охране окружающей среды потребовало поиск новых подходов к решению этой проблемы. Широкое распространение электрических и гибридных автомобилей, в настоящее время, рассматривается как один из основных способов решения экологических проблем на транспорте. Слова «электрокара» и «гибрид» стали в последнее время просто модными. Ведущие мировые производители автомобилей устроили соревнование в выпуске всё новых и новых моделей электрических и гибридных автомобилей, часто во вред своим экономическим целям.

Но электрические автомобили, кроме преимуществ, имели некоторые врождённые недостатки:

- более высокую стоимость по сравнению с подобными автомобилями с ДВС, по причине высокой стоимости аккумуляторных батарей;
- более низкую мощность по причине низкой отдаваемой мощности аккумуляторных батарей;
- очень ограниченный пробег между зарядками аккумуляторной батареи.
- длительное время, необходимое для зарядки аккумуляторной батареи.

Но конкурент - ДВС - не стоял на месте. Конструкция двигателей внутреннего сгорания постоянно улучшалась и автомобили с двигателями внутреннего сгорания стали повсеместно вытеснять автомобили с электрическими двигателями. Этому способствовало множество причин. В Техасе была найдена нефть, что сделало топливо для двигателей внутреннего сгорания доступней и дешевле. Появление на автомобилях электрического стартера во многом решило проблему запуска двигателя. Строительство большого количества отличных федеральных и локальных дорог, в пределах одного штата, потребовало наличия автомобилей, способных проехать без остановки большое расстояние, на что электрические автомобили были вообще

не способны. Массовое производство Генри Фордом автомобиля Форд модели «Т» сделало автомобиль доступным для широких слоёв населения. Именно после начала выпуска этого дешёвого автомобиля про Генри Форда стали говорить, что он человек, посадивший Америку на колёса. Покупателями дорогих электрических автомобилей стали только экзальтированные богачи. Производители подобных автомобилей не смогли выдержать конкуренции с дешёвыми автомобилями с ДВС и к концу 20-х годов выпуск электрических автомобилей практически прекратился. Правда, некоторые производители на заказ делали электрические автомобили до 40-х годов прошлого века.

Выше было отмечены некоторые причины, почему двигатель внутреннего сгорания на автомобиле победил электрический двигатель. Но основной причиной, наверное, надо назвать то, что в одном килограмме бензина содержится намного больше энергии, чем в одном килограмме веса аккумуляторной батареи.

Для электроавтомобилей наступил застой, который длился несколько десятилетий. Периодически некоторые производители пробовали возобновить выпуск электрических автомобилей в 50 – 60-х годах прошлого века, но широкого распространения эти автомобили не получили. В основном это были интересные технические игрушки, так и не ставшие массовыми автомобилями.

Некоторый толчок к развитию электрических автомобилей дал нефтяной кризис 1973 года, когда арабские нефтедобывающие страны наложили эмбарго на продажу нефти США, в результате чего цены на нефть резко поднялись. Некоторые производители стали разрабатывать новые электрические автомобили, но последовавшее вскоре снижение цен на нефть отбило желание у производителей экспериментировать с электрическими автомобилями. Всё вернулось на круги своя, и ДВС опять вышел победителем в конкурентной борьбе с электрическим автомобилем.

Но помощь электрическому двигателю на автомобиле пришла с другой стороны. Огромное количество автомобилей привело к заметному загрязнению воздушной среды. Законодатели многих стран стали вводить жёсткие ограничительные нормы на количество вредных веществ в эмиссии автомобиля. Особенно в этом вынужденно усердствовали власти штата Калифорния в США. Через очень короткое время эти жёсткие нормы правительство США сделало федеральными и обязательными для всей территории страны. Очень быстро подобные нормы стали приниматься и в развитых странах Европы, имеющих в то время высокий уровень автомобилизации. Производители автомобилей искали технические возможности удовлетворения принятых законодательно строгих экологических норм. Этому способствовало бурное развитие электроники в 70-х годах. В результате применения электронных систем управления двигателем внутреннего сгорания и катализаторов удалось резко повысить эффективность работы, снизить удельное потребление топлива и повысить экологические параметры автомобиля. К концу 80-х годов казалось, что многие экологические проблемы уже решены или будут решены в ближайшие годы. В выхлопных газах современных для того времени автомобилей остался только безвредный

углекислый газ и водяной пар, что в принципе соответствует идеально работающему двигателю внутреннего сгорания.

Но тут экологи решили, что наступило «глобальное потепление» и одной из главных причин этого явления стал углекислый газ, попадающий в атмосферу с выхлопными газами автомобилей. Законодательством многих стран были приняты строгие нормы, ограничивающие количество CO<sub>2</sub> на километр пробега автомобиля. Стало ясно, что путём традиционного улучшения работы ДВС резко снизить количество вырабатываемого автомобилями углекислого газа не получится. Вот тут и вспомнили про электрические и гибридные автомобили, ренессанс которых наступил с середины 90-х годов и длится по настоящее время. Правда, по настоящее время процент выпускаемых электрических и гибридных автомобилей остался очень незначительным, но шуму и разговоров вокруг них много.

## 2. Общее знакомство с гибридными и электрическими автомобилями

Для снижения вредного воздействия автомобиля на окружающую среду инженеры пошли несколькими путями:

1. Путем значительного улучшения процессов сгорания и повышения топливной экономичности традиционных двигателей внутреннего сгорания.
2. Путем широкого применения дизельных двигателей, имеющих более высокий коэффициент полезного действия.
3. Путем использования альтернативных топлив для улучшения работы традиционных двигателей внутреннего сгорания.
4. Путем использования различных гибридных и электрических автомобилей с накоплением энергии в аккумуляторных батареях.
5. Путем применения топливных элементов как источников энергии для электрических автомобилей.

Если ещё несколько лет назад для обеспечения высоких экологических требований больше внимания обращалось на применение альтернативных топлив – биодизель, сжатый и сжиженный природный газ, сжиженный водород, этанол, но в последнее время чаще говорится о различных гибридных и электрических автомобилях.

В настоящее время можно говорить о следующих типах гибридных и электрических автомобилей.

- 1 – Автомобили с электрической трансмиссией.
- 2 – Гибридные автомобили.
- 3 – Электрические автомобили.
- 4 – Электрические автомобили на топливных элементах.

## 3. Автомобили с электрической трансмиссией

Подобные автомобили имеют и двигатель внутреннего сгорания (ДВС), и тяговый электрический двигатель (ТЭД). В последнее время эти автомобили стали называть гибридными, а иногда и электрическими. Хотя строго идентифицировать различные типы автомобилей очень трудно по причине

отсутствия необходимого документа, называть эти автомобили гибридными и тем более электрическими не совсем верно.

Схема подобных автомобилей довольно проста. К двигателю внутреннего сгорания вместо сцепления и коробки переключения передач подсоединён генератор электрического тока. Вырабатываемый генератором ток через силовые электрические провода и приборы электрического управления (контроллер) поступает на тяговый электрический двигатель, вращающий ведущие колёса автомобиля. Причём, довольно часто на подобных автомобилях применяется несколько тяговых электродвигателей, встроенных непосредственно в ведущие колёса. Такая конструкция называется мотор-колесо.

Так почему не следует подобные автомобили (и другие транспортные средства) называть электрическими? Потому что на этих автомобилях единственным источником энергии является двигатель внутреннего сгорания, а, поскольку, энергия, вырабатываемая ДВС, не накапливается в какой либо системе аккумулирования энергии, всё электрическое оборудование является только элементами трансмиссии. Мощность ДВС согласована с мощностью генератора и тягового электродвигателя, ДВС полностью способен удовлетворить потребности тягового двигателя в электрической энергии.

Подобную схему имели:

- самоходная артиллерийская установка Фердинанд, конструктором который был известный конструктор автомобилей Фердинанд Порше;
- автобус ЗИС 154 с электрической трансмиссией, прототипом которого был американский автобус GMC серии TD с дизельным двигателем;
- автобус GMC серии TD;
- карьерный самосвал БЕЛАЗ с электрической трансмиссией;
- карьерный самосвал БЕЛАЗ с дизельным двигателем и электрической трансмиссией.

В этом случае электрический привод ведущих колёс просто заменяет некоторые элементы трансмиссии обычного автомобиля – сцепление, коробку перемены передач, карданный вал и главную передачу. В случае применения на автомобиле мотор-колёс из трансмиссии также исключается дифференциал и полуосевые валы привода ведущих колёс.

#### 4. Гибридные электрические автомобили *HEV – (Hybrid Electric Vehicle)*

##### 4.1. Что такое гибридный электрический автомобиль *HEV – (Hybrid Electric Vehicle)* – и гибридная силовая установка?

**Гибридным автомобилем** называют транспортное средство, приводимое в движение с помощью **гибридной силовой установки**. Гибридная силовая установка сочетает в себе современный **двигатель внутреннего сгорания**, технологически совмещенный с **электромоторами**. Весь комплекс управляется **электронной системой** и все компоненты отличаются высочайшим качеством.

Гибридная силовая установка управляет расходом энергии в зависимости от условий движения автомобиля. На рис. 2 представлен один из вариантов структурной схемы гибридной силовой установки автомобиля [2].

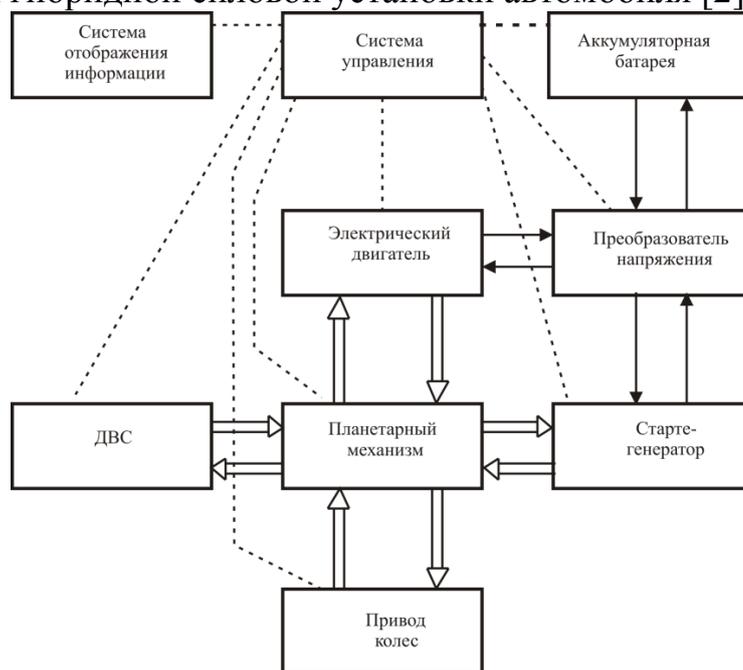


Рис. 2

Система управления связана со всеми компонентами гибридной силовой установки информационными и управляющими потоками. Информационные потоки передают системе управления информацию с датчиков о состоянии гибридной силовой установки и внешней среды. Управляющие потоки в соответствии с программой, занесенной в память компьютера, управляют работой исполнительных устройств, выбирая оптимальный режим для каждого устройства.

Отличительной особенностью гибридной силовой установки является использование двух и более источников энергии и соответствующих им двигателей, преобразующих энергию в механическую работу. Несмотря на многообразие источников энергии (тепловая энергия бензина или дизельного топлива, электроэнергия, энергия сжатого воздуха, энергия сжатого сжиженного газа, солнечная энергия, энергия ветра и др.) в промышленном масштабе на гибридных автомобилях используется комбинация двигателя внутреннего сгорания и электродвигателя.

Главное преимущество гибридного автомобиля заключается в существенном сокращении расхода топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу, которое достигается:

- за счет согласованной работы ДВС и электродвигателя;
- применением аккумуляторов большой емкости;
- использованием энергии торможения, т. е. рекуперативного торможения, преобразующего кинетическую энергию движения в электроэнергию.

Зарядка высоковольтной аккумуляторной батареи осуществляется в режимах работы двигателя на частичных нагрузках, когда мощность, развиваемая ДВС выше мощности, необходимой для движения автомобиля, в соответствии с требованиями водителя и дорожных условий. В этом случае излишняя мощность ДВС, которая в данный момент не требуется для движения автомобиля, преобразуется в электрическую энергию и накапливается в аккумуляторной батарее.

Такая трансмиссия позволяет устанавливать на автомобиль ДВС меньшей мощности и, следовательно, меньших габаритов. При этом обеспечивается работа двигателя внутреннего сгорания в наиболее благоприятном для него режиме работы. При конструировании автомобиля учитывается много различных технических требований. В частности, это максимальное ускорение, максимальная скорость и максимальная нагрузка. При этом всегда обязательными являются требования по экологической безопасности и топливной экономичности автомобиля. Мощность устанавливаемого на автомобиль ДВС определяется из необходимости обеспечения проектного максимального ускорения при полной нагрузке автомобиля. Но на этом режиме автомобиль движется очень незначительное время, а при движении на частичных нагрузках, на которых работает автомобиль большую часть времени, мощность двигателя используется только частично, следовательно, мощность установленного на автомобиль ДВС чаще всего избыточна, что снижает экономические и экологические показатели автомобиля. К тому же более мощный двигатель внутреннего сгорания имеет больший вес, на перемещение которого требуется дополнительная энергия, что потребует сжигания большего количества топлива.

На автомобилях с гибридной силовой установкой для движения с частичной нагрузкой вполне хватает ДВС с меньшей мощностью и, следовательно, уменьшенного размера. При этом часть мощности даже этого уменьшенного ДВС используется для зарядки высоковольтной тяговой аккумуляторной батареи. Но когда возникает ситуация, при которой мощности уменьшенного ДВС автомобиля не хватает для обеспечения требуемого ускорения или скорости, электронная система управления мощностью, в помощь ДВС, подключает тяговый электрический двигатель. Совместная работа двух двигателей обеспечивает необходимые динамические характеристики автомобиля.

Топливная экономичность и экологичность двигателя внутреннего сгорания очень зависит от режима работы двигателя, то есть от нагрузки и скорости вращения. Электрическая часть трансмиссии гибридного автомобиля позволяет ДВС чаще работать на наиболее экономичных режимах. Это уменьшает выброс в атмосферу вредных веществ при одновременном снижении выхлопа углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), вызывающего парниковый эффект и улучшение топливной экономичности автомобиля.

Гибридные автомобили оборудованы системой рекуперации тормозной энергии. При торможении обычного автомобиля тормозная система преобразует кинетическую энергию движущегося автомобиля в тепловую и

рассеивает эту энергию в окружающее пространство. При рекуперативном торможении тяговый электродвигатель (электродвигатели) переключается в режим генератора. Электрическая энергия, вырабатываемая мотор-генератором во время торможения, используется для дополнительной подзарядки тяговой высоковольтной аккумуляторной батареи.

По своей конструкции гибридные силовые установки автомобилей подразделяются на:

- установки с последовательной схемой трансмиссии;
- установки с параллельной схемой трансмиссии;
- установки с последовательно - параллельной схемой трансмиссии;
- гибридные автомобили с возможностью подзарядки аккумуляторной батареи от постороннего источника электрической энергии.

#### 4.2. Гибридные силовые установки с последовательной схемой трансмиссии

Последовательные гибридные автомобили имеют как двигатель внутреннего сгорания, так и электрический двигатель. В этой схеме (рис. 3) двигатель внутреннего сгорания механически не связан с ведущими колёсами автомобиля.

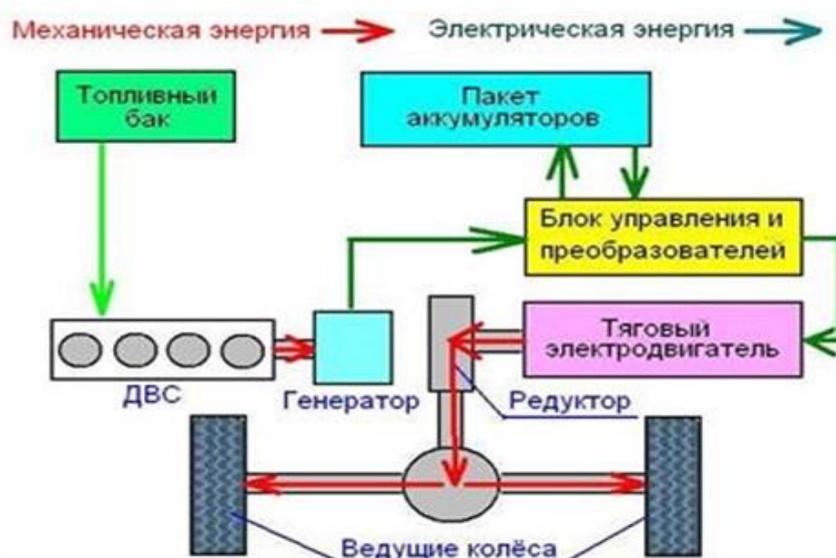


Рис. 3

Двигатель внутреннего сгорания приводит в действие только генератор, а тяговый электрический мотор (или моторы) получают электрическую энергию, вырабатываемую генератором. Тут может возникнуть вопрос, а чем этот автомобиль отличается от автомобиля с электрической трансмиссией? Дело в том, что гибридный автомобиль имеет блок аккумуляторных батарей большой ёмкости, позволяющей автомобилю на некоторых режимах двигаться при неработающем двигателе внутреннего сгорания. А при больших нагрузках энергия, накопленная в аккумуляторной батарее, поступает на тяговый электрический двигатель совместно с электрической энергией, вырабатываемой

в данное время генератором, что позволяет устанавливать на автомобиль двигатель внутреннего сгорания и генератор уменьшенной мощности и, соответственно, уменьшенного веса.

