

Высоковольтная батарея автомобиля Toyota Prius и как с ней бороться.

Введение

В этой статье сделана попытка обсуждения устройства и эксплуатации высоковольтной батареи (ВВБ, HVБ) автомобиля с гибридным приводом Toyota Prius.

Для тех, кто не знает о существовании этого замечательного автомобиля- без преувеличения- чуда инженерной мысли, читать далее бессмысленно.

Самым заинтересованным читателем будет мастер автосервиса, который на свой страх и риск помогает владельцам Prius'ов «бороться» с этой весьма нестандартной конструкцией. Возможно, кому-то эти сведения пригодятся в практической деятельности.

Устройство высоковольтной батареи.

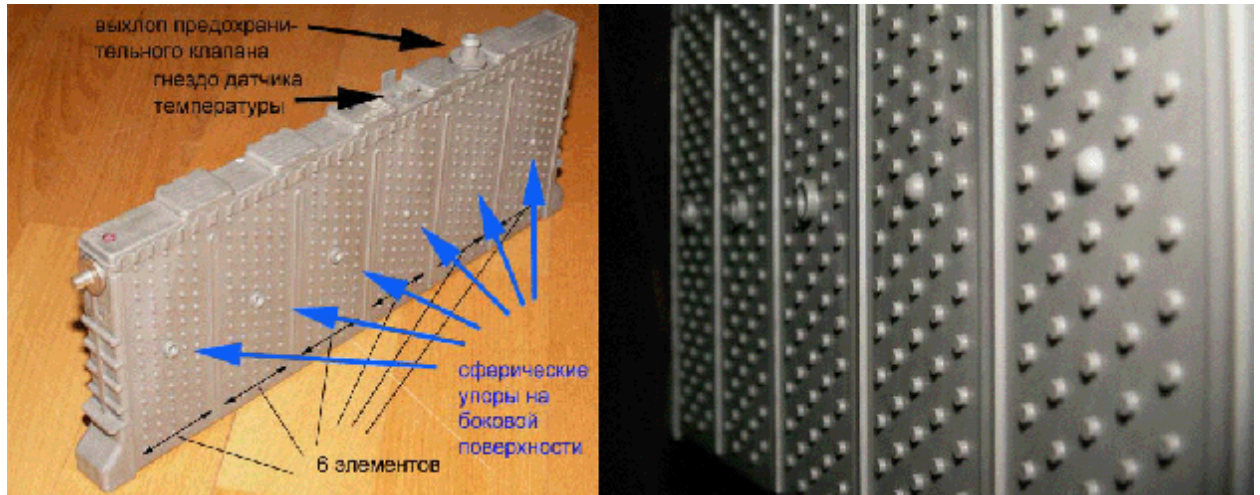
Итак, автомобиль с гибридным приводом имеет накопитель электроэнергии – высоковольтную батарею(ВВБ). В Prius'e она расположена под задним сиденьем (в кузове NHW11) или за задним сиденьем (в кузове NHW10). Батарея имеет монолитную жесткую конструкцию, в которой закреплены модули батареи- круглые (40 штук, 10й кузов) или плоские (38 штук, 11 кузов).

Модули сжаты мощными шпильками и установлены в жёсткий кожух из металла, каждый модуль имеет на боковой поверхности множество «пупырышек», упирающихся друг в друга при сборке в пакет. Кроме того, по средней линии модуля имеются три сферических выступа диаметром 3 мм и соответствующие им впадины.

Расположены они таким образом, что при сборке модулей в пакет «плюс» и «минус» соседних модулей оказываются направлены разные стороны, что позволяет короткими перемычками включить их последовательно. При этом выступы и впадины на боковых поверхностях корпуса модулей совмещаются и упираются друг в друга так, что между модулями остаётся щель для прохода охлаждающего воздуха.



Между двумя модулями, расположенными в середине батареи, перемычка выведена в корпус электронного блока управления батареей, где установлен предохранитель, защищающий батарею от большого тока.