В таком автомобиле ДВС остался единственным источником энергии. В установившихся режимах движения автомобиля, когда мощность, потребляемая тяговым электродвигателем, ниже мощности, вырабатываемой генератором, излишняя электрическая энергия через элементы электрического управления, поступает в аккумуляторную батарею. На режимах частичной нагрузки, на которых автомобиль эксплуатируется большую часть времени, электрический двигатель работает на электрической энергии, поступающей от генератора. В режимах энергичного ускорения или других высоких нагрузок этой электрической мощности может быть недостаточно. В этом случае недостающая энергия берётся от аккумуляторной батареи. Кроме этого, во время торможения тяговый двигатель начинает работать в режиме генератора и вырабатываемая им электрическая энергия так же накапливается в аккумуляторной батарее. Наличие мощной аккумуляторной батареи позволяет уменьшить двигатель внутреннего сгорания. Этот двигатель может работать в наиболее приемлемых для него режимах работы, не зависимо от скорости движения и нагрузки автомобиля. Это значительно улучшает топливную экономичность и уменьшает эмиссию двигателя. При этом ДВС имеет значительно меньший вес и более простую конструкцию, поскольку двигатель работает практически как стационарный. Это позволяет не оборудовать двигатель различными системами, которые обеспечивают работу двигателя на различных режимах работы. Таким образом, к основным достоинствам последовательной схемы гибридной силовой установки относится снижение потребления топлива и токсичности выхлопных газов. К основному недостатку такой схемы можно отнести двойное преобразование энергии: механическая энергия ДВС – электрическая энергия генератора – механическая энергия тягового электродвигателя.

По своим тяговым характеристикам электрический двигатель значительно отличается от двигателя внутреннего сгорания. Двигатель внутреннего сгорания развивает максимальную мощность и максимальный крутящий момент только на высоких оборотах, а электрический двигатель развивает максимальный крутящий момент в самом начале вращения, кроме этого у электромотора отсутствует необходимость в холостом ходе. Электрический двигатель может вращаться в противоположном направлении. Это позволяет исключить из конструкции автомобиля сцепление и коробку передач, а при использовании не одного электродвигателя, а нескольких мотор-колёс, пропадает необходимость в использовании дифференциала. Отсутствие этих агрегатов значительно упрощает конструкцию автомобиля и уменьшает его вес, что частично компенсирует большой вес аккумуляторной батареи.

Современные аккумуляторные батареи обладают увеличенной удельной ёмкостью, то есть количеством сохранённой энергии в каждом килограмме веса (или объёма) аккумулятора, что позволило увеличить общую ёмкость аккумуляторной батареи. При этом значительно увеличился пробег, который

способен выполнить автомобиль, работая только на электрической тяге. Увеличение этого пробега привело к тому, что он превысил средний суточный пробег среднего водителя, и у инженеров появилась возможность создать автомобиль, аккумулятор которого заряжается от постороннего источника электрической энергии. Аккумулятор может подзаряжаться без использования ДВС автомобиля во время стоянки от простой электрической розетки городской сети или ускоренно заряжаться от специальной зарядной станции. Гибридный автомобиль, зарядку которого можно осуществлять от постороннего источника электрической энергии, имеет обозначение PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) – гибридный электрический автомобиль с возможностью зарядки от постороннего источника. Примером такого автомобиля является Chevrolet Volt и Toyota Prius нового поколения.

Дальнейшее увеличение удельной ёмкости аккумуляторных батарей и значительное снижение их стоимости привело к тому, что движение автомобиля за счёт энергии, запасённой в аккумуляторной батарее, стало основным. Для привода генератора, необходимого для подзарядки аккумуляторных батарей, что требуется для увеличения общего пробега автомобиля, когда зарядки аккумулятора недостаточно для дальних поездок на автомобиль, стали ставить не стандартный автомобильный двигатель, а упрощённый и облегченный двигатель внутреннего сгорания. Такие двигатели называются «Range Extender», а гибридный автомобиль с подобным двигателем получил наименование REEV (Range Extender Electric Vehicle).

#### 4.3. Гибридные силовые установки с параллельной схемой

Параллельная схема имеет двигатель внутреннего сгорания и тяговый электрический двигатель. Причем оба двигателя имеют непосредственную механическую связь с ведущими колёсами автомобиля. Здесь ДВС и тяговый электрический двигатель, получающий энергию от аккумуляторной батареи, передают суммарный момент ведущим колесам. Возможен вариант параллельной схемы, когда электрическая машина включается в привод иного ведущего моста, чем ведущий мост трансмиссии ДВС. Например, при переднеприводной схеме трансмиссии ДВС тяговый электрический двигатель включается в привод заднего моста. Параллельная схема гибридной силовой установки приведена на рис. 4.

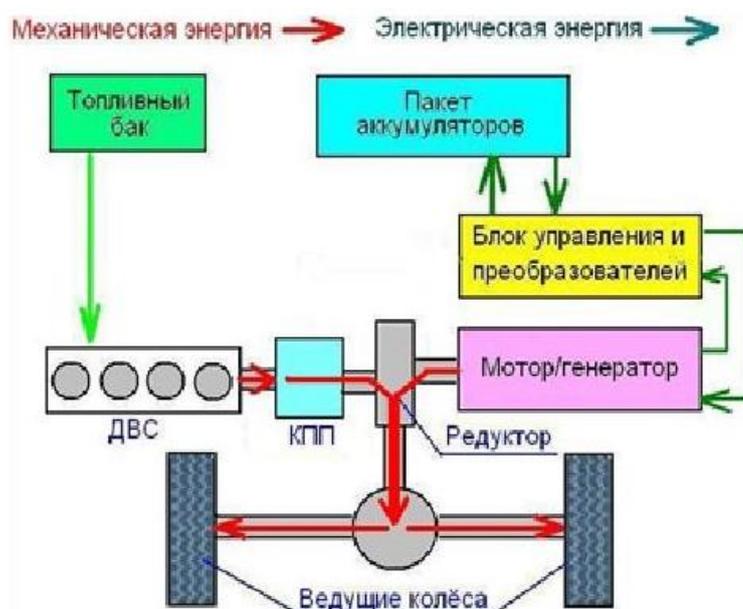


Рис. 4

Параллельный гибридный автомобиль на основных режимах получает механическую энергию от двигателя внутреннего сгорания, но, когда мощности ДВС недостаточно, одновременно подключается тяговый электрический двигатель. Параллельный гибридный автомобиль обычно не имеет режима движения только при помощи электрического двигателя. Но в последнее время некоторые подобные автомобили, с аккумуляторной батареей с увеличенной ёмкостью и с электрическим двигателем увеличенной мощности имеют возможность движения только при помощи электрического двигателя.

В параллельной схеме электродвигатель и двигатель внутреннего сгорания устанавливаются таким образом, что могут работать как самостоятельно, так и совместно. Это достигается путем соединения ДВС, электродвигателя и коробки передач с помощью автоматически управляемых муфт (рис. 4).

Обычно такие автомобили имеют один электродвигатель. Часто электрический двигатель устанавливается вместо маховика двигателя внутреннего сгорания, в этом случае электродвигатель является маховиком ДВС, мотор-генератором и стартером. Как стартер мотор-генератор используется при движении автомобиля в режиме «старт-стоп». Кроме этого, при наличии автоматической муфты или муфты свободного хода, установленной между мотор-генератором и ДВС, мотор-генератор используется для подзарядки аккумуляторов в режиме рекуперативного торможения. Параллельные гибридные автомобили имеют по сравнению с последовательными гибридными автомобилями, аккумуляторную батарею значительно меньшей ёмкости, что позволяет значительно снизить вес автомобиля, поскольку аккумуляторные батареи обладают большим весом, и снизить общую первоначальную стоимость автомобиля, поскольку современные аккумуляторные батареи имеют высокую стоимость.

Схема имеет относительно высокий КПД и хорошие массогабаритные показатели, относительно недорого (применяется электрооборудование только

на часть полной мощности). Недостатком схемы является сложность механического согласования работы ДВС и электропривода, ограничения в компоновке, необходимость применения устройств механического согласования (коробок передач специальной конструкции). Правда, от согласования работы ДВС и электропривода можно уйти, обеспечив передачу ими момента на разные оси (колеса), однако, такой прием не всегда приемлем по условиям размещения тягового оборудования и баланса масс транспортного средства. Также существенным недостатком схемы является нестабильность работы ДВС, соответственно ухудшение показателей выбросов по сравнению с последовательной схемой.

Применение параллельной схемы оправдано для транспортных средств, работающих на маршрутах со средней и более низкой интенсивностью движения (по сравнению с последовательной схемой) для обеспечения экономии топлива при торможениях, спусках, поворотах и т.п. Параллельная схема, очевидно, применима только с двигателями с вращающимся валом (ДВС) и не подходит для альтернативных источников энергии. Наиболее массовым и самым типичным автомобилем подобного типа является Honda Insight.

#### 4.4. Последовательно-параллельная гибридная силовая установка (Full Hybrid)

Последовательно-параллельная схема трансмиссии объединяет последовательную гибридную технологию с параллельной технологией для сохранения преимуществ обеих схем. Схема последовательно-параллельной схемы гибридной силовой установки показана на рис. 5.

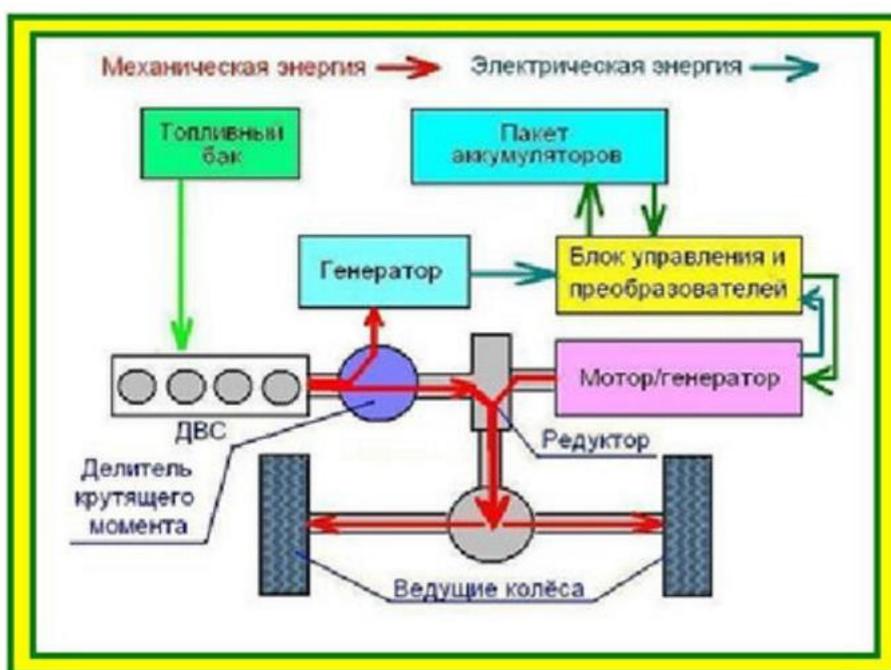


Рис. 5

Гибридная силовая установка с разделяемым потоком мощности или *последовательно-параллельный гибрид* в зависимости от условий движения автомобиля может работать или как последовательная или как параллельная силовая установка. Подобный автомобиль обычно называется «полный гибрид» (Full Hybrid).

Трансмиссия такого автомобиля имеет устройство, называемое делителем мощности (или планетарным механизмом), которое делит мощность, направляемую от двигателя внутреннего сгорания к ведущим колёсам автомобиля, на два потока. Основная часть потока мощности идёт по механической ветке, а оставшаяся часть по электрической ветке.

Предназначение этого устройства - разделение потока мощности ДВС в соответствии с требованиями водителя к необходимой для движения автомобиля мощности, подводимой к ведущим колёсам, в соответствии с условиями движения автомобиля. Двигатель внутреннего сгорания имеет минимальный крутящий момент на низких оборотах двигателя. Поэтому для обеспечения приемлемого ускорения автомобиля при трогании с места возникает необходимость установки на автомобиль ДВС, обладающего мощностью, которая значительно превышает мощность, необходимую при установившемся постоянном движении (режим частичных нагрузок). Это вызывает снижение топливной экономичности и ухудшает токсичность автомобиля. А электрический двигатель наоборот обладает максимальным крутящим моментом, когда ротор двигателя находится в состоянии покоя, что, несомненно, может помочь двигателю внутреннего сгорания на низких оборотах. Для совместного использования с делителем мощности можно использовать двигатель внутреннего сгорания меньшей мощностью с невысокой гибкостью, но с более высокой эффективностью.

В гибридных автомобилях вместо двигателей внутреннего сгорания, работающих по циклу Отто, часто устанавливают ДВС, работающие по циклу Аткинсона. Эти двигатели обладают меньшей удельной мощностью и низким крутящим моментом, но обладают более высокой эффективностью по сравнению с двигателями, работающими по циклу Отто.

По такой схеме построен самый продаваемый гибридный автомобиль в мире **Toyota Prius**. Используя эту схему как основу и модернизировав её, многие автомобильные фирмы, включая саму Тойоту, разработали более сложные и многофункциональные и эффективные системы.

#### 4.5. Гибридные автомобили последовательно-параллельной схемы с возможностью подзарядки аккумуляторной батареи от постороннего источника электрической энергии *PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)*

В ранее рассмотренных автомобилях использовался только один источник энергии – двигатель внутреннего сгорания, установленный непосредственно на автомобиль. В гибридном автомобиле с возможностью подзарядки аккумуляторной батареи от постороннего источника электрической энергии (**PHEV**) используется два источника энергии – двигатель внутреннего сгорания и городская электрическая сеть.

При конструировании автомобилей всегда учитывается множество технических параметров. Причём почти всегда улучшение одного параметра приводит к ухудшению одного или нескольких других параметров автомобиля. На первый взгляд кажется, что увеличение ёмкости высоковольтной батареи приведёт к улучшению потребительских качеств гибридного автомобиля. Но аккумуляторные батареи имеют большой вес и высокую стоимость. Необоснованное увеличение ёмкости аккумуляторной батареи приведёт к увеличению веса автомобиля и, следовательно, к ухудшению его динамических качеств и к значительному увеличению стоимости автомобиля. А поскольку стоимость гибридного автомобиля и так выше стоимости подобного по классу автомобиля с ДВС, автомобиль не будет продаваться.

Увеличивающееся производство гибридных автомобилей привело к бурному развитию технологий производства высоковольтных тяговых аккумуляторных батарей. Новые батареи имеют меньший удельный вес, меньшие удельные габаритные показатели и, главное, новые батареи имеют более низкую удельную стоимость. Поэтому на новых гибридных автомобилях ёмкость устанавливаемых аккумуляторных батарей значительно увеличилась. Это привело к резкому увеличению пробега автомобиля при использовании только электрической тяги. Если первые гибридные автомобили могли на электрической тяге проехать только несколько (от 2-х до 5-ти километров), то впоследствии этот показатель стал превышать 60 км.

Статистические подсчёты показали, что большая часть пользователей автомобилей в США за день не проезжают более 50 км. Отсюда появилось желание производить зарядку аккумуляторной батареи не от генератора автомобиля, приводимого ДВС, а от постороннего источника электрической энергии. Разумеется, лучше всего использовать для этих целей домашнюю электрическую сеть и заряжать аккумуляторную батарею ночью, поскольку во многих странах ночные тарифы на электричество значительно ниже дневных. Это не исключает возможность подзарядки аккумуляторной батареи в условиях специальных зарядных станций. В том числе и с ускоренными способами зарядки. За последние 2 – 3 года производство подобных автомобилей начали все основные мировые производители.

В США появилось несколько небольших частных фирм, выпускающих специальные модернизационные комплекты (дополнительный блок батарей, зарядное устройство и дополнительный электронный блок управления), позволяющий производить подзарядку аккумуляторных батарей от домашней сети самого распространённого гибридного автомобиля (HEV) Toyota Prius предыдущих моделей. На последнюю модель Toyota Prius подобное оборудование устанавливается непосредственно на заводе. Следовательно, Toyota Prius из HEV превратилась в автомобиль PHEV. Многие эксперты указывают, что именно PHEV получат широкое распространение в ближайшие годы. Многие источники указывают, что первым серийным гибридным автомобилем с возможностью подзарядки аккумуляторных батарей от внешнего источника электрической энергии (PHEV) был автомобиль

китайского производителя BYD Auto, модели F3DM, выпуск которого был начат в 2008 году.

Режим совместной работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и тягового электрического двигателя зависит от режима движения автомобиля. Пользователи, имеющие короткий суточный пробег, вообще могут использовать автомобиль только на электрической тяге, сведя при этом потребление бензина к нулю. Двигатель внутреннего сгорания автоматически включается, если запас энергии аккумуляторной батареи опустится ниже установленного предела или если для обеспечения необходимых динамических параметров автомобиля мощности электрического двигателя не достаточно. При совместной работе электрического двигателя и ДВС пробег автомобиля может быть более 500 км.

Для гибридного автомобиля важен показатель, указывающий, какое расстояние может проехать автомобиль при использовании только электрического мотора. Этот показатель имеет вид – PHEV\*\*, где \*\* указывают расстояние, которое может проехать гибридный автомобиль только на одной электрической тяге, например:

*PHEV10, PHEV20, PHEV30.* При этом расстояние указывается в милях. Но этот показатель можно отобразить и в километрах, например:

*PHEV 16 km, PHEV32 km, PHEV48 km.*

## 5. Электрические автомобили (EV)

Дальнейшее развитие аккумуляторных батарей дало возможность конструкторам создать чисто электрические автомобили. В этих автомобилях двигатель внутреннего сгорания отсутствует, а автомобиль движется только за счёт электрической энергии, накопленной аккумуляторной батареей от внешнего источника электрической энергии. Емкость современных аккумуляторных батарей в некоторых случаях обеспечивает пробег автомобиля между зарядками аккумуляторной батареи от 150 до 200 километров. Правда, это возможно только при движении в тёплое время года, когда не требуется включения климатической установки автомобиля в режиме кондиционера или в режиме отопителя. Работа климатической установки автомобиля на полную мощность может уменьшить пробег автомобиля всего до 70 километров.

Наиболее ярким представителем современного электрического автомобиля можно считать автомобиль Nissan Leaf.

## 6. Электрические автомобили на топливных элементах

В настоящее время считается перспективным использование в качестве источника электрической энергии для движения электрического автомобиля не аккумуляторной батареи, а топливных элементов. Топливные элементы это устройство, преобразующие химическую энергию непосредственно в электрическую. Чаще всего в химических реакциях, происходящих в топливных элементах, используется водород и кислород. При этом

используется кислород, содержащийся в окружающем воздухе и водород, хранящийся под высоким давлением или в жидкой форме на борту автомобиля. Соответственно, по причине отсутствия аккумуляторной батареи, пропадает необходимость в зарядке от постороннего источника электрической энергии. Правда возникают проблемы по заправке автомобиля водородом и безопасным способом его хранения в сжатом или жидком состоянии.

Из-за высокой стоимости топливных элементов и других технических проблем электрические автомобили с топливными элементами выпускаются только в экспериментальном порядке и в промышленном масштабе не выпускаются. Топливные элементы широко используются как источник электрической энергии в космической и других отраслях, где стоимость играет меньшее значение, чем в производстве массового автомобиля.

## 7. Гибридная силовая установка автомобиля Toyota Prius

Рассмотрим основные особенности устройства и работы последовательно-параллельной гибридной силовой установки (*Full Hybrid*) на примере силовой установки самого массового гибридного автомобиля в мире **Toyota Prius**. Концепт-кар «Toyota Prius» впервые демонстрировался на международной автомобильной выставке во Франкфурте в сентябре 1995 года. Серийное производство автомобиля Prius корпорация Toyota начала в 1997 году. По количеству проданных единиц Prius является самым массовым гибридным автомобилем в мире.

### 7.1. Основные особенности трансмиссии

Для автомобиля Prius корпорация Toyota разработала очень оригинальную трансмиссию. Первоначально на автомобилях Prius устанавливалась гибридная силовая установка первого поколения – THS (Toyota Hybrid System). Силовая установка второго поколения THS II впервые появилась на модернизированном автомобиле Prius 2004 модельного года. Но вскоре эта гибридная силовая установка стала устанавливаться не только на автомобили марки Toyota. Она получила новое название HSD (Hybrid Synergy Drive). Все годы выпуска автомобиля Prius гибридная силовая установка постоянно совершенствовалась, но основные принципы работы и конструкция остались неизменными.

В схеме трансмиссии автомобиля Prius коробка переключения передач в её обычном понимании отсутствует. Есть только одноступенчатый механический редуктор, скорее выполняющий задачи главной передачи, а не коробки передач.

Вместо обычной трансмиссии корпорация Toyota для автомобиля Prius разработала электромеханическую трансмиссию, основными деталями которой являются механический делитель мощности и две электрических электромашин (мотор-генераторы).

На рис. 6 показана общая схема гибридной силовой установки HSD.

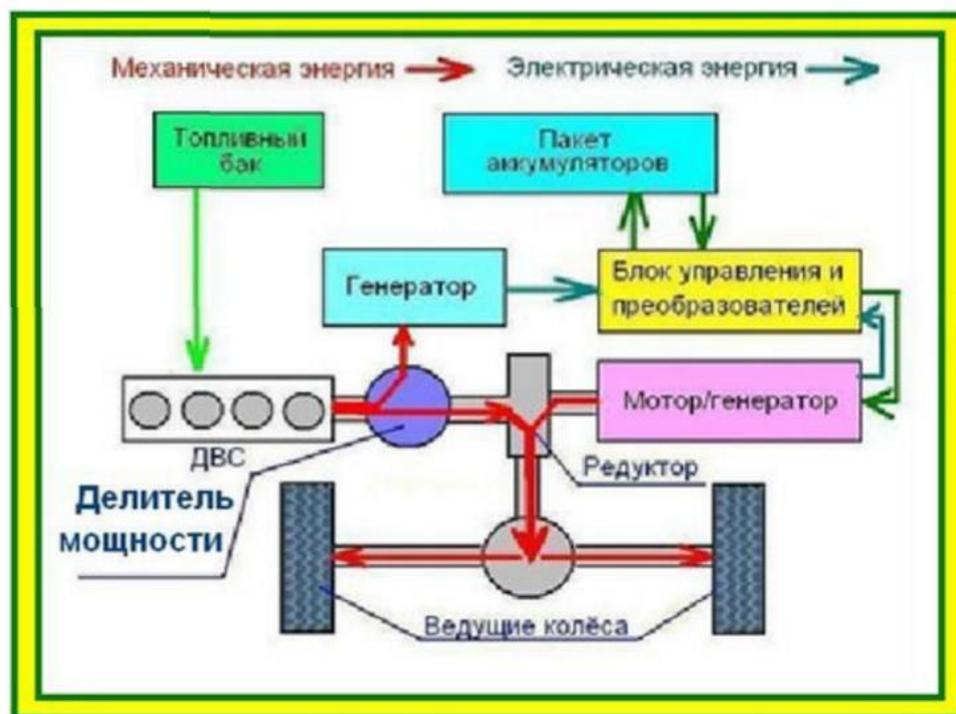


Рис. 6

Трансмиссия автомобиля Prius выполняет одну из функций бесступенчатой трансмиссии, но не выполняет другую. Скорость вращения двигателя может быть выбрана из условий обеспечения требуемой мощности, но при этом не ограничивается увеличением оборотов двигателя для поддержки необходимой топливной экономичности. Скорость вращения двигателя (на слух) не изменяется по мере увеличения скорости автомобиля, как будто Prius имеет бесступенчатую коробку передач. Но скорость вращения двигателя, в отличие от автомобиля с вариатором, изменяется в зависимости от требуемой водителем мощности. Другими словами, в зависимости от того, как сильно водитель нажал на педаль акселератора. Необходимо отметить, что трансмиссия автомобиля Prius не увеличивает крутящий момент двигателя при низкой скорости движения автомобиля, поскольку трансмиссия Prius имеет всего одну фиксированную передачу, то есть только одно фиксированное передаточное соотношение. Это единственное передаточное соотношение соответствует передаточному отношению высшей передачи в обычной коробке переключения передач. В подобных условиях двигатель внутреннего сгорания работать не может. Это могло бы быть непреодолимым препятствием, если бы на автомобиле в дополнение к бензиновому двигателю не был установлен электрический двигатель. Поскольку электрический двигатель имеет максимальный крутящий момент при самых низких оборотах, его включение в начале движения автомобиля обеспечивает начальное ускорение автомобиля как при включении первой передачи. Вот тут и выясняется отличие трансмиссии CVT от трансмиссии ECVT. Трансмиссия CVT для обеспечения согласования работы двигателя с дорожными условиями при помощи вариатора постоянно изменяет передаточное соотношение. **Трансмиссия ECVT (не имеющая возможности изменения передаточного соотношения) при**

**изменении дорожных условий перераспределяет нагрузку между электрическим двигателем и двигателем внутреннего сгорания. Это позволяет эффективно использовать отличающиеся друг от друга технические характеристики электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания.**

Технические характеристики электродвигателя и двигателя внутреннего сгорания сильно отличаются. Электрический двигатель имеет максимальный крутящий момент при очень низких, даже нулевых оборотах, в то время как ДВС обладает большим крутящим моментом и мощностью только на высоких почти максимальных оборотах. Задача электронной системы управления ECVT правильно распределить нагрузку между электрическим двигателем и двигателем внутреннего сгорания.

Основным компонентом трансмиссии автомобиля Prius является планетарный механизм, который Toyota использует как делитель мощности "Power Split Device" (PSD).

## 7.2. Делитель мощности (Power Split Device (PSD))

На рис. 7 представлена фотография планетарного механизма автомобиля Prius, на рис. 8 – схема механизма. На рис. 7 обозначено:

1. Наружная шестерня планетарного механизма.
2. Ведущая шестерня одноступенчатого редуктора.
3. Сателлитная шестерня.
4. Водило сателлитных шестерней.
5. Солнечная шестерня.

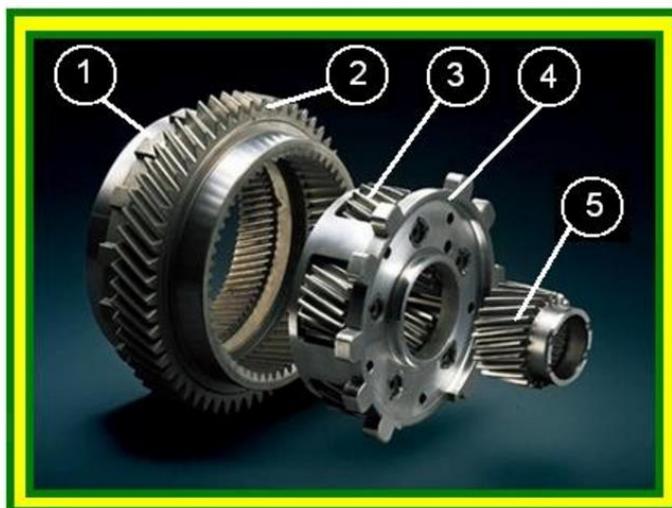


Рис. 7

Планетарный механизм, иногда называемый планетарным рядом, в автомобилестроении устройство очень распространённое. В любую автоматическую коробку передач встроено несколько планетарных механизмов. Планетарный механизм состоит из следующих основных элементов: (рис. 8):

1. Солнечная шестерня
2. Сателлитная шестерня

3. Наружная (кольцевая) шестерня
4. Водило сателитных шестерней
- 5.

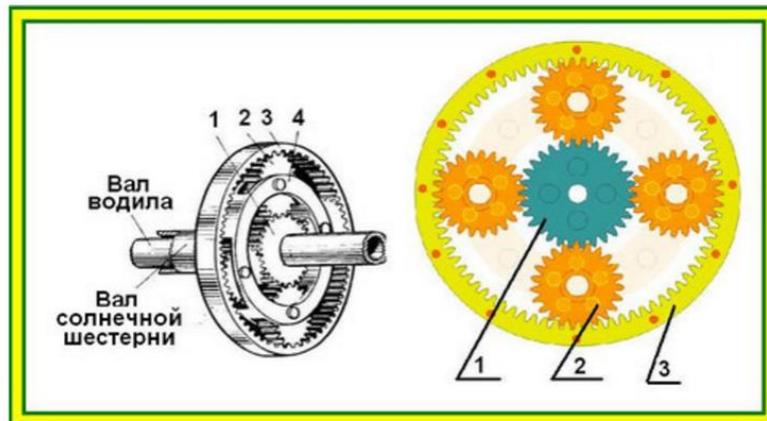


Рис. 8

Этот механизм называется планетарным, поскольку имеет несколько расположенных по кругу (сателитных) шестерней, вращающихся вокруг центральной шестерни, называемой солнечной. Сателитные шестерни свободно вращаются на осях, закреплённых на водиле сателитных шестерней, которое также вращается вокруг общей оси планетарного механизма, вокруг которой вращается и солнечная шестерня. Все сателитные шестерни имеют одинаковые размеры и расположены на одинаковом расстоянии от общей оси вращения всего механизма. Вокруг сателитных шестерней расположена наружная кольцевая (коронная) шестерня, которая при помощи внутренних зубцов находится в зацеплении со всеми сателитными шестернями. Она также вращается, как и все детали планетарного механизма, вокруг общей оси вращения.

### 7.3. Кинематическая схема трансмиссии

На рис. 9 представлена кинематическая схема механической части трансмиссии Prius, где обозначено:

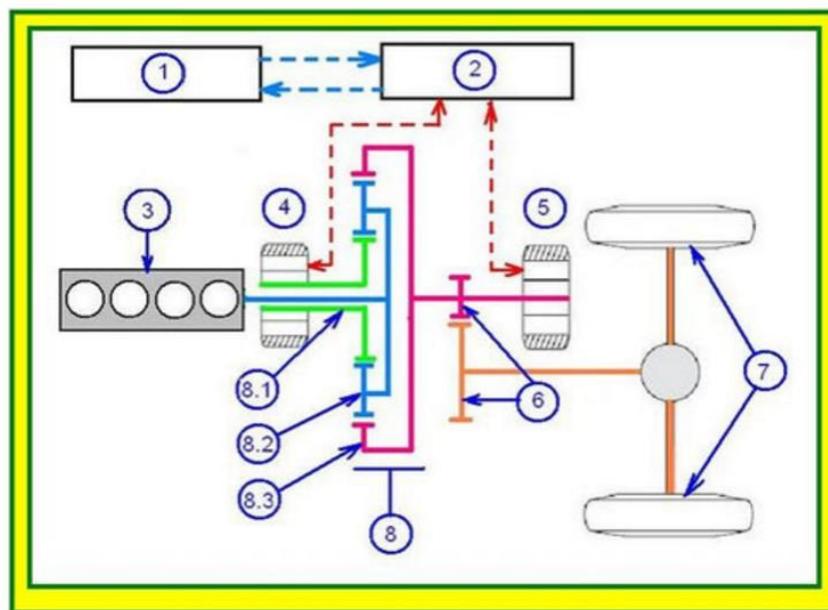


Рис. 9

1. Высоковольтная аккумуляторная батарея
2. Силовой электронный блок
3. Двигатель внутреннего сгорания
4. Мотор-генератор MG1
5. Мотор-генератор MG2
6. Одноступенчатый редуктор (главная передача)
7. Ведущие колёса автомобиля
8. Делитель мощности (планетарный механизм)
  - 8.1. Солнечная шестерня
  - 8.2. Водило с сателитными
  - 8.3. Наружная шестерня

Коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания Prius соединён с водилом планетарного механизма. Сателитные шестерни имеют зацепление с солнечной шестернёй со стороны центра механизма и с кольцевой шестернёй с наружной стороны сателитных шестерней. Поэтому при вращении водила сателитные шестерни стараются повернуть и солнечную и наружную кольцевую шестерни в сторону вращения водила.

Благодаря точному подбору размеров солнечной и наружной кольцевой шестерней (точнее количества их зубьев) 72% крутящего момента передаётся на наружную шестерню (к ведущим колёсам), а оставшиеся 28% крутящего момента передаётся на солнечную шестерню (к мотор-генератору MG1). Необходимо обратить внимание, что не мощности, а крутящего момента.

Визуально это представить достаточно тяжело, но можно воспользоваться условной моделью, используя для наглядности прямой брус длиной 3,6 метра. Каждый конец этого бруса необходимо установить на отдельные напольные ваннные весы и встать на расстоянии 2,6 метра от одного конца бруса. При этом ближние весы покажут вес 72% вашего веса ( $2,6 / 3,6 * 100 = 72$ ), а дальние весы отобразят 28% вашего веса ( $1,0 / 3,6 * 100 = 28$ ).

Приблизительно также распределяет *крутящий момент* между солнечной и наружной шестернями планетарный механизм.

Получающая большую часть крутящего момента наружная шестерня через одноступенчатый понижающий редуктор соединена с дифференциалом, а через него с ведущими колёсами автомобиля. Таким способом двигатель внутреннего сгорания приводит в движение автомобиль. Солнечная шестерня, получающая меньшую часть крутящего момента, соединена с мотор-генератором **MG1**.

Давайте на некоторое время забудем, что MG1 может работать как электродвигатель и представим, что он работает только как генератор. Двигатель внутреннего сгорания, вращая водило планетарного механизма, передаёт крутящий момент на солнечную шестерню, которая приводит во вращения генератор MG1. Компьютер, регулируя электрическую нагрузку на генератор MG1, за счёт увеличения сопротивления вращению генератора регулирует частоту вращения генератора и, следовательно, мощность, поступающую от ДВС к генератору и к ведущим колёсам, при этом 72% крутящего момента тратится на движение автомобиля, а 28% тратится на вращение генератора MG1. Необходимо понять, что и солнечная и наружная шестерни вращаются под воздействием фиксированной части крутящего момента, генерируемого двигателем внутреннего сгорания, но при этом они могут вращаться с различной скоростью.

Несмотря на то, что между скоростью вращения обеих указанных шестерней и скоростью вращения ДВС существует фиксированная математическая зависимость, одна из этих шестерней может увеличить, а другая, соответственно, уменьшить скорость своего вращения без изменения скорости вращения ДВС.

Давайте для наглядности опять вернёмся к брусу, длиной 3,6 метра. Снимите брус с напольных весов и попросите двух друзей удерживать брус, каждого со стороны одного конца. Толкните брус на расстоянии 2,6 метра от одного из концов. Одному из друзей придётся удерживать 72% вашего усилия, в то время как второй друг воспримет на себя только 28% приложенного к брусу усилия. Но если вы приложите к брусу усилие, которому ваши друзья не будут в состоянии противодействовать, один или оба из них отодвинутся назад, позволяя вам продвинуться вперёд. Каждый из друзей будет перемещаться назад со своей скоростью, совершенно независимо от скорости перемещения второго. Например, один из них вообще может остаться на месте, в то время как другой один выполнит всё перемещение.

Из-за небольшой длины бруса визуальное представление этого взаимного перемещения на больших расстояниях достаточно затруднительно, но планетарный механизм, не имея никаких ограничений, работает именно по этому принципу. Если наружная кольцевая шестерня останется в неподвижном состоянии, солнечная шестерня полностью реализует вращение водила сателлитных шестерней, при этом скорость вращения солнечной шестерни значительно увеличится.

Теперь понятно как планетарный механизм (делитель мощности (PSD)) позволяет регулировать скорость вращения ДВС наподобии бесступенчатой трансмиссии (вариатора).

При любой скорости движения автомобиля компьютер определяет скорость вращения наружной шестерни планетарного механизма. В зависимости от требуемой водителем мощности компьютер определяет скорость вращения ДВС. Далее довольно легко рассчитывается скорость вращения мотор-генератора MG1 и, соответственно, рассчитать электрическую нагрузку генератора.

На основании этого расчёта определяется нагрузка (снимаемая сила тока) на генератор MG1 для увеличения или снижения скорости вращения ДВС необходимой для выполнения поставленной водителем задачи.