**На фото показан один пластмассовый модуль ВВБ.
Справа хорошо видны упоры на боковой стенке.**

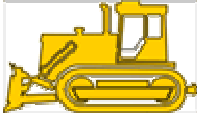
Каждый модуль ВВБ состоит из 6 гальванических элементов никель-металлогидридного типа (NiMH). Все пространство под кожухом принудительно вентилируется.

Батарея отключается от цепей автомобиля специальным контактором, то есть во время стоянки выключенного автомобиля ВВБ отключена от потребителей и теряет энергию заряда только за счет саморазряда. Существуют рекомендации, что Prius надо включать хотя бы один раз в месяц, если вы им не пользуетесь. Это необходимо для того, чтобы «освежить» заряд батареи.

ВВБ управляется отдельным микропроцессорным контроллером- ECU HVВ.

Поскольку номинальное напряжение одного элемента 1,2 В, то напряжение одного модуля из шести элементов 7,2 В. Следовательно, общее напряжение батареи в 10-м кузове составляет 288 Вольт, в 11-м кузове – 273,6 В.

Мы, конечно, обсуждаем номинальное значение напряжения. Реальное измеренное значение напряжения может существенно отличаться от номинального, так как химическая начинка элемента не знает о том, что ей положено создать напряжение ровно 1,2 Вольта. Да и про вольты она ничего не знает. Если же говорить серьезно, то напряжение, прежде всего, зависит от степени заряженности батареи и её технического состояния. Так, например, считается, что свинцовая кислотная батарея при номинальном значении напряжения 12 Вольт имеет при полном заряде напряжение на выводах 14,4 В (знакомая цифра?), а при полном разряде- 8,4 В. Откуда берутся эти цифры? Очень просто. Одна «банка» свинцово-кислотной батареи выдаёт при полном заряде напряжение 2,4 В, а при полном разряде- не более 1,4В. Ну такие уж у неё электрохимические свойства. Умножаем на количество банок в батарее (6 штук) и получаем знакомые цифры.



Итак, что же там внутри и чем принципиально отличается один элемент никель-металлогидридной (NiMH) батареи от одной банки привычного всем автомобилистам свинцово-кислотного аккумулятора? Отвечаю: а ничем существенным. Те же два электрода, опущенные в раствор, проводящий электрический ток (электролит), на поверхности электродов идет обратимая химическая реакция, позволяющая запасать энергию при пропускании внешнего тока и отдавать ее в виде электрического тока во внешнюю цепь. А каковы же отличия? Отличия - в материале электродов, в составе электролита и в химических реакциях, идущих во время заряда и разряда.

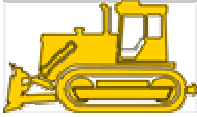
Элемент NiMH батареи состоит из **положительного электрода**, содержащего гидроокись никеля $Ni(OH)_2$ и **отрицательного электрода**, состоящего из сплава(смеси) веществ, поглощающих(присоединяющих) водород (вот именно так туманно пишет Панасоник про свои батарейки), а также **сепаратора** (разделителя) из стекловолокна для исключения короткого замыкания электродов и щелочного **электролита**- гидроокиси калия KOH (или, по другим сведениям, гидроокиси натрия NaOH).

Сплавы, поглощающие водород, исследуются активно последние лет 20. Началось всё со сплавов никеля с железом ($NiFe$), магния с никелем ($MgNi$), а также лантана с никелем ($LaNi_5$). Эти сплавы способны поглотить объем водорода, в тысячи раз превышающий их собственный объем, создавая металл-гидриды, а также освобождать связанный водород.

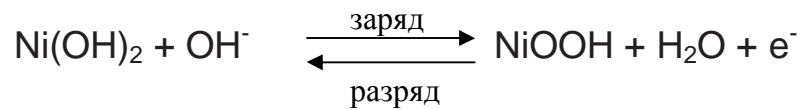
Такие сплавы создаются из металлов типа "А", образование гидроксида которого идет с выделением тепла, с металлами типа "В", при образовании гидроксида, наоборот, поглощающими тепло. Состав сплава подобран так, чтобы процесс поглощения и выделения водорода происходил при нормальной температуре и давлении. Известны сплавы различных типов: AB ($TiFe$ и т.д.), AB_2 ($ZnMn_2$ и т.д.), AB_5 ($LaNi_5$ и т.д.) и A_2B (Mg_2Ni и т.д.). Наилучшие характеристики по эффективности заряда и разряда показали элементы на сплавах типа AB_5 , использующие редкоземельные металлы лантановой группы и никель как главный составляющий элемент, а также сплавы типа AB_2 на основе титана и никеля.

Фирма Panasonic сосредоточила своё внимание на сплавах типа AB_5 , показывающих высокую эффективность и превосходное количество циклов заряда-разряда и создала собственный сплав типа $MmNi_5$, где Mm – смесь редкоземельных металлов, обеспечивающих характеристики металла типа "А". Именно поэтому батарея Prius такая дорогая.

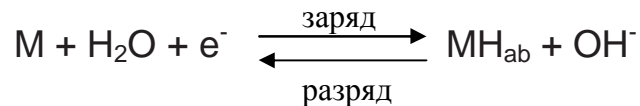
Теперь рассмотрим подробнее, какие реакции происходят на электродах NiMH элемента в процессе заряда и разряда.



Положительный
электрод



Отрицательный
электрод



Обозначения:

M – сплав, поглощающий водород

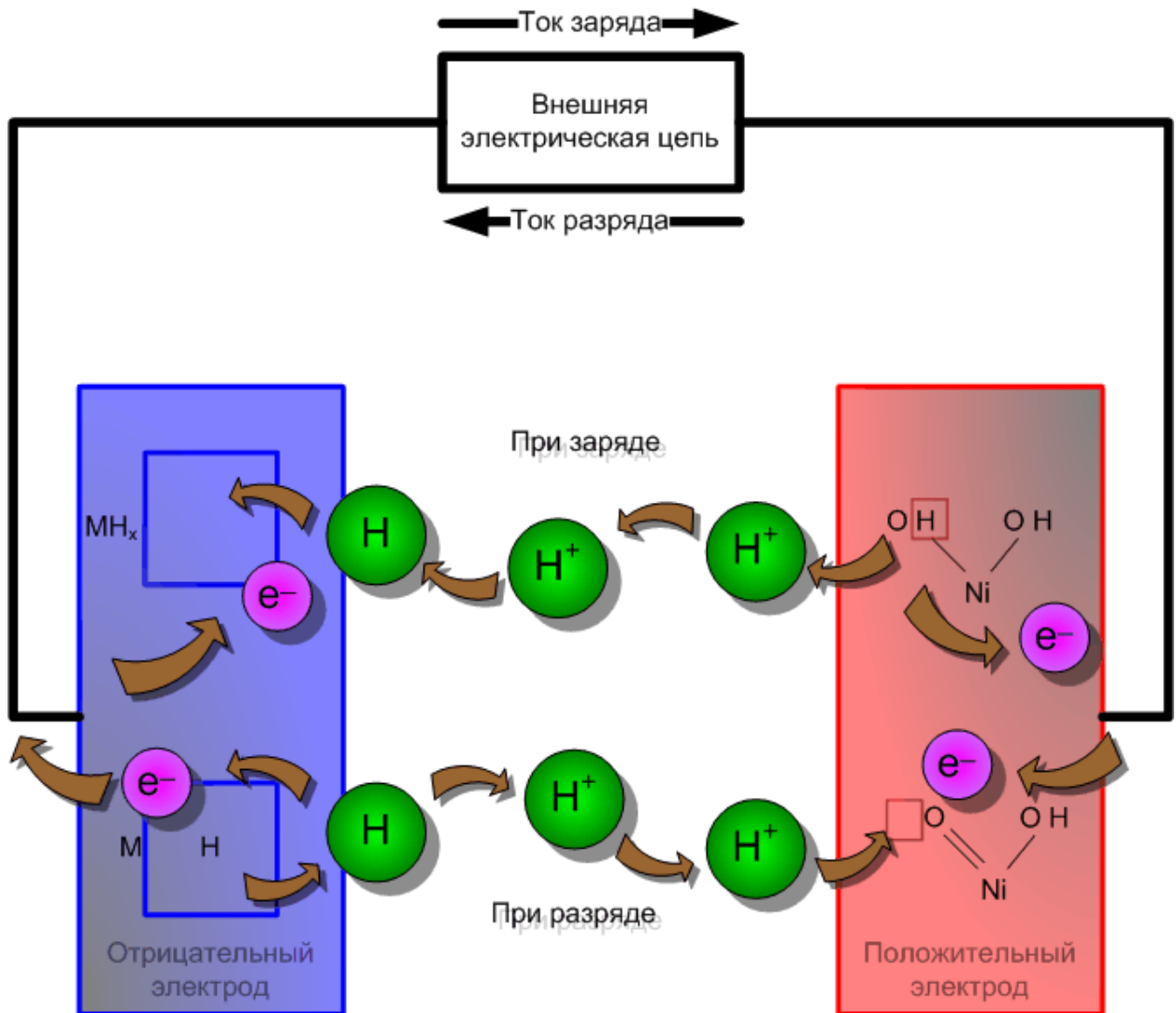
H_{ab} - поглощенный (absorbed) сплавом водород