Но ни одно из этих действий не изменяет того, что 72% крутящего момента ДВС направляется на ведущие колёса, поскольку в трансмиссии автомобиля нет устройства, изменяющего передаточное соотношение. Даже если колёса автомобиля находятся в неподвижном состоянии, установленная часть крутящего момента всё равно остаётся приложенной к колёсам. Разумеется, крутящий момент двигателя на различных режимах работы может изменяться. В соответствии с этим будет изменяться общий крутящий момент на солнечной и корончатой шестерне, но соотношение этих моментов всегда будет постоянным 28 : 72.

Позволяя таким способом двигателю внутреннего сгорания начинать движение автомобиля с неподвижного состояния за счёт использования крутящего момента электродвигателя, исключается необходимость установки на автомобиль механического сцепления или гидротрансформатора, довольно ненадёжных и громоздких агрегатов трансмиссии автомобиля

Последним шагом является нахождение способа использования электрической энергии, вырабатываемой генератором MG1 во время выполнения этих регулировок. Второй мотор-генератор (обозначаемый MG2) механически соединён с наружной кольцевой шестернёй планетарного механизма (PSD), то есть с ведущими колёсами автомобиля, добавляет свой крутящий момент к крутящему моменту, поступающему на делитель мощности (PSD) от двигателя внутреннего сгорания, вращающего водило сателитных шестерней. Поэтому мощность, потребляемая генератором MG1 при выполнении регулировок, не пропадает бесполезно, она просто по электрической части обходит планетарный механизм делителя мощности, и, в конечном счете, всё равно направляется на вращение ведущих колёс автомобиля. Только эта часть мощности двигателя сначала преобразуется из механической энергии в электрическую при помощи мотор-генератора MG1 (в основном работающего как генератор), а потом при помощи мотор-генератора MG2 (в основном работающего в режиме электродвигателя) преобразуется из электрической энергии в механическую.

Мощность двигателя внутреннего сгорания, разделённая делителем мощности на две части, полностью поступает на наружную шестерню планетарного механизма, причём одна часть мощности передаётся на

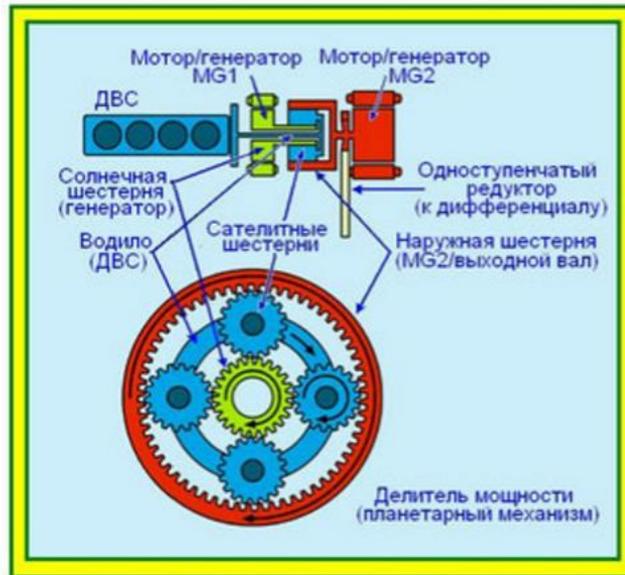
наружную шестерню по механической ветке, а вторая часть поступает на наружную шестерню по электрической ветке через мотор-генератор MG1, электронику управления и мотор-генератор MG2. Наружная шестерня планетарного механизма, совместно с мотор-генератором MG2 вращают ведущие колёса через одноступенчатый редуктор и дифференциал.

Поскольку, коэффициент полезного действия механической передачи (приблизительно 95%) значительно выше коэффициента полезного действия электрической передачи (приблизительно 70%), система управления старается установить режим, при котором большая часть мощности передаётся по механической ветке.

Для большего понимания принципа действия трансмиссии автомобиля Prius необходимо отметить, что в отличие от крутящего момента, передаваемая мощность не имеет фиксированного деления между механической и электрической частью.

Мощность, это функция крутящего момента и скорости вращения, так что мощность, передаваемая каждым способом (механическим и электрическим), зависит, от соотношения скорости вращения мотор-генератора MG1 и кольцевой шестерни планетарного механизма.

Заявление о том, что 72% мощности ДВС поступает на ведущие колёса непосредственно механическим путём, а 28% мощности ДВС передаются при помощи электричества не верно. Крутящий момент действительно делится в этом соотношении, а вот соотношение передаваемой двумя путями мощности постоянно меняется за счёт изменения частоты вращения солнечной и наружной шестерни делителя мощности. Это явление используется электронной системой управления двигателем. Таким образом, в трансмиссии автомобиля Prius для обеспечения скорости вращения двигателя в необходимом диапазоне вместо стандартной ступенчатой коробки передач или бесступенчатой коробки передач (вариатора) используется **планетарный механизм, генератор, силовая и управляющая электроника**. Также нам известно, что фиксированная часть крутящего момента двигателя внутреннего сгорания (приблизительно 72%) передаётся на ведущие колёса автомобиля механическим путём. Не имея технической возможности изменения общего передаточного соотношения между ДВС и ведущими колёсами, мы лишены возможности увеличения крутящего момента ДВС для высокого ускорения при медленном движении автомобиля. Но, несмотря на это, проблема работы ДВС на высоких оборотах (обеспечивающих необходимый крутящий момент и мощность двигателя) при низкой скорости движения автомобиля была решена. Общее передаточное соотношение трансмиссии соответствует передаточному соотношению трансмиссии обычного автомобиля при постоянном включении в коробке переключении передач высшей передачи.



Частично эта проблема была решена передачей электрической энергии, вырабатываемой мотор-генератором MG1 на мотор-генератор MG2, который добавляет свой крутящий момент к крутящему моменту ДВС. А для работы электрического двигателя не требуется изменение крутящего момента.

Электрическому двигателю не присущ врождённый порок двигателя внутреннего сгорания – небольшой крутящий момент на низких оборотах. Точнее говоря, именно на низких оборотах электрический двигатель развивает максимальный крутящий момент.

Допустим, что двигатель внутреннего сгорания вращается со скоростью 2000 об/мин, при этом автомобиль движется без ускорения. В этом случае большая часть мощности ДВС поступает на мотор-генератор MG1 (работающий в режиме генератора).

Фактически в самом начале движения вся мощность двигателя внутреннего сгорания поступает на мотор-генератор MG1. И не смотря на то, что MG1 получает только 28% крутящего момента, всё вращение, то есть мощность, при помощи делителя мощности, полностью передаётся на него.

Поскольку мотор-генератор MG2 механически соединён с медленно вращающимися ведущими колёсами, ему не требуется большой мощности, необходимой для выработки максимального крутящего момента.

Используя мощность, развиваемую ДВС, первоначально проходящую через MG1 и MG2 по электрической ветке, Prius развивает довольно приличное ускорение на скорости движения автомобиля от 0 до 15 км/час. При этом в самом начале ускорения через механическую ветвь передаётся приблизительно только одна пятая часть крутящего момента. При достижении скорости приблизительно 15 км/час Prius дальше не может обеспечивать продолжение необходимого ускорения при условии использования только одного маломощного двигателя внутреннего сгорания, технические параметры которого были рассчитаны, с учётом современных требований, на высокую

топливную экономичность и низкую эмиссию, а совсем не для достижения высокой мощности.

По мере возрастания скорости автомобиля мотор-генератору MG2 для поддержания необходимого крутящего момента требуется всё большая и большая электрическая мощность, при отсутствии этой мощности крутящий момент электродвигателя падает. Сам мотор-генератор MG2 имеет необходимые размеры и мощность для дальнейшего поддержания необходимого уровня ускорения, всё дело только в недостаточной электрической мощности, поступающей от MG1. Возникает вопрос, где временно, на короткий период, взять недостающую электрическую мощность, необходимую для продолжения ускорения?

Ответ достаточно прост – от блока высоковольтной аккумуляторной батареи. Дело в том, что мотор-генератор MG1 напрямую не направляет мощность на мотор-генератор MG2, как для простоты рассуждений говорилось ранее. В систему управляющей электроники входит устройство, называемое «инвертор», предназначенное для преобразования, поступающего на него высокого переменного напряжения, в постоянное напряжение в несколько сотен вольт. Далее высокое постоянное напряжение поступает на терминалы блока аккумуляторной батареи.

В случае необходимости второй инвертор отбирает от аккумуляторной батареи недостаточную мощность, необходимую MG2 для обеспечения желаемого уровня ускорения автомобиля. Следовательно, если мотор-генератор MG1 не вырабатывает достаточной мощности, при которой мотор-генератор MG2 обеспечивает расчётное ускорение, недостающая электрическая мощность берётся от аккумуляторной батареи. При этом инвертор преобразует постоянный ток высоковольтной аккумуляторной батареи в трёхфазный переменный ток, необходимый для работы электродвигателя MG2. При этом напряжение тока, подаваемого на тяговый электрический двигатель, может быть выше напряжения высоковольтной аккумуляторной батареи. Например, напряжение высоковольтной батареи автомобиля Prius равно 201,6 вольт, а на электродвигатель подаётся ток, напряжением до 500 вольт.

Когда автомобиль достигнет необходимой скорости и движется равномерно излишняя электрическая мощность, вырабатываемая мотор-генератором MG1, используется для зарядки аккумуляторной батареи.

Дополнительная мощность, поступающая от аккумуляторной батареи, позволяет автомобилю весом 1300 кг, которому для обеспечения расчётного ускорения требуется двигатель мощностью не менее 100 л.с. и механизм изменения передаточного соотношения (коробка передач), обходиться двигателем мощностью 70 л.с. при полном отсутствии какого-либо механизма изменения передаточного соотношения.

Поскольку в настоящее время уделяется большое значение топливной экономичности и экологичности автомобиля, ясно, что двигатель внутреннего сгорания автомобиля работает по циклу Аткинсона.

#### 7.4. Двигатель внутреннего сгорания.

Двигатель внутреннего сгорания автомобиля Prius, вес которого равен 1300 кг, имеет уменьшенный размер и пониженную мощность для автомобиля такого класса. Возможность установки на автомобиль такого двигателя дало наличие электродвигателей в трансмиссии автомобиля и наличие высоковольтной аккумуляторной батареи, которые помогают двигателю внутреннего сгорания, когда для движения автомобиля требуется большая мощность. С учетом наиболее часто встречающихся режимов движения автомобиля двигатель пониженной мощности почти всегда может работать в режиме максимальной экономичности. Возможность установки двигателя с уменьшенной мощностью называется «снижением размерности двигателя».

Снижение размерности двигателя это далеко не единственная мера по повышению топливной экономичности двигателя. В двигателе используется множество современных технологий, позволяющих улучшить эффективность работы двигателя и расширить диапазон, при которых появляется возможность достижения максимальной экономичности. Двигатель автомобиля Prius работает по циклу Аткинсона, в отличие от двигателей обычных автомобилей, работающих по циклу Отто, позволяет улучшить эффективность работы двигателя на низких нагрузках за счёт снижения насосных потерь. Ограничение максимальных оборотов двигателя до 4500 об/мин (Prius 2-го поколения, 2000 – 2003) и до 5000 об/мин (Prius 3-го поколения, после 2003), позволило уменьшить вес многих деталей, что в свою очередь снизило инерционные потери и потери на трение. Сдвиг оси коленчатого вала относительно оси цилиндров облегчил передачу усилий от поршня на коленчатый вал, поскольку направление шатуна к кривошипу приблизилось к прямому углу. Стержни клапанов двигателя имеют уменьшенный диаметр, а клапанные пружины имеют пониженную силу сжатия, что уменьшает затраты энергии на привод клапанов.

Учитывая вышесказанное можно отметить, что на гибридные автомобили устанавливается не обычный двигатель внутреннего сгорания, а двигатель, прошедший необходимую модернизацию и имеющий все современные системы повышающие эффективность работы двигателя внутреннего сгорания.

#### 7.5. Агрегаты электромеханической трансмиссии Toyota HSD

##### 7.5.1. Мотор-генераторы

В трансмиссии автомобиля Prius используются две электрические машины, чаще называемые мотор-генераторами. По конструкции мотор-генераторы практически не отличаются друг от друга, но они отличаются по размерам. Оба мотор-генератора являются электрическими синхронными трёхфазными электромашинами переменного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Ротор мотор-генератора (вращающаяся деталь, соединённая с валом) по существу является постоянным магнитом и не имеет никаких обмоток или электрических соединений. А в статор (неподвижная часть мотор-генератора) встроено три обмотки.

Мотор-генератор может работать не только в режиме электродвигателя, но и в режиме генератора. При вращении вала мотор-генератора от постороннего источника механической энергии в обмотках статора индуцируется электрический ток, который можно использовать как для зарядки высоковольтной аккумуляторной батареи, так и для питания другого электрического двигателя.

Мотор-генератор 1 (MG1) соединён с солнечной шестернёй делителя мощности (планетарный механизм). Мотор-генератор (MG1) является меньшим из двух и имеет максимальную мощность 18 кВт. Мотор-генератор MG1 обычно применяется для запуска ДВС или для регулирования скорости вращения двигателя внутреннего сгорания за счёт изменения электрической нагрузки (количества вырабатываемой электрической энергии) на этот генератор. Мотор генератор 2 (MG2) соединён с корончатой шестернёй делителя мощности и имеет механическое соединение через одноступенчатый механический редуктор с ведущими колёсами автомобиля. Поэтому MG2 имеет возможность приводить в движение автомобиль. Максимальная мощность MG2 больше максимальной мощности MG1 и равна 33 кВт на автомобиле Prius второго поколения или 50 кВт на автомобиле Prius третьего поколения. Иногда MG2 называют тяговым электродвигателем, предназначение которого привод автомобиля или регенерация энергии при торможении автомобиля. Разумеется, в этом случае MG2 переключается в режим работы генератора. Оба мотор-генератора имеют жидкостное охлаждение.

Крутящий момент и мощность, как двигателя внутреннего сгорания, так и обоих мотор-генераторов комбинируется и распределяется при помощи планетарного механизма, который Toyota назвала делителем мощности. Хотя на первый взгляд этот механизм не выглядит очень сложным (в нём всего 21 движущаяся деталь) в работе этого устройства довольно трудно разобраться и ещё трудней понять, как это устройство распределяет мощность. Коротко говоря, это устройство позволяет автомобилю Prius одновременно работать и как параллельный и как последовательный гибрид и получать преимущества, присущие каждому типу гибридных установок. Двигатель внутреннего сгорания имеет возможность напрямую механическим путём через устройство деления мощности передавать крутящий момент на ведущие колёса автомобиля. Одновременно с этим регулируемое количество мощность может быть отобрано у двигателя внутреннего сгорания и преобразовано в электрическую энергию при помощи одного из мотор-генераторов (MG1). Выработанную электрическую энергию можно направить для зарядки высоковольтной аккумуляторной батареи или передать на другой мотор-генератор (MG2), работающий в режиме тягового двигателя для оказания помощи ДВС во время движения автомобиля. Такая гибкость электромеханической трансмиссии в разделении потоков мощности позволяет автомобилю Prius улучшить топливную экономичность при одновременном улучшении токсичности способом, который недоступен при жёсткой механической связи двигателя внутреннего сгорания с ведущими колёсами, что присуще параллельным гибридным силовым установкам. При этом есть

возможность исключить потерю мощности, передаваемой электрическим путём, которая наблюдается у автомобилей с последовательной гибридной установкой. Про Prius часто говорят, что он обладает свойствами автомобиля с бесступенчатой трансмиссией (вариатор или CVT), это свойство автомобиль приобрёл за счёт использования механизма деления мощности. Хотя в действительности бесступенчатая коробка передач (вариатор) по своему значению (но не по конструкции) мало чем отличается от обычной коробки передач. Просто вариатор изменяет передаточное соотношение бесступенчато, а простая коробка переключения передач при помощи заранее установленных фиксированных значений всего на несколько шагов (1-я передача, 2-я и т.д.). В действительности Prius имеет всего одно фиксированное передаточное соотношение, соответствующее включению высшей передачи, а недостающая мощность (крутящий момент) необходимая для начала движения и эффективного ускорения поступает от электродвигателей. Совместная работа двигателя внутреннего сгорания и тягового электродвигателя, соотношение мощностей которых определяется при помощи делителя мощности, создаёт у водителя иллюзию, что Prius имеет бесступенчатую трансмиссию.

Поскольку оба мотор-генератора работают с переменным трёхфазным током, а высоковольтная батарея автомобиля Prius работает только с постоянным током, для согласования их совместной работы потребовался специальный *электронный силовой блок*. Каждый мотор-генератор имеет собственный инвертор, выполняющий функцию преобразования тока. Получая информацию от датчика положения ротора мотор-генератора, инвертор знает угловое положение ротора и, переключая напряжение между обмотками статора, обеспечивает вращение ротора в нужном направлении с необходимой скоростью и с необходимым крутящим моментом.

Блок высоковольтной аккумуляторной батареи автомобиля Prius второго поколения состоит из последовательно соединённых 228 гальванических элементов. Поскольку напряжение каждого элемента равно 1,2 вольта, общее напряжение аккумуляторной батареи равно 273,6 вольта. Гальванические элементы собраны в модули, каждый из которых содержит по 6 элементов, вся высоковольтная батарея, установленная за задним пассажирским сиденьем, состоит из 38 модулей. Аккумуляторная батарея имеет ток силой 80 ампер при разрядке и 50 ампер во время зарядки. Но такое количество энергии вырабатывает двигатель внутреннего сгорания приблизительно из 250 миллилитров бензина.

Эти цифры даны только для того, чтобы как то осознать количество энергии, сохранённой в высоковольтной аккумуляторной батарее автомобиля. Без сжигания топлива автомобиль не может обеспечить необходимое движение, даже если уровень зарядки аккумуляторной батареи будет равен 80%. Большую часть времени во время движения в вашем распоряжении будет не более 1 МДж энергии аккумуляторной батареи.