e⁻ - электрон

Интересно заметить, что при цикле «заряд-разряд» электролит не изменяется – в нем не накапливается и не расходуется вещество. Зато поглощение ионов водорода (протонов) материалом катода во время процесса заряда позволяет избежать выделения газообразного кислорода на положительном электроде при чрезмерном заряде – достаточно сделать отрицательные электроды достаточной вместимости по водороду. Таким образом, элемент может быть герметичным. Но предел поглощения водорода существует, и после некоторого предела в элементе может начаться выделение газа. Поэтому на реальных элементах изготавливаются клапаны сброса аварийного давления, и все элементы ВВБ в автомобиле Prius соединены трубкой, газ из которой направляется в вентиляционное окно на левой задней стойке. Его, конечно, нельзя перекрывать, как это и написано на решётке- в целях безопасности.



На следующем рисунке схематично показаны процессы заряда и разряда NiMH элемента. Из рисунка понятно, откуда берется ток разряда и куда расходуется ток заряда.





Как работает ВВБ в автомобиле Prius.

Все модули высоковольтной батареи автомобиля Prius включены последовательно, поэтому через них всегда течет одинаковый ток заряда и разряда.

Здесь требуется небольшое отступление.

Как уже всем известно, при вращении двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на неподвижном или движущемся автомобиле Prius через устройство распределения мощности (PSD) приводится во вращение мотор-генератор MG1 (это устоявшееся обозначение) мощностью 18 кВт. Так вырабатывается электроэнергия, которая идет на зарядку ВВБ. Более того, если заряда не будет, то MG1 не будет оказывать сопротивления вращению солнечной шестерни планетарной передачи и автомобиль просто не сдвинется с места.

Отсылаю читателя к трудам Грэма Дэвиса, поскольку лучше него устройство Prius описать невозможно.

(Здесь <http://www.ecrostech.com/prius/original/PriusFrames.htm> можно посмотреть оригинальный сайт, а здесь <http://hybrids.ru/MainPage.htm> перевод). Далее в статье приводятся обозначения, соответствующие описанию Г. Дэвиса.

Итак, напряжение с генератора MG1 поступает через трехфазный выпрямительный мост на высоковольтную батарею. Через батарею течет ток-происходит зарядка. Эта же энергия может расходоваться для питания электромотора MG2, который непосредственно соединен с ведущими колесами автомобиля. В этом и состоит красота технического решения инженеров корпорации Toyota: подобно барону Мюнхгаузену, выдернувшему себя за волосы из болота вместе с лошастью, гибридная система с одной стороны, вращает корону (а значит, колеса автомобиля) планетарной передачи с помощью MG2, а с другой стороны- притормаживает солнечную шестерню, нагружая зарядным током MG1. В результате и машина едет, и электричество вырабатывается.