Кроме высоковольтной аккумуляторной батареи Prius также имеет вспомогательную свинцово-кислотную аккумуляторную батарею напряжением 12 вольт и ёмкостью 28 ампер-часов. Вспомогательная батарея предназначена

для питания различных электронных управляющих блоков и аксессуаров автомобиля в то время, когда главное реле высоковольтной системы выключено. Во время работы гибридной силовой установки все потребители, использующие постоянный ток низкого напряжения, получают питание от специального преобразователя, преобразующего постоянный ток высокого напряжения в постоянный ток низкого напряжения (DC/DC). От этого преобразователя, в случае необходимости, осуществляется зарядка вспомогательной аккумуляторной батареи.

#### 7.5.2. Что отсутствует на автомобиле Prius.

Были рассмотрены новые детали трансмиссии автомобиля Prius, отсутствующие на автомобилях с двигателем внутреннего сгорания. Наличие такого большого количества новых деталей позволяет говорить, что трансмиссия автомобиля Prius значительно усложнилась по сравнению с трансмиссией обычного автомобиля с ДВС. Но прежде чем принимать решение, необходимо отметить, что часть механизмов, установка которых на обычный автомобиль с ДВС обязательна, на Prius отсутствуют. К этим механизмам относятся:

- Отсутствует коробка переключения передач, как ступенчатая (ручная или механическая), так и бесступенчатая (вариатор). На Prius отсутствует какой-либо механизм, изменяющий передаточное соотношение между двигателем внутреннего сгорания и ведущими колёсами.
- Отсутствует фрикционное сцепление, гидравлическая муфта, гидротрансформатор или любое другое устройство, отсоединяющее двигатель от ведущих колёс. Ведущие колёса Prius постоянно имеют механическое соединение с двигателем внутреннего сгорания и тяговым электрическим двигателем.
- Отсутствует стартёр ДВС, поскольку запуск двигателя осуществляется при помощи мотор-генератора 1 (MG1) через шестерни механизма делителя мощности.
- Отсутствует стандартный генератор, поскольку все электрические вспомогательные механизмы получают электрическую энергию, выработанную мотор-генераторами.

	Код модели			
	NHW10	NHW11	NHW20	ZVW30
Тип кузова	4-двери Седан	4-двери Седан	5-дверей Хатчбэк	5-дверей Хатчбэк
Начало продаж	1997	2000	2003	2009
<b>Высоковольтная аккумуляторная батарея</b>				
Модули (в батарее)	40	38	28	28
Элементов в модуле (шт)	6	6	6	6
Всего элементов в батар.	240	228	168	168
Напряжение элемента	1,2	1,2	1,2	1,2

Напряжение батареи	288	273,6	201,6	201,6
Ёмкость (ампер-час)	6,0	6,5	6,5	6,5
Энергия (кВт*час)	1,728	1,778	1,310	1,310
Вес (кг)	57	50	45	44
<b>Двигатель внутреннего сгорания</b>				
Мощность (кВт/лс)	43/58	52/70	57/76	73/98
На оборотах	4000	4500	5000	5200
<b>Тяговый электрический двигатель</b>				
Напряжение (В)	288	273	500	650
Мощность (кВт/лс)	30/40	33/44	50/67	60/80
Общая мощность		73/98	82/110	100/134

### 7.6. Некоторые режимы работы трансмиссии автомобиля Prius.

Наличие в трансмиссии автомобиля двигателя внутреннего сгорания, механизма деления мощности и двух мотор-генераторов (MG1 и MG2) позволяет обеспечить большое количество режимов работы гибридной установки в зависимости от условий движения автомобиля. Постоянно меняющиеся условия движения вызывают постоянное изменение различных режимов работы гибридной установки. Отметим особенности некоторых режимов.

*1 – Неподвижный автомобиль удерживается механическим стояночным тормозом.*

В этом режиме ДВС выключен, но может работать в режиме холостого хода при следующих условиях:

- необходим прогрев ДВС;
- требуется зарядка высоковольтной аккумуляторной батареи;
- необходимо повысить эффективность работы отопителя салона автомобиля;
- не завершена процедура обучения ЭБУ на холостом ходу.

*2 – Трогание автомобиля с места, ускорение низкой интенсивности, движение задним ходом.*

В этом режиме ДВС выключен. Движение осуществляется при помощи мотор-генератора MG2, включенного в режиме тягового двигателя. Движение задним ходом осуществляется реверсированием мотор-генератора MG2.

*3 – Ускорение средней интенсивности.*

Запускается ДВС. Мощность ДВС при помощи механизма деления мощности разделяется на два потока: 1 – механический, передающий часть мощности ДВС непосредственно на ведущие колёса, 2 – электрический, часть мощности ДВС передаётся на мотор-генератор MG1, работающего в режиме генератора. Питание мотор-генератора MG2, работающего в режиме тягового двигателя, осуществляется за счёт электричества, выработанного мотор-генератором MG1.

*4 – Интенсивное ускорение автомобиля.*

При интенсивном ускорении ДВС работает на повышенной мощности, которая достигается за счёт увеличения частоты вращения двигателя. Мотор-генератор MG2 работает совместно с ДВС на максимальной мощности. При этом для увеличения электрической мощности, подводимой к мотор-генератору MG2, электричество к мотор-генератору MG2 поступает одновременно от мотор-генератора MG1 и от высоковольтной аккумуляторной батареи.

*5 – Движение автомобиля с постоянной скоростью.*

Во время движения с постоянной скоростью на средних нагрузках для движения автомобиля используется мощность работающего ДВС. Излишняя мощность, вырабатываемая ДВС при помощи мотор-генератора MG1, преобразуется в электрическую энергию и используется для зарядки высоковольтной аккумуляторной батареи.

*6 – Движение при отпущенной педали акселератора. Торможение.*

При движении накатом или в режиме торможения мотор-генератор MG2, обычно работающий в режиме тягового электродвигателя, переключается на режим генератора, получающего механическую энергию от ведущих колёс автомобиля. Вся рекуперированная энергия направляется на зарядку высоковольтной аккумуляторной батареи.

# КРАТКОЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТЕНДА

## 1. Назначение

Лабораторный стенд предназначен для обучения студентов электротехнических специальностей, изучающих дисциплины: электрооборудование транспортных средств, электрические машины и электропривод, электроснабжение, электроэнергетика, энергомашиностроение.

## 2. Технические характеристики

- Электропитание от сети, В .....~220
- Частота напряжения питания, Гц..... 50
- Максимальная потребляемая мощность, ВА.....750
- Габаритные размеры, мм.....1300x1500x650
- Масса, кг, не более.....150
- Диапазон рабочих температур, °С.....+10...35
- Влажность воздуха, % ..... 80
- Количество учащихся на рабочем месте, чел.....3...4

## 3. Состав

Общий вид лабораторного стенда представлен на рис. 1.

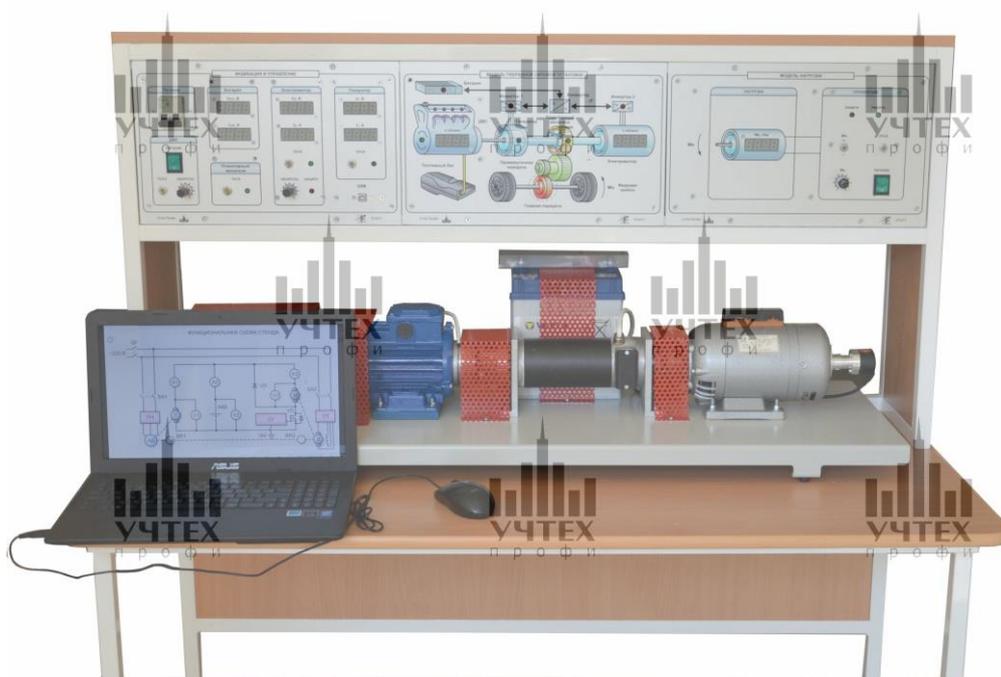


Рис. 1 Лабораторный стенд «Гибридная силовая установка»

В состав стенда входят:

- блок силовых агрегатов, содержащий:

- агрегат 1 (электромеханическая модель ДВС, генератор, датчик скорости 1),
- агрегат 2 (электромотор привода колёс, электромеханическая модель нагрузки, датчик скорости 2),
- аккумуляторная батарея,
- модель планетарного механизма (электромагнитная муфта);
- система управления гибридной силовой установкой, включающая модули:
  - «Индикация и управление»,
  - «Модель гибридной силовой установки»,
  - «Модель нагрузки»;
- программно-аппаратный измерительный комплекс, включающий:
  - ноутбук,
  - плату ввода-вывода,
  - программное обеспечение;
- лабораторный стол;
- комплект силовых кабелей;
- комплект документации, включающий:
  - техническое описание,
  - методические указания к проведению лабораторных работ.

В стенде возможны отдельные изменения, не влияющие на его основные технические характеристики.

#### 4. Функциональная схема стенда

Функциональная схема стенда представлена на рис. 2.

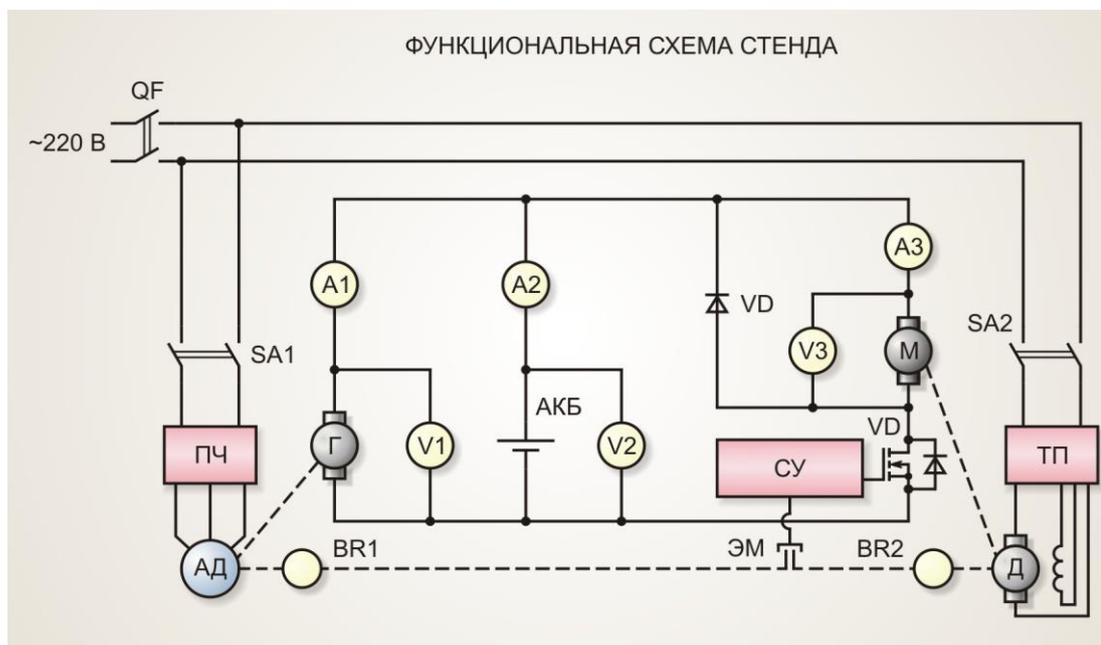


Рис 2 Функциональная схема стенда

На функциональной схеме использованы следующие обозначения:

- QF - автоматический выключатель электропитания стенда;
- ПЧ - преобразователь частоты;
- ТП - тиристорный преобразователь;
- SA1, SA2 - выключатели электропитания, соответственно, преобразователя частоты и тиристорного преобразователя;
- АД - асинхронный электродвигатель (модель ДВС);
- Г- генератор (автомобильный генератор с силовым выпрямительным мостом);
- М - мотор (электромотор привода колёс);
- Д - двигатель (генератор – модель нагрузки);
- АКБ - аккумуляторная батарея;
- BR1, BR2 - датчики скорости, соответственно, 1 и 2 агрегатов;
- ЭМ - электромагнитная муфта (модель планетарного механизма).

### 5. Общие указания при работе со стендом

- Подключение стенда к сети ~220 В осуществлять только через соответствующую розетку с заземляющим контактом.
- Соблюдать порядок пуска силовых агрегатов в соответствии с методическими указаниями к лабораторным работам.
- Запрещается запускать стенд со снятыми со своих штатных мест передними панелями.
- Не рекомендуется длительное время эксплуатировать стенд в режимах перегрузки силовых агрегатов.
- Подключать разъёмы на задних панелях модулей в соответствии с обозначениями.
- Ноутбук к стенду подключать кабелем с USB разъёмом, выходящим из задней панели модуля «Индикация и управление».

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## Лабораторная работа № 1

Исследование работы электродвигателя гибридной силовой установки в режиме холостого хода при питании от аккумуляторной батареи

### 1. Цель работы

Изучение назначения, состава и принципа действия последовательного варианта гибридной силовой установки. Экспериментальное исследование характеристик тягового электропривода колёс в режиме холостого хода при питании от аккумуляторной батареи.

### 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого на лицевой панели модуля «Индикация и управление»:

– регулятор «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электродвигатель» установить в крайнюю левую позицию;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 1». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 1).

Запустить программу в работу нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

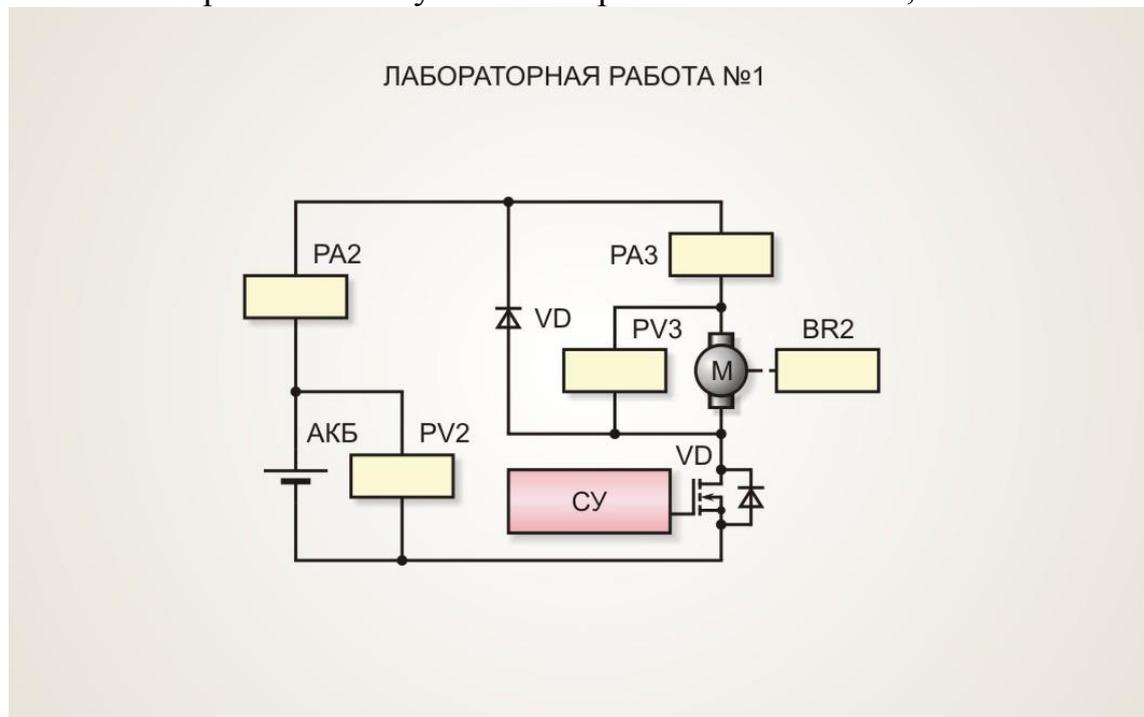


Рис. 1

– с помощью автоматического выключателя «Питание» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея»,

индикаторы «*n об/мин*» электромотора, индикаторы «*n об/мин*» ДВС и «*Mн, Hм*» модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Перевести тумблер «Пуск» рабочего поля «Электромотор» в верхнее положение. При этом включаются светодиодный индикатор «*Инвертор 2*». Измерить напряжение  $U_D$  на электромоторе и ток  $I_D$ , потребляемый электромотором, а также напряжение  $U_{AKB}$  аккумуляторной батареи и ток  $I_{AKB}$ , потребляемый от нее. Результаты измерений занести в табл. 1. Регулятором электромотора «*ОБОРОТЫ*» установить частоту вращения 200 об/мин. Измерить напряжение  $U_D$  на электромоторе и потребляемый им ток  $I_D$ , а также напряжение  $U_{AKB}$  аккумуляторной батареи и ток  $I_{AKB}$ , потребляемый от нее. Результаты измерений занести в табл. 1. По светящимся стрелкам панели «*Модель гибридной силовой установки*» определить направление потоков энергии в этом режиме.