Вечного двигателя, конечно, так не получится: энергия движения поступает от ДВС и сгорания бензина, но кинетическая энергия движения автомобиля и лишняя энергия ДВС легко преобразуется в электроэнергию и запасается в батарее, а при необходимости снова отдается колесам автомобиля – в отличие от традиционных автомобилей, где кинетическая энергия движения превращается в тепло на тормозных колодках.

Но мы отвлеклись от режима работы ВВБ.

Напомню, что все модули ВВБ включены последовательно и через них всегда течет одинаковый ток. Но никто не возьмется утверждать, что модули работают в идеально одинаковых условиях – те, которые ближе к середине ВВБ, например, нагреваются больше. Кроме того, при изготовлении внутреннее сопротивление каждого элемента хоть немного, но отличается. Это означает, что падение напряжения при заряде на каждом элементе даже при одинаковом токе будет разным. Следовательно, все элементы будут приобретать заряд по-разному. И с течением времени возникнет существенная разница- одни элементы в силу хорошей «родословной» (низкого внутреннего сопротивления) будут глубоко разряжаться и хорошо заряжаться, а другие- «лодырничать», отдавая меньше



мощности и поэтому принимая меньше заряда. Если это продолжается месяцы и годы, то расхождение в состоянии элементов будет значительным.

Конечно, инженеры концерна Toyota предусмотрели режим тренировки батареи- иногда батарея разряжается более глубоко, чем обычно, а затем заряжается полностью. Контролирует этот процесс ECU ВВБ. В некоторой степени это обеспечивает тренировку и выравнивание заряда батареи, но каждый отдельный элемент контроллеру батареи недоступен: элементы упакованы по шесть штук в модуль, а на ECU выведены контрольные провода с каждой пары модулей- то есть от каждых двенадцати элементов.

В результате неравномерность заряда порождает неравномерную потерю ёмкости элементами. Есть еще один вредный процесс- кристаллизация на поверхности электродов солей и других паразитных веществ, то есть уменьшение активной поверхности электродов и как следствие- увеличение внутреннего сопротивления некоторых элементов, а значит, снижение общего выходного тока. То есть батарея не сможет обеспечить динамику (разгон), как у исправного автомобиля.

Когда возникает необходимость зарядки

Итак, ваша ВВБ хорошо поехала и, так сказать, свой долг уже отдала. Если взять обычный тестер (вольтметр с точностью измерений хотя бы до десятых долей вольта), то можно проконтролировать состояние батареи. Правда, должен сказать, что для этого потребуются снять заднее сиденье и крышку батареи, а также отстегнуть пластиковые изоляционные панельки на выводах модулей.

Обычно наши друзья японцы зачем-то ставят красную точку возле «плюсового» электрода, хотя там на пластмассе выдавлен вполне заметный знак «+».

Если вы добрались до модулей, измерьте напряжение на каждом модуле.

Примечание: необходимо соблюдать осторожность, так как на крайних выводах ВВБ может быть опасное напряжение- почти 300В. Убить, может, не убьёт, но долбануть может крепко. Так что языком выводы батарейки не проверяйте.

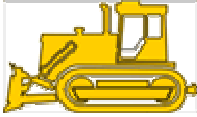
После измерения напряжения (лучше записать эти первоначальные значения) вы будете знать ответ на вопрос «зачем заряжать ВВБ?».

Разброс может оказаться большим- 1 или 2, а может, и 3 Вольта. Однако это не всё.

Напряжение на модуле не в полной мере отражает состояние модуля. Главный критерий- ЁМКОСТЬ. Ёмкость измеряется в ампер-часах, поэтому очевидно, что она характеризует способность батареи давать электрический ток во внешнюю цепь в течение длительного времени.

Батарея автомобиля Prius имеет номинальную ёмкость 6,5 А-ч, то есть в некотором идеальном случае батарея может выдавать ток 6,5 Ампер в течение одного часа. Или в течение 6,5 часов ток 1 Ампер.

Обычно номинальная ёмкость батареи обозначается латинской буквой С (от слова capacity - ёмкость). Для измерения ёмкости применяется режим разряда С/6 (разряд в течение 6 часов) или С/20 (разряд батареи за двадцать часов). Соответственно, необходимо нагрузить батарею таким образом, чтобы разрядный

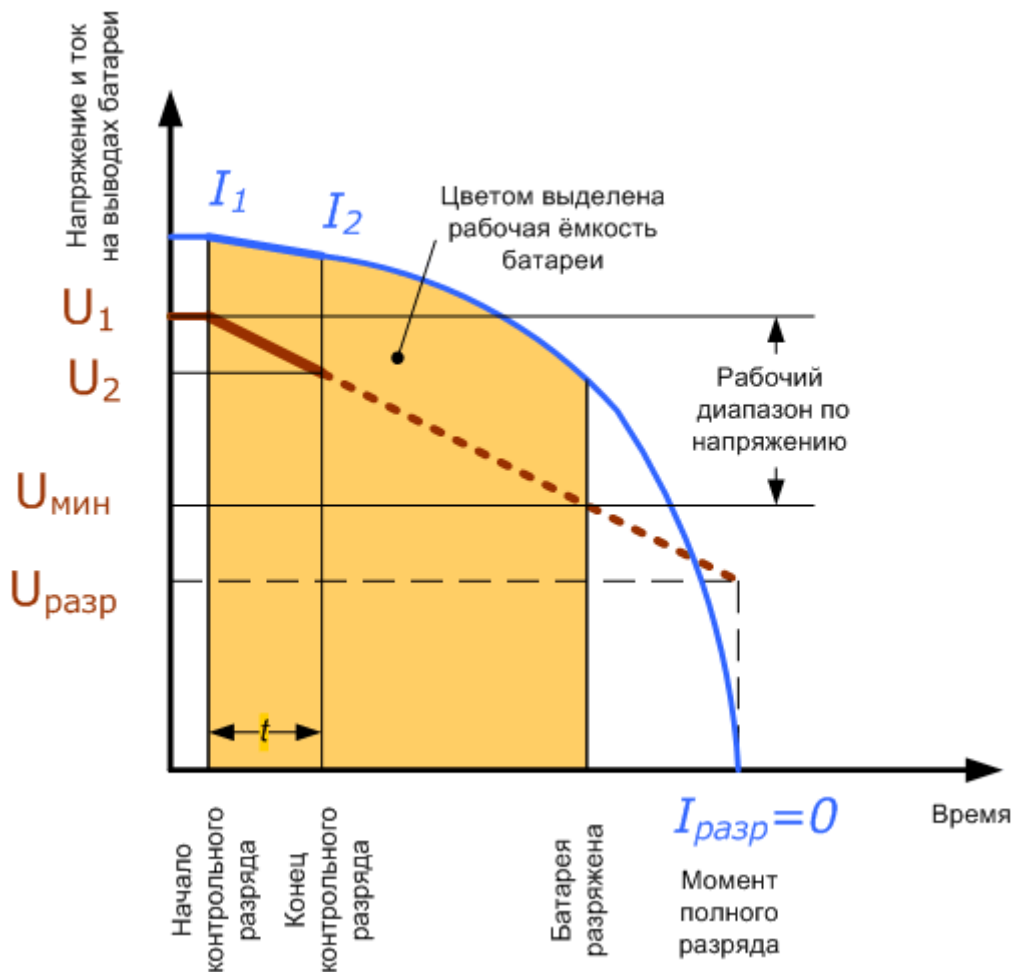


ток соответствовал величине $C/6$ или $C/20$. В случае с ВВБ $C/6$ равно примерно 1,1 Ампер, $C/20$ равно 0,33 А.