2.3. Изменять частоту вращения электромотора с помощью регулятора «*ОБОРОТЫ*» с шагом 200 об/мин (до 1500 об/мин) и измерять при каждом установленном значении частоты вращения напряжение  $U_D$  на электромоторе и потребляемый им ток  $I_D$ , а также напряжение  $U_{AKB}$  аккумуляторной батареи и ток  $I_{AKB}$ , потребляемый от неё. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить установку.

Таблица 1

№ п/п	Частота вращения мотора, <i>n</i> , об/мин	Электромотор			Батарея		
		$U_D$ , В	$I_D$ , А	$P_D$ , Вт	$U_{AKB}$ , В	$I_{AKB}$ , А	$P_{AKB}$ , Вт
1	0						
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

2.4. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_D$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{AKB}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.5. По полученным экспериментальным результатам построить:

- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I = f(n)$ ;
- вольт-амперные характеристики  $I = f(U)$  тягового электромотора и АКБ в одних координатных осях;
- мощностные характеристики  $P = f(n)$  тягового электропривода и АКБ.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- функциональную схему последовательного варианта электротрансмиссии гибридной силовой установки;
- таблицу с результатами эксперимента;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости (п. 2.5);
- выводы.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование работы электродвигателя гибридной силовой установки в нагрузочном режиме при питании от аккумуляторной батареи

#### 1. Цель работы

Исследование работы и основных характеристик электродвигателя привода колёс гибридной силовой установки в нагрузочном режиме при питании от аккумуляторной батареи.

#### 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого:

– на лицевой панели модуля «Индикация и управление» регулятор «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электродвигатель» установить в крайнюю левую позицию;

– на лицевой панели модуля «Модель нагрузки» регулятор момента «Мн» рабочего поля «Управление» также установить в крайнюю левую позицию, а тумблер «М» установить в позицию «+»;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 2». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 2).

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

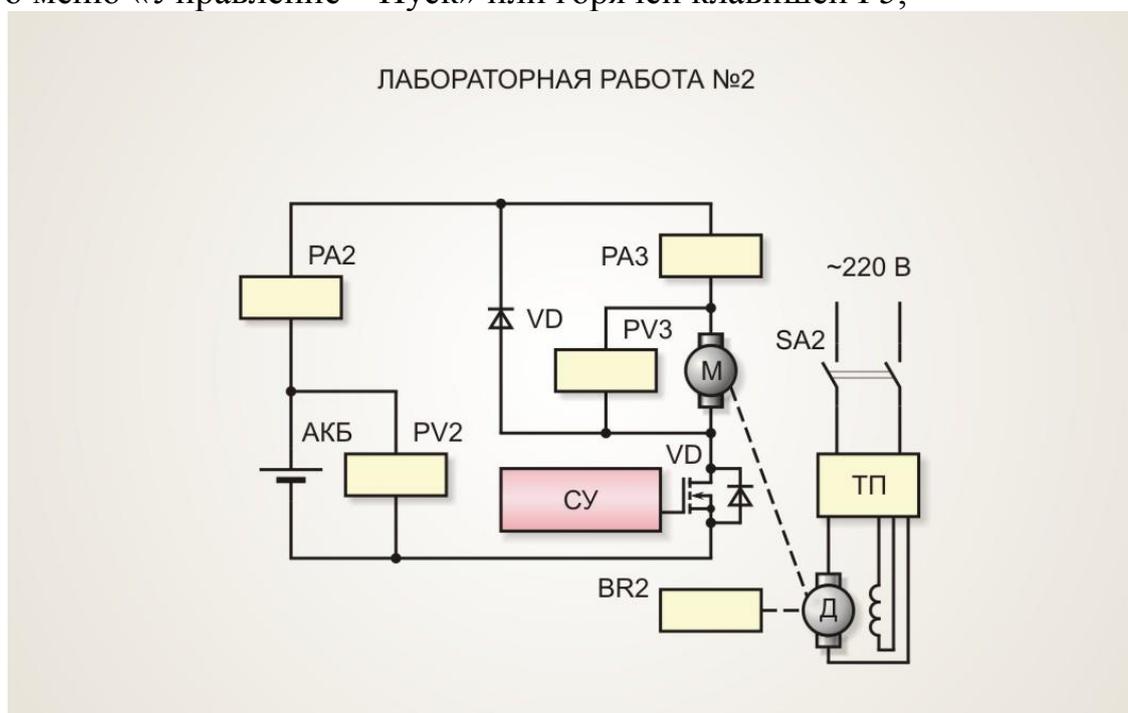


Рис. 2

– с помощью автоматического выключателя «Питание» на лицевой панели модуля «Индикация и управление» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея», индикаторы « $n$  об/мин» электромотора, индикаторы ДВС « $n$  об/мин» и «Мн, Нм» модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить тумблер «Пуск» рабочего поля «Электромотор». При этом включаются светодиодный индикатор «Инвертор 2». Регулятором «ОБОРОТЫ» электромотора установить частоту вращения электромотора, заданную преподавателем (например, 1400 об/мин). Включить клавишу «ПИТАНИЕ» на передней панели модуля «Модель нагрузки» и тумблер «Пуск».

2.3. Устанавливая с помощью регулятора «Мн» рабочего поля «Управление» модуля нагрузки нагрузку на электромоторе привода колёс от нуля с шагом 0,025...0,03 Нм до 0,4. Не допускать величину момента более 0,45 Нм. Измерять частоту вращения электромотора « $n$ », напряжение  $U_d$  и потребляемый ток  $I_d$ , а также напряжение  $U_{АКБ}$  аккумуляторной батареи и ток  $I_{АКБ}$ , потребляемый от неё. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить установку. Вернуть регуляторы в исходное положение.

Таблица 1

№ п/п	Нагрузка Мн, Н м	Частота вращения мотора, $n$ , об/мин	Электромотор			Батарея		
			$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , Вт	$U_{АКБ}$ , В	$I_{АКБ}$ , А	$P_{АКБ}$ , Вт
1		0						
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

2.4. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_d$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{АКБ}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.5. По полученным экспериментальным результатам построить:

- механическую характеристику электромотора  $n=f(M)$ ;
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I=f(n)$ ;
- мощностные характеристики  $P=f(n)$  тягового электропривода и АКБ.

2.6. Сравнить полученные результаты с результатами предшествующей лабораторной работы.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- таблицы с результатами эксперимента;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- выводы.

### Лабораторная работа №3

#### Исследование работы электромотора в режиме рекуперативного торможения при питании от аккумуляторной батареи

#### 1. Цель работы

Исследование работы и основных характеристик электромотора привода колёс гибридной силовой установки в режиме рекуперативного торможения при питании от аккумуляторной батареи.

#### 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого:

– на лицевой панели модуля «Индикация и управление» регулятор «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электромотор» установить в крайнюю левую позицию;

– на лицевой панели модуля «Модель нагрузки» регулятор момента «Мн» рабочего поля «Управление» также установить в крайнюю левую позицию, а **тумблер «М» установить в позицию «-»;**

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 3». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 3).

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

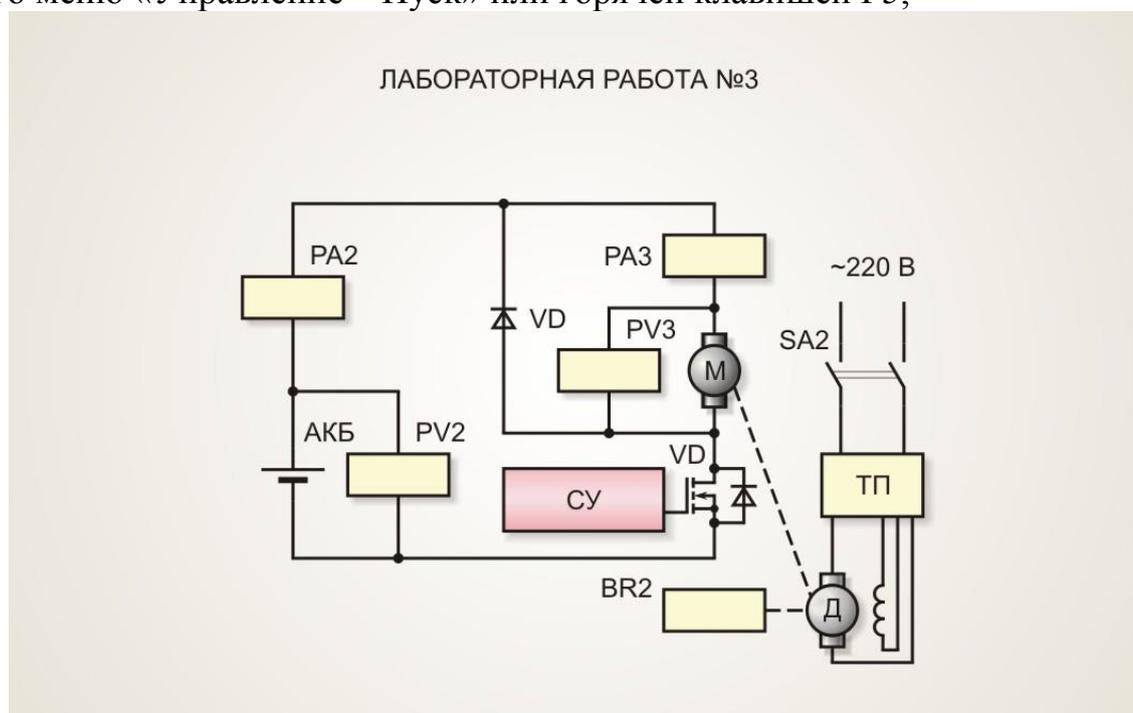


Рис. 3

– с помощью автоматического выключателя «Питание» на лицевой панели модуля «Индикация и управление» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея», индикаторы « $n$  об/мин» электромотора, индикаторы ДВС « $n$  об/мин» и « $M_n$ ,  $N_m$ » модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить тумблер «Пуск» рабочего поля «Электромотор». При этом включаются светодиодный индикатор «Инвертор 2». Регулятором «ОБОРОТЫ» электромотора установить частоту вращения электромотора, заданную преподавателем (например, 1400 об/мин). Включить клавишу «ПИТАНИЕ» на передней панели модуля «Модель нагрузки» и тумблер «Пуск».

2.3. Устанавливая с помощью регулятора « $M_n$ » рабочего поля «Управление» модуля нагрузки нагрузку на электромоторе привода колёс от нуля с шагом 0,025...0,03 Нм до -0,4 Нм. Не допускать величину момента более -0,45 Нм. Измерять частоту вращения электромотора « $n$ », напряжение  $U_d$  и потребляемый ток  $I_d$ , а также напряжение  $U_{AKB}$  аккумуляторной батареи и ток  $I_{AKB}$ , потребляемый от неё. Результаты измерений занести в табл. 1. Выключить установку. Вернуть регуляторы в исходное положение.

Таблица 1

№ п/п	Нагрузка $M_n$ , Н м	Частота вращения мотора, $n$ , об/мин	Электромотор			Батарея		
			$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , Вт	$U_{AKB}$ , В	$I_{AKB}$ , А	$P_{AKB}$ , Вт
1		0						
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								

2.4. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_d$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{AKB}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.5. По полученным экспериментальным результатам построить:

- механическую характеристику электромотора  $n=f(M)$ ;
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I = f(n)$ ;
- мощностные характеристики  $P = f(n)$  тягового электропривода и АКБ.

2.6. Сравнить полученные результаты с результатами предшествующей лабораторной работы.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- таблицы с результатами эксперимента;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- выводы.

## Лабораторная работа №4 Исследование работы гибридной силовой установки в режиме холостого хода

### 1. Цель работы

Изучение принципа действия и основных характеристик последовательной схемы построения гибридной силовой установки в режиме холостого хода.

### 2. 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого

– на лицевой панели модуля «Индикация и управление» регуляторы «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электромотор» и рабочего поля «ДВС» установить в крайнюю левую позицию;

– на лицевой панели модуля «Модель нагрузки» регулятор момента «Мн» установить в крайнюю левую позицию;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 4». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 1).

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

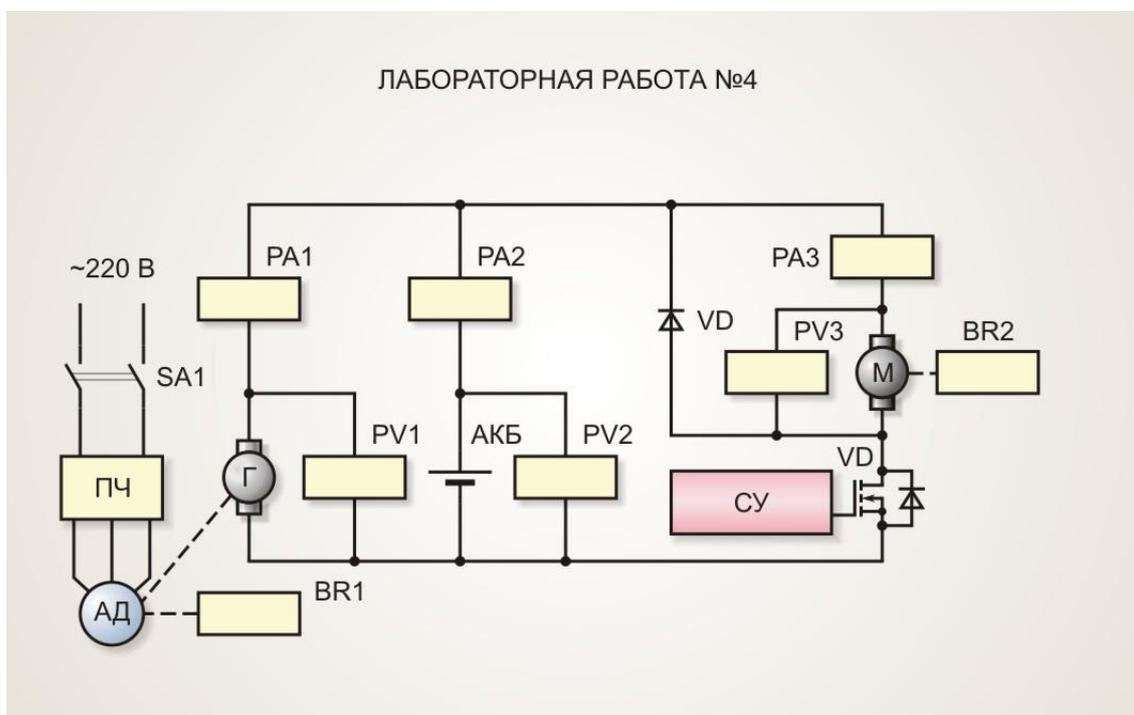


Рис. 1

– с помощью автоматического выключателя «Питание» на лицевой панели модуля «Индикация и управление» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея», индикаторы « $n$  об/мин» электромотора, индикаторы ДВС « $n$  об/мин» и «Мн, Nm» модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить выключатель «ПИТАНИЕ» на рабочем поле ДВС. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле ДВС и тумблер «ПУСК» на рабочем поле «Генератор». Убедиться, включились ли светодиодные индикаторы «ДВС», «Генератор», «Инвертор 1» на панели «ДВС». Плавно увеличить частоту вращения ДВС до 1200-1400 об/мин. Обратит внимание на направление потоков энергии.

2.3. Включить тумблер «Пуск» на рабочем поле «Электромотор». Регулятором «ОБОРОТЫ» электромотора плавно увеличивать частоту вращения электромотора до 1500 об/мин и измерять при каждом установленном значении частоты вращения указанные в табл. 1 величины.

Таблица 1

№ п/п	Частота вращения мотора, $n$ , об/мин	Электромотор			Батарея			Генератор		
		$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , Вт	$U_{AKB}$ , В	$I_{AKB}$ , А	$P_{AKB}$ , Вт	$U_g$ , В	$I_g$ , А	$P_g$ , Вт
1	0									
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										

2.4. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_d$ , потребляемую электромотором, мощность  $P_{AKB}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи и мощность  $P_g$  генератора. Результаты занести в табл. 1.

- 2.5. По полученным экспериментальным результатам построить:
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I_d = f(n)$ ;
  - мощностные характеристики  $P = f(n)$  тягового электропривода и АКБ.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- функциональную схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами эксперимента и расчета;
- анализ направлений потоков энергии;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- выводы.

## Лабораторная работа №5 Исследование работы гибридной силовой установки в нагрузочном режиме

### 1. Цель работы

Изучение принципа действия и основных характеристик последовательной схемы построения гибридной силовой установки в нагрузочном режиме.

### 2. 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого

– на лицевой панели модуля «Индикация и управление» регуляторы «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электромотор» и рабочего поля «ДВС» установить в крайнюю левую позицию;

– на лицевой панели модуля «Модель нагрузки» регулятор момента «Мн» установить в крайнюю левую позицию, а тумблер «Мн» установить в позицию «+»;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 5». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 1).