Чтобы создать такой ток, надо иметь резистор номинальным сопротивлением 250 Ом (для $C/6$) или 830 Ом (для $C/20$), при этом мощность резистора в первом случае должна быть не менее 250-300 Вт. Это должно быть устройство вроде кипятильника для стакана воды.

Вся система прямого измерения ёмкости всегда даёт неточный результат, поскольку при большом токе разряда получится ёмкость всегда меньше номинала, при малом токе - больше номинала. Да и в результате измерения батарея должна быть полностью разряжена. Поэтому ёмкость принято получать расчетным путём.

Батарея включается на разряд заметным током на некоторое заранее известное время. Производится измерение напряжения и тока на батарее в начале и в конце этого промежутка времени. Построив график, можно оценить время, при котором батарея окажется разряженной (следует отличать просто разряженную батарею и полностью разряженную батарею). На графике рабочая ёмкость батареи представлена закрашенной областью. Задача: зная значение I_1 , I_2 , U_1 , U_2 и время t , рассчитать площадь закрашенной фигуры. Любой желающий может на досуге поупражняться в геометрии.





Вообще **ёмкость**- это количество электричества, запасённое в батарее или, как учили в седьмом классе на уроках физики, заряд - и измеряется в Кулонах. Единица *Ампер-час* связана с *Кулоном* простым масштабным коэффициентом и используется традиционно для характеристики ёмкости аккумуляторных батарей.

Почти по этой методике производится **«тест с фарами»**, который рекомендует герой форума autodata Штирлиц: ВВБ нагружается включением ближнего света фар при полном заряде. Через некоторое время система управления автомобиля решает, что батарея достаточно разрядилась и включает ДВС, чтобы снова зарядить батарею. Время между началом эксперимента и началом заряда батареи показывает, насколько быстро падает напряжение на ВВБ под нагрузкой. Тем самым можно оценить, какова ёмкость ВВБ в целом. Для исправной батареи это время должно быть не менее 30 минут (данные Штирлица). Если время меньше - значит, ёмкость ВВБ понижена. Это хороший способ быстрой диагностики общего состояния батареи.

Достоинство этого метода является и его недостатком: такая диагностика дает только общее представление о батарее, состояние отдельных модулей может быть очень разным. Как мы уже обсуждали, с течением времени некоторые модули работают больше и находятся в лучшем состоянии, а некоторые - лодырничают и теряют ёмкость. И здесь возникает задача, у которой есть красивое и непонятное название- ЭКВАЛИЗАЦИЯ. Непонятное оно только на первый взгляд, так как происходит от английского слова equal – равенство. Следовательно, ЭКВАЛИЗАЦИЯ по-русски означает ВЫРАВНИВАНИЕ.

Поскольку мы не можем добраться до каждого элемента (они недоступны внутри модуля), мы должны выровнять заряд хотя бы на каждом из 38 модулей. Выровнять - значит, сделать одинаковым.

Итак, вырисовывается задача, точнее, техническое задание на зарядное устройство.

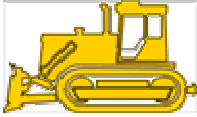
Оно должно:

- Работать с одним модулем 7,2В.
- Измерять токи заряда и разряда, протекающие через модуль.
- Измерять напряжение на выводах модуля.
- Уметь расчетным путем оценивать ёмкость модуля.
- Уметь заряжать и разряжать модуль по определенному алгоритму.
- Обеспечивать безопасность процесса заряда.

Шайтан-девайс: что сделано.

Общая идея сформировалась в середине января 2006 года. В марте уже работал макет, но законченный прибор получился только в июне. Назвал я его «Шайтан-девайс», поскольку на форуме autodata.ru кто-то так назвал прибор еще в период обсуждений.

В настоящее время отвечающее всем вышеперечисленным требованиям зарядно-тренировочное устройство для модулей ВВБ автомобиля Prius испытывается у известных заинтересованным лицам Миража и Михаила.



Как работает «Шайтан-девайс»?

При подключении модуля возможны два режима- тестирования (измерения ёмкости) и эквализации (выравнивания заряда).

В режиме тестирования модуль включается на разрядное сопротивление 3 Ома приблизительно на одну минуту. При этом производится измерение напряжения модуля под нагрузкой в начале и конце цикла разряда, а также измерение разрядного тока в начале и конце цикла. После окончания цикла микропроцессор делает расчёт и индицирует расчетное значение ёмкости. Для упрощения обработки данные выводятся в виде двузначного шестнадцатиричного числа от 0x00 до 0xFF. Несмотря на непривычную форму представления, оценить ёмкость можно вполне достоверно. Когда Шайтан-девайс выдает код C=03 или C=05, очевидно, что мы имеем дело с сильно разряженным модулем, потерявшим ёмкость.

В режиме эквализации производится измерение напряжения холостого хода модуля и если оно превышает определенное пороговое значение напряжения, то включается разряд. Модуль разряжается до порогового значения, после этого начинает заряжаться. Если же напряжение при первом измерении меньше порога, заряд начинается сразу.

Заряд производится импульсами длительностью 250 мс с паузой между импульсами длительностью 20 мс. Значение тока заряда не превышает 400мА (мы поосторожничали и сделали ток заряда менее 0,1С). После каждой минуты заряда делается небольшая пауза для «успокоения» модуля и производится измерение напряжения. Если достигнуто некоторое **предельное напряжение** (оно сейчас установлено на уровне приблизительно 7,1 В), заряд прекращается и модуль отключается от прибора.

Результаты «полевых» испытаний показали: «Шайтан-девайс» работает в ожидаемом режиме. Правильно оценивает ёмкость модулей. При заряде обеспечивает нормальный уровень контроля.

Проблемы выявились такие:

неудобно работать с устройством, поскольку время подъема до предельного напряжения для одного модуля получается приблизительно 10-12 минут. Через это время кто-то должен подойти к прибору, переключить провода с «крокодилами» на следующий модуль и перезапустить прибор;

поскольку зарядный ток весьма мал, за эти десять минут в модуль поступает заряд не более $0,3A \cdot 10/60ч = 0,05 A \cdot ч$. То есть полный заряд в 6,5 А·ч. можно сообщить модулю «всего» за 130 циклов или примерно за 22 часа. А модулей в батарее 38...

Поэтому пока алгоритм обработки видится таким: пройти все модули батареи (провести по одному циклу для каждого модуля)- на это уйдет часов шесть. Затем тестером измерить напряжение на модулях (а напряжение на модуле с плохой ёмкостью достаточно быстро падает с течением времени) и провести повторные циклы с теми модулями, которые сильно потеряли напряжение. Возможно, так придется делать не один и не два раза. Да, дело



трудоёмкое и длительное. Возможно, что 10-12 минут- это время, характерное как раз для модулей с низкой ёмкостью. «Живая» батарейка будет заряжаться дольше.

Шайтан-девайс: планы.

Планы дальнейшей разработки вытекают из выявленных проблем.

Во-первых, требуется сделать процесс переключения между модулями автоматическим.

Во-вторых, надо повышать ток заряда, но здесь есть опасность получить маленький Чернобыль. Определить, какой ток заряда безопасен - одна из основных задач. Видимо, исправный модуль с хорошей ёмкостью можно заряжать весьма значительным током. А вот сильно разряженный модуль начинает «кипеть» и раздуваться. Здесь, возможно, влияет еще и процесс потери активной площади поверхности электродов за счет засорения поверхностей оседающими паразитными веществами.

В-третьих, прибор надо делать 38 (40)- канальным, чтобы обрабатывать сразу все модули, тогда время обслуживания батареи резко сократится. Если процесс будет идти автоматически, то всего через сутки батарея будет обслужена и выровнена. Но на такие затраты (а это серьезные затраты по изготовлению) надо идти с четким