Запустить программу в работу нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

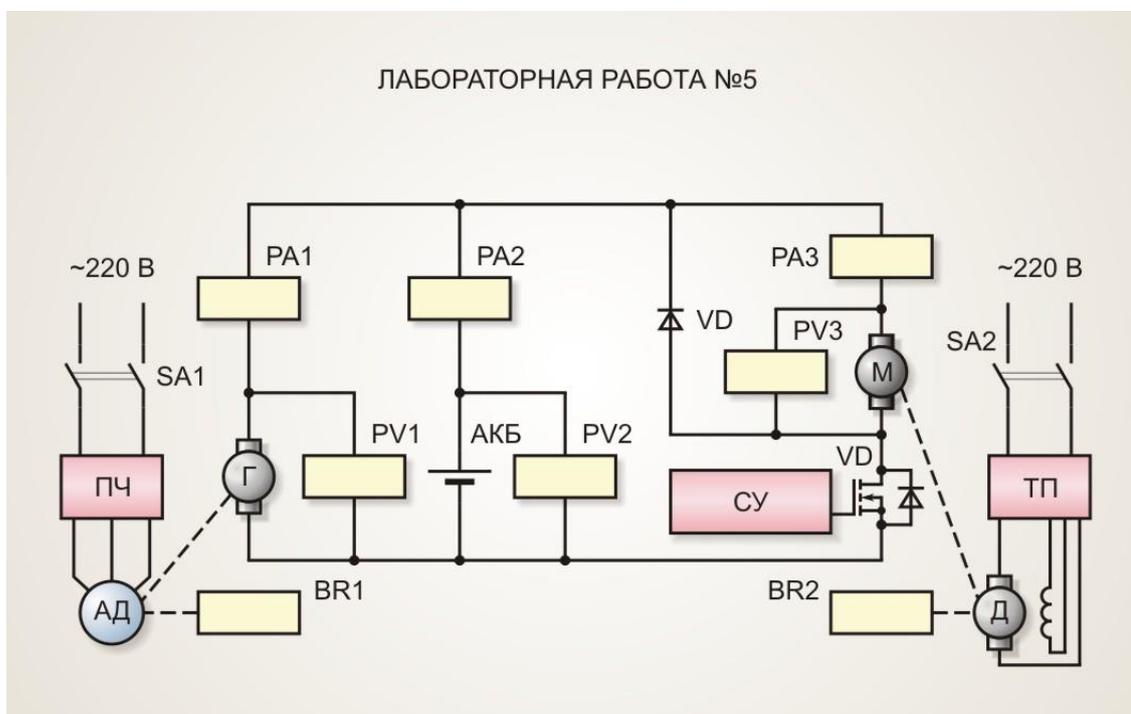


Рис. 1

– с помощью автоматического выключателя «Питание» на лицевой панели модуля «Индикация и управление» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея», индикаторы « $n$  об/мин» электромотора, индикаторы ДВС « $n$  об/мин» и « $M_n$ ,  $N_m$ » модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить выключатель «ПИТАНИЕ» на рабочем поле ДВС. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле ДВС и тумблер «ПУСК» на рабочем поле «Генератор». Убедиться, что включились светодиодные индикаторы «ДВС», «Генератор», «Инвертор 1». Регулятором «ОБОРОТЫ» плавно увеличить частоту вращения ДВС до 1200-1400 об/мин.

2.3. Включить тумблер «Пуск» на рабочем поле электромотора и регулятором «ОБОРОТЫ» плавно увеличить его частоту вращения до ~1500 об/мин. Обратит внимание на направление потоков энергии.

2.4. Включить питание модуля нагрузки и тумблер «Пуск» на рабочем поле «Управление» модуля нагрузки. Плавно увеличивая момент на валу электромотора с помощью регулятора « $M_n$ » до 0,4 Нм измерять величины, указанные в табл. 1. Не допускать величину момента более 0,45 Нм. Обратит внимание на смену знака  $I_{акб}$ . Выключить электропитание. Вернуть все в исходное положение.

Таблица 1

№ п/п	Частота вращения мотора $n$ , об/мин	Момент нагрузки $M_n$ , Нм	Электромотор			Батарея			Генератор		
			$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , Вт	$U_{акб}$ , В	$I_{акб}$ , А	$P_{акб}$ , Вт	$U_g$ , В	$I_g$ , А	$P_g$ , Вт
1		0									
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

2.5. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_d$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{акб}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.6. По полученным экспериментальным результатам построить:

- механическую характеристику электромотора  $n=f(M)$ ;
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I_d = f(M)$ ;
- мощностные характеристики  $P = f(M)$  тягового электромотора и АКБ.

2.7. Сравнить полученные результаты с результатами предшествующей лабораторной работы.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- функциональную схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами эксперимента и расчета;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- выводы.



– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея», индикаторы « $n$  об/мин» электромотора, индикаторы ДВС « $n$  об/мин» и «Мн, Нм» модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить выключатель «ПИТАНИЕ» на рабочем поле ДВС. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле ДВС и тумблер «ПУСК» на рабочем поле «Генератор». Убедиться, что включились светодиодные индикаторы «ДВС», «Генератор», «Инвертор 1».

2.3. Включить тумблер «Пуск» на рабочем поле «ДВС» и регулятором «ОБОРОТЫ» плавно увеличить его частоту вращения до 1200 - 1400 об/мин. Включить тумблер «Пуск» на рабочем поле электромотора и регулятором «ОБОРОТЫ» плавно увеличить его частоту вращения до ~1000 об/мин. Обратить внимание на направление потоков энергии.

2.4. Включить питание модуля нагрузки и тумблер «Пуск» на рабочем поле «Управление». Плавно увеличивая момент на валу электромотора с помощью регулятора «Мн» от 0 до -0,4 Нм, измерять величины, указанные в табл. 1. Не допускать величину момента более -0,45 Нм. Выключить электропитание. Обратить внимание на знаки измеряемых величин и направление потоков энергии. Вернуть все регуляторы в исходное положение. Выключить электропитание.

Таблица 1

№ п/п	Частота вращения мотора $n$ , об/мин	Момент нагрузки Мн, Нм	Электромотор			Батарея			Генератор		
			U <sub>д</sub> , В	I <sub>д</sub> , А	P <sub>д</sub> , Вт	U <sub>АКБ</sub> , В	I <sub>АКБ</sub> , А	P <sub>АКБ</sub> , Вт	U <sub>Г</sub> , В	I <sub>Г</sub> , А	P <sub>Г</sub> , Вт
1		0									
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

2.5. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_{д}$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{АКБ}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.6. По полученным экспериментальным результатам построить:

- механическую характеристику электромотора  $n=f(M)$ ;
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I = f(M)$ ;
- мощностные характеристики  $P = f(M)$  тягового электропривода и АКБ.

2.7. Сравнить полученные результаты с результатами предшествующей лабораторной работы.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- функциональную схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами эксперимента и расчета;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- анализ направлений потоков энергии;
- выводы.

Лабораторная работа №7  
Исследование работы гибридной силовой установки  
с моделью планетарного механизма в нагрузочном режиме

1. Цель работы

Изучение особенностей работы гибридной силовой установки в нагрузочном режиме при включенной электромагнитной муфте.

2. 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого:

– на лицевой панели модуля «Индикация и управление» регуляторы «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электромотор» и рабочего поля «ДВС» установить в крайнюю левую позицию;

– на лицевой панели модуля «Модель нагрузки» регулятор момента «Мн» установить в крайнюю левую позицию, а тумблер «Мн» установить в позицию «+»;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 7». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 1).

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

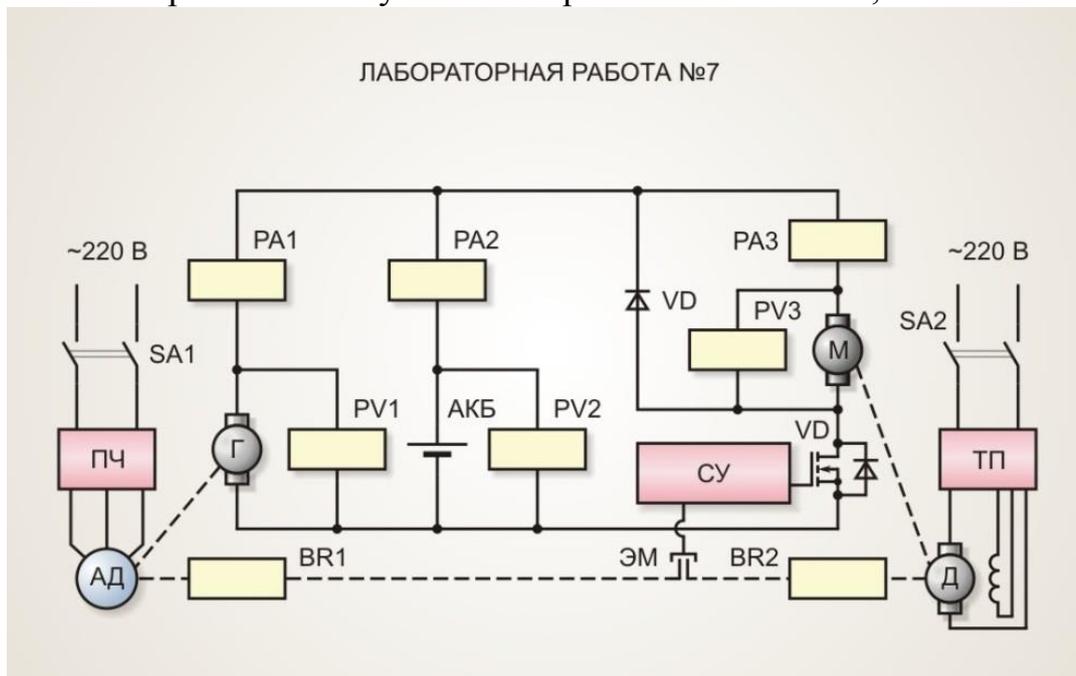


Рис. 1

– с помощью автоматического выключателя «Питание» на лицевой панели модуля «Индикация и управление» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея»,

индикаторы «*n об/мин*» электромотора, индикаторы ДВС «*n об/мин*» и «*Mн, Нм*» модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить выключатель «ПИТАНИЕ» на рабочем поле ДВС. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле ДВС, тумблер «ПУСК» на рабочем поле планетарного механизма и тумблер «ПУСК» на рабочем поле «Генератор». Убедиться, что включились светодиодные индикаторы «ДВС», «Генератор», «Инвертор 1», «Планетарный механизм».

2.3. Регулятором «ОБОРОТЫ» на рабочем поле ДВС плавно увеличить его частоту вращения до 1200 об/мин. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле электромотора и регулятором «ОБОРОТЫ» плавно увеличить его ток до 2...2,5 А. Обратить внимание на направление потоков энергии.

2.4. Включить питание модуля нагрузки и тумблер «Пуск» на рабочем поле «Управление» модуля нагрузки. Плавно увеличивая момент на валу электромотора с помощью регулятора «Mн» до 0,4 Нм измерять величины, указанные в табл. 1. Не допускать величину момента более 0,45 Нм. Выключить электропитание. Вернуть все в исходное положение.

Таблица 1

№ п/п	Частота вращения мотора <i>n</i> , об/мин	Момент нагрузки <i>Mн</i> , Нм	Электромотор			Батарея			Генератор		
			U <sub>д</sub> , В	I <sub>д</sub> , А	P <sub>д</sub> , Вт	U <sub>акб</sub> , В	I <sub>акб</sub> , А	P <sub>акб</sub> , Вт	U <sub>г</sub> , В	I <sub>г</sub> , А	P <sub>г</sub> , Вт
1		0									
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

2.5. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_{д}$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{акб}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.6. По полученным экспериментальным результатам построить:

- механическую характеристику электромотора  $n=f(M)$ ;
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I = f(M)$ ;
- мощностные характеристики  $P = f(M)$  тягового электропривода и АКБ.

2.7. Сравнить полученные результаты с результатами предшествующей лабораторной работы.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;

- функциональную схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами эксперимента и расчета;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- анализ направлений потоков энергии;
- выводы.

Лабораторная работа №8  
Исследование работы гибридной силовой установки  
с моделью планетарного механизма в тормозном режиме

1. Цель работы

Изучение особенностей работы гибридной силовой установки в тормозном режиме при включенной электромагнитной муфте.

2. 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого

– на лицевой панели модуля «Индикация и управление» регуляторы «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электромотор» и рабочего поля «ДВС» установить в крайнюю левую позицию;

– на лицевой панели модуля «Модель нагрузки» регулятор момента «Мн» установить в крайнюю левую позицию, а тумблер «Мн» установить в **позицию «-»**;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 8». На дисплее появится функциональная схема лабораторной установки для данной работы (рис. 1).

Запустить программу в работу, нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

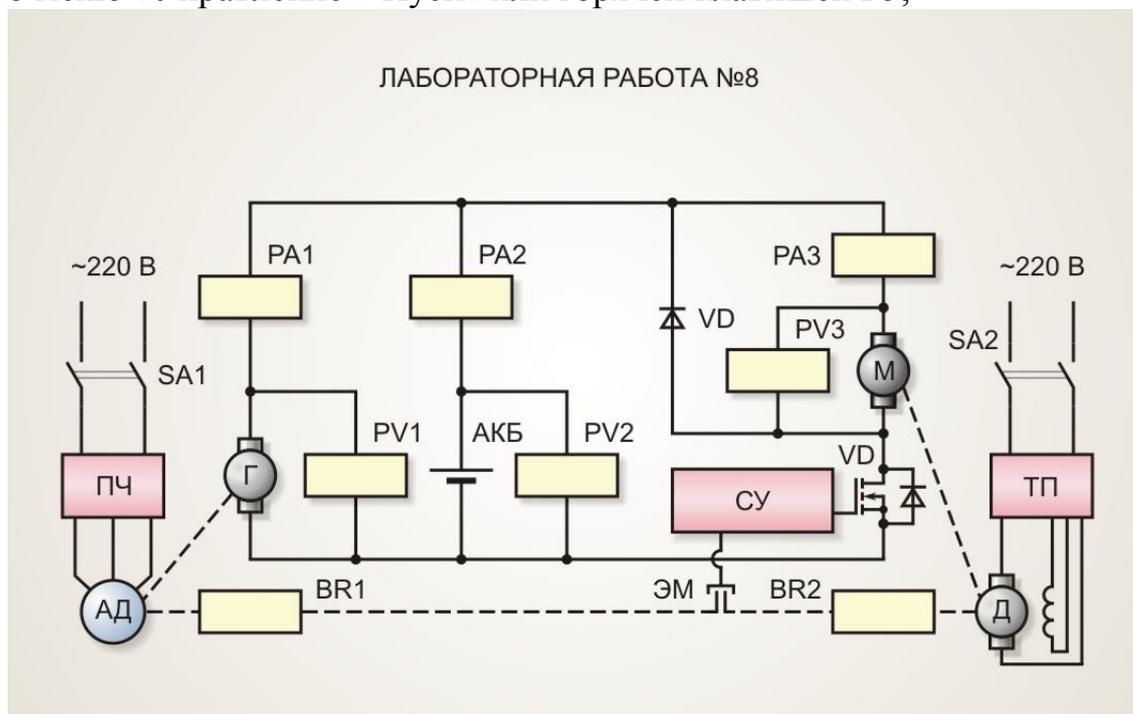


Рис. 1

– с помощью автоматического выключателя «Питание» на лицевой панели модуля «Индикация и управление» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея»,

индикаторы « $n$  об/мин» электромотора, индикаторы ДВС « $n$  об/мин» и « $M_n$ ,  $H_m$ » модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Включить выключатель «ПИТАНИЕ» на рабочем поле ДВС. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле ДВС, тумблер «ПУСК» на рабочем поле планетарного механизма и тумблер «ПУСК» на рабочем поле «Генератор». Убедиться, что включились светодиодные индикаторы «ДВС», «Генератор», «Инвертор 1», «Планетарный механизм».

2.3. Регулятором «ОБОРОТЫ» на рабочем поле ДВС плавно увеличить его частоту вращения до 1200 об/мин. Включить тумблер «ПУСК» на рабочем поле электромотора и регулятором «ОБОРОТЫ» плавно увеличить его ток до 2...2,5 А. Обратить внимание на направление потоков энергии.

2.4. Включить питание модуля нагрузки и тумблер «Пуск» на рабочем поле «Управление» модуля нагрузки. Плавно увеличивая момент на валу электромотора с помощью регулятора «Мн» до -0,45 Нм измерять величины, указанные в табл. 1. Не допускать величину момента более -0,45 Нм. Выключить электропитание. Вернуть все в исходное положение.

Таблица 1

№ п/п	Частота вращения мотора $n$ , об/мин	Момент нагрузки $M_n$ , Нм	Электромотор			Батарея			Генератор		
			У <sub>д</sub> , В	И <sub>д</sub> , А	Р <sub>д</sub> , Вт	U <sub>АКБ</sub> , В	I <sub>АКБ</sub> , А	P <sub>АКБ</sub> , Вт	U <sub>Г</sub> , В	I <sub>Г</sub> , А	P <sub>Г</sub> , Вт
1		0									
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

2.5. Для каждого установленного режима работы рассчитать мощность  $P_d$ , потребляемую электромотором, и мощность  $P_{АКБ}$ , потребляемую от аккумуляторной батареи. Результаты занести в табл. 1.

2.6. По полученным экспериментальным результатам построить:

- механическую характеристику электромотора  $n=f(M)$ ;
- электромеханическую характеристику тягового электромотора  $I = f(M)$ ;
- мощностные характеристики  $P = f(M)$  тягового электропривода и АКБ.

2.7. Сравнить полученные результаты с результатами предшествующей лабораторной работы.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;

- функциональную схему лабораторной установки;
- таблицу с результатами эксперимента и расчета;
- построенные по результатам эксперимента графические зависимости;
- анализ направлений потоков энергии;
- выводы.

# Лабораторная работа № 9

## Исследование работы электродвигателя в переходных режимах торможения и разгона

### 1. Цель работы

Экспериментальное исследование динамических характеристик тягового электропривода колёс в режимах торможения и разгона при питании от аккумуляторной батареи.

### 2. Порядок выполнения работы

2.1. Подготовить установку для снятия характеристик. Для этого на лицевой панели модуля «Индикация и управление»:

– регулятор «ОБОРОТЫ» рабочего поля «Электродвигатель» установить в крайнюю левую позицию;

– включить ноутбук и открыть программу Delta Profi. В окне лабораторных работ выбрать «Лабораторная работа № 9». На дисплее появятся зависимости параметров модели гибридной силовой установки от времени (рис.

1). Запустить программу в работу нажатием кнопки «Пуск»  или командой главного меню «Управление – Пуск» или горячей клавишей F5;

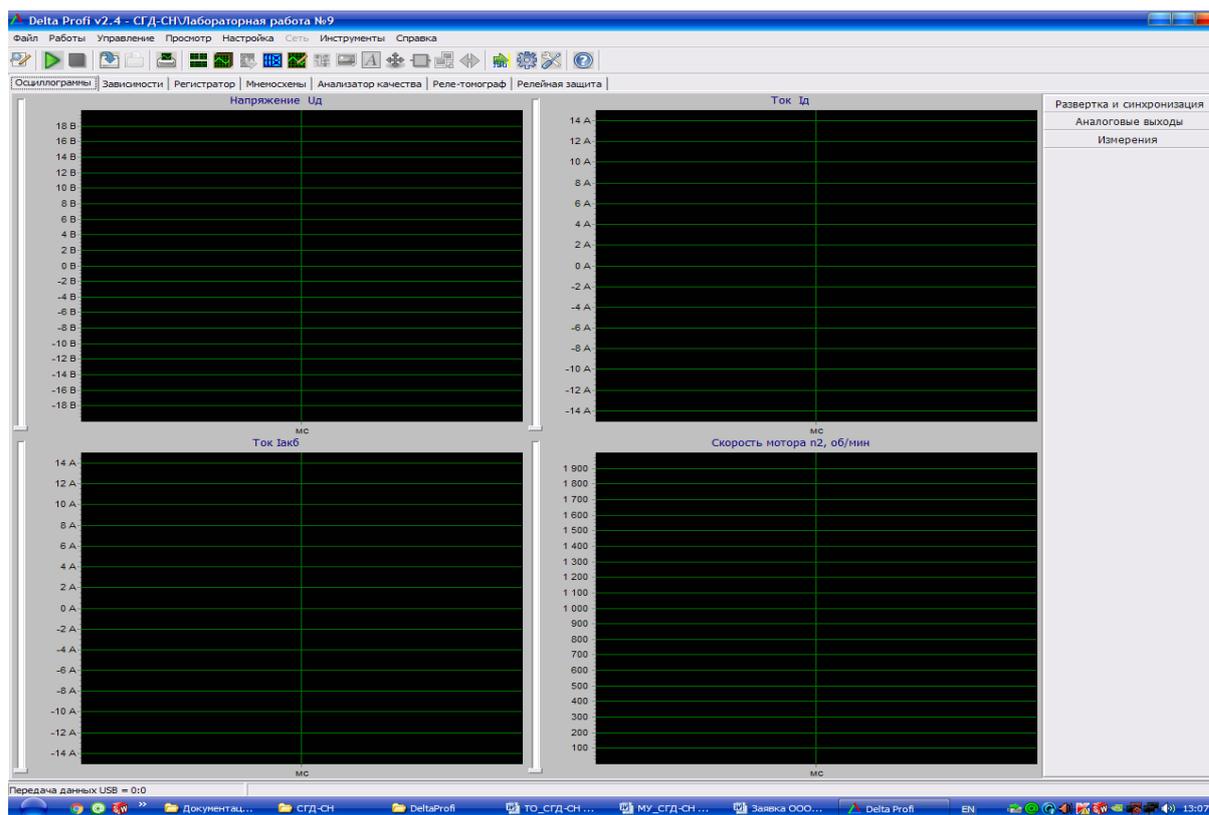


Рис. 1

– с помощью автоматического выключателя «Питание» подать электропитание (~220 В) на стенд;

– убедиться, что на лицевой панели модуля «Модель гибридной силовой установки» включился светодиодный индикатор красного цвета «Батарея», индикаторы «n об/мин» электродвигателя, индикаторы «n об/мин» ДВС и «Mn,

*Нм*) модуля нагрузки, а также индикаторы цифровых измерительных приборов на модуле индикации и управления.

2.2. Перевести тумблер «Пуск» рабочего поля «Электромотор» в верхнее положение. При этом включаются светодиодный индикатор «*Инвертор 2*». Регулятором электромотора «*ОБОРОТЫ*» установить частоту вращения, выбранную преподавателем (например, 500 об/мин). По светящимся стрелкам панели «Модель гибридной силовой установки» определить направление потоков энергии в этом режиме. Переключить тумблер «Мн» в положение «+». Включить клавишу «ПИТАНИЕ» на передней панели модуля «Модель нагрузки» и тумблер «Пуск».

2.3. Установить с помощью регулятора «Мн» рабочего поля «Управление» модуля нагрузки нагрузку на электромоторе привода колёс и снизить его скорость до величины, указанной преподавателем (например, 200 об/мин). Не допускать величину момента более 0,45 Нм. Включая и выключая тумблер «Пуск» на панели модуля «Модель нагрузки» получить осциллограммы переходных процессов в системе:  $U_d=f(t)$ ,  $I_d=f(t)$ ,  $I_{акб}=f(t)$ ,  $n_2=f(t)$ . Занести полученные осциллограммы в отчёт. Выключить установку. Вернуть регуляторы в исходное положение.

2.4. Перевести тумблер «Пуск» рабочего поля «Электромотор» в верхнее положение. При этом включаются светодиодный индикатор «*Инвертор 2*». Регулятором электромотора «*ОБОРОТЫ*» установить частоту вращения, выбранную преподавателем (например, 500 об/мин). По светящимся стрелкам панели «Модель гибридной силовой установки» определить направление потоков энергии в этом режиме. Переключить тумблер «Мн» в положение «-». Включить клавишу «ПИТАНИЕ» на передней панели модуля «Модель нагрузки» и тумблер «Пуск».

2.5. Установить с помощью регулятора «Мн» рабочего поля «Управление» модуля нагрузки нагрузку на электромоторе привода колёс и увеличить его скорость до величины, указанной преподавателем (например, 1800 об/мин). Не допускать величину момента более 0,45 Нм. Включая и выключая тумблер «Пуск» на панели модуля «Модель нагрузки» получить осциллограммы переходных процессов в системе:  $U_d=f(t)$ ,  $I_d=f(t)$ ,  $I_{акб}=f(t)$ ,  $n_2=f(t)$ . Занести полученные осциллограммы в отчёт. Выключить установку. Вернуть регуляторы в исходное положение.

2.6. По полученным экспериментальным результатам сделать выводы о режимах работы электромотора.

### 3. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

- наименование и цель работы;
- функциональную схему модели гибридной силовой установки;
- функциональную схему эксперимента;
- осциллограммы, полученные по результатам экспериментов;
- выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Современные проблемы экологии и ресурсосбережения применительно к ДВС.
2. Общие принципы ГСУ.
3. История создания и развития гибридных силовых установок для транспорта.
4. Классификация гибридных силовых установок.
5. Типовые схемы ГСУ: по методу подключения двигателей и накопителя к приводу.
6. Типовые схемы ГСУ по типам накопителей.
7. Схемы различных типов ГСУ.
8. Схема гибридного привода с последовательным соединением.
9. Схема гибридной силовой установки с параллельными потоками энергии.
10. Схема гибридного привода с дифференциальным соединением.
11. Преимущества ГСУ.
12. Недостатки ГСУ.
13. Принципы управления гибридной силовой установкой автомобиля.
14. Различные варианты работы ГСУ автомобиля.
15. Характерные зоны работы ГСУ.
16. Современные конструкции и характеристики элементов гибридного привода. Электрические двигатели.
17. Привод с серийным (последовательного возбуждения) двигателя постоянного тока.
18. Привод с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением.
19. Асинхронные электродвигатели.
20. Привод с использованием синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов.
21. Особенности эксплуатационных режимов работы установок с ДВС.
22. Конструкция гибридной силовой установки легкового автомобиля.

23. Функционирование гибридной силовой установки.
24. Гибридные силовые установки на крупных транспортных средствах.
25. Перспективы применения ГСУ на транспорте.

## Примеры решения задач

### Задача №1.

Гибридная силовая установка состоит из ДВС который совершил полезную работу, равную  $2,3 \cdot 10^4$  кДж, и при этом израсходовал бензин массой 2 кг и электродвигателя мощность которого 650 Ватт напряжение 12в ,а сила тока 40 ампер. Найдите КПД силовой установки.

*Дано:*

$$U=12 \text{ В}$$

$$I=40 \text{ А}$$

$$P=650 \text{ Ватт}$$

$$A_n=2.3 \cdot 10^4 \text{ кДж}=2.3 \cdot 10^7 \text{ Дж}$$

$$M=2 \text{ кг}$$

$$Q=46 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

*Найти:* КПД-?

*Решение:*

$$A_{\text{полез}} = P \cdot t$$

$$A_{\text{затр}} = U \cdot I \cdot t$$

$$\text{КПД} = \frac{A_{\text{полез}}}{A_{\text{затр}}} \cdot 100\% = \frac{P \cdot t}{U \cdot I \cdot t} \cdot 100\%$$

$$\text{КПД электродвигателя} = \frac{650}{12 \cdot 40} \cdot 100\% = 62\%$$

$$\text{КПД двс} = \frac{A_n}{m \cdot q} \cdot 100\% = \frac{2.3 \cdot 10^7}{2 \cdot 46 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 25\%$$

$$\text{Общее КПД} = 62 + 25 = 87\%$$

*Ответ:* 87%

### Задача №2.

Двигатель внутреннего сгорания совершил полезную работу, равную  $2,3 \cdot 10^4$  кДж, и при этом израсходовал бензин массой 2 кг. Вычислите КПД этого двигателя.

*Дано:*

$$M=2 \text{ кг}$$

$$A_n = 2.3 \cdot 10^4 \text{ кДж} = 2.3 \cdot 10^7 \text{ Дж}$$

$$Q=46 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

*Найти:* КПД-?

*Решение:*

$$\text{КПД} = \frac{A_{\text{полез}}}{A_{\text{соверш}}} \cdot 100\%, \text{ где } Q = m \cdot q$$

$$\text{КПД двс} = \frac{A_n}{m \cdot q} \cdot 100\% = \frac{2.3 \cdot 10^7}{2 \cdot 46 \cdot 10^6} \cdot 100\% = 25\%$$

*Ответ :* 25%

**Задача №3.**

**Электродвигатель автомобиля имеет мощность 700 Ватт напряжение 12 В и силу тока 60 ампер. Найдите КПД данного двигателя.**

*Дано:*

$$P=700 \text{ Ватт}$$

$$U=12 \text{ В}$$

$$I=60 \text{ ампер}$$

*Найти:* КПД-?

*Решение:*

$$A \text{ полез} = P \cdot t$$

$$A \text{ затр} = UIt$$

$$\text{КПД} = \frac{A \text{ полез}}{A \text{ затр}} \cdot 100\% = \frac{P \cdot t}{UIt} \cdot 100\%$$

$$\text{КПД электродвигателя} = \frac{700}{12 \cdot 60} \cdot 100\% = 97\%$$

*Ответ:* 97%

## Тестовые задания.

1. Гибридным называется автомобиль, использующий для своего движения

- несколько источников энергии (не менее двух)
- один источник энергии

2. В качестве второго источника энергии, в дополнение к ДВС, может использоваться

- только сжатый воздух,
- только гидроаккумуляторы
- сжатый воздух, гидроаккумуляторы и маховики
- электричество, накопленное в аккумуляторных батареях.

3. Автомобили с электрической трансмиссией имеют

- двигатель внутреннего сгорания (ДВС)
- тяговый электрический двигатель (ТЭД)
- двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и тяговый электрический двигатель (ТЭД)

4. Гибридная силовая установка сочетает в себе..

- современный двигатель внутреннего сгорания, технологически совмещенный с электромоторами
- двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и тяговый электрический двигатель (ТЭД)
- тяговый электрический двигатель, технологически совмещенный с электромоторами

5. Гибридные силовые установки с последовательной схемой трансмиссии имеют ..

- как двигатель внутреннего сгорания
- имеют как двигатель внутреннего сгорания, так и электрический двигатель.
- электрический двигатель

6. Гибридные силовые установки с параллельной схемой имеют..

- двигатель внутреннего сгорания и тяговый электрический двигатель
- имеют как двигатель внутреннего сгорания, так и электрический двигатель.
- только тяговый ЭД

7. Последовательно-параллельная гибридная силовая установка ...

- объединяет последовательную гибридную технологию с параллельной технологией для сохранения преимуществ обеих схем
- объединяет последовательную гибридную технологию с параллельной технологией для сохранения преимуществ параллельной схемы
- объединяет последовательную гибридную технологию с параллельной технологией для сохранения преимуществ последовательной схемы

8. Для чего предназначен планетарный механизм ?

- делит мощность, направляемую от двигателя внутреннего сгорания к ведущим колёсам автомобиля, на два потока
- делит мощность, направляемую от двигателя внутреннего сгорания к ведущим колёсам автомобиля, на три потока
- умножает мощность, направляемую от двигателя внутреннего сгорания к ведущим колёсам автомобиля, на два потока

9. Какие агрегаты относятся к системе электроснабжения автомобиля?

- генераторы
- реле-регулятор
- стартер

10. Какие виды генераторов используются в автомобиле?

- высокочастотные
- переменного тока
- стационарные
- постоянные

11. Из каких основных элементов состоит генератор переменного тока автомобилей?

- ротор, статор, обмотка возбуждения
- кронштейн, крышка подшипника
- тяговое реле, подшипник скольжения, ремень

12. Для чего служит реле регулятор?

- для автоматического регулирования напряжения
- для контроля сопротивления
- для регулирования силы тока

13. Какую функцию играет диодный мост в генераторе переменного тока автомобиля?

- для контроля силы тока
- для выпрямления (преобразования) переменного тока в постоянный ток
- для регулирования напряжения генератора

14. Что измеряет амперметр?

- сопротивление
- силу тока
- напряжение

15. Как подключается амперметр?

- по схеме треугольник
- последовательно с аккумуляторной батареей
- параллельно с аккумуляторной батареей

*16. Какие агрегаты и аппараты относятся к системе пуска двигателя внутреннего сгорания?*

- реле напряжения
- генератор
- стартер

*17. В чем измеряется емкость аккумуляторной батареи?*

- в ваттах
- в вольтах
- в ампер-часах

*18. Устройство электрических стартеров*

- корпус, статор, втягивающее реле, обгонная муфта, щеткодержатель
- корпус, якорь, втягивающее реле, обгонная муфта, щеткодержатель
- корпус, якорь, реле-регулятор, обгонная муфта, щеткодержатель

*19. Установите, что такое реле и для чего оно служит?*

- Электрическое устройство (выключатель), предназначенное для размыкания различных участков электрических
- Электрическое устройство (выключатель), предназначенное для замыкания и размыкания различных участков электрических цепей при заданных изменениях электрических и неэлектрических входных величин
- Устройство (выключатель), предназначенное для замыкания и размыкания различных участков электрических цепей

*20. Из каких основных частей состоит электропривод?*

- силовая часть и система управления
- механическая и динамическая
- система регулирования
- система устойчивости

*21. Динамическое торможение ещё называется..*

- реостатное
- торможения, связанное со скоростью
- торможения, связанное с пусковым моментом
- кинематическое торможение

*22. Диапазон регулирования зависит от..*

- нагрузки
- внешних сил
- от внутренних сил
- от скорости момента

*23. Для чего предназначен электродвигатель?*

- преобразования механической энергии в электрическую

- для изменения параметров электрической энергии
- преобразования электрической энергии в механическую

*24. Стабильность работы на заданной скорости в электроприводах зависит..*

- от жёсткости механической характеристики
- от плавности регулирования скорости
- от диапазона регулирования скорости
- от пускового момента двигателя

*25. Момент, развиваемый электродвигателем, принимается положительным, если он направлен...*

- в сторону движения электропривода
- в сторону, обратную движения электропривода
- по оси вращения ротора электродвигателя
- по касательной к окружности, описываемой ротором электродвигателя

## ***Библиографический список***

1. Острецов, В. Н. Электропривод и электрооборудование : учебник и практикум для прикладного бакалавриата / В. Н. Острецов, А. В. Палицын. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 239 с. — (Серия : Бакалавр. Прикладной курс). — ISBN 978-5-534-02840-9. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/CBAE2168-0E79-490B-B853-C95B3434EACE](http://www.biblio-online.ru/book/CBAE2168-0E79-490B-B853-C95B3434EACE).
2. Дементьев, Ю. Н. Электрический привод : учеб. пособие для академического бакалавриата / Ю. Н. Дементьев, А. Ю. Чернышев, И. А. Чернышев. — 2-е изд. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 223 с. — (Серия : Университеты России). — ISBN 978-5-534-01415-0. — Режим доступа : [www.biblio-online.ru/book/74485104-1B8E-4D11-B081-17EC0A92DC3E](http://www.biblio-online.ru/book/74485104-1B8E-4D11-B081-17EC0A92DC3E).
3. Фролов, Ю.М. Сборник задач и примеров решений по электрическому приводу [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Ю.М. Фролов, В.П. Шелякин. — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 368 с. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3185>. — Загл. с экрана.
4. К.Л. Богданов. Тяговый электропривод, Москва МАДИ 2009.
5. Бажинов О.В., Смирнов А.П. и др. Гибридные автомобили. - Харьков, ХНАДУ, 2008.
6. Бахмутов С.В., Карунин А.Л. и др. Конструктивные схемы автомобилей с гибридными силовыми установками. Учебное пособие. –М. МГТУ «МАМИ», 2007.
7. Жарцов Е.Н. Я знаю автомобиль. (Autology.jimdo.com./Зеленые автомобили/).
8. Лабораторный стенд. Гибридная силовая установка. СГД-СН: МУ по выполнению базовых экспериментов – Челябинск, научно - производственное предприятие «Учебная техника - Профи», 2016. – 63 с.
9. Селифонов В.В. Автоматические системы автомобиля : учебник для вузов/ В.В. Селифонов. - Москва : Гринлайт, 2011. – 310 с.

**Татьяна Викторовна Карпова,**

*старший преподаватель кафедры АППиЭ АмГУ*

**Электрический привод: учебно-методическое пособие для лабораторных работ на стенде «Гибридная силовая установка»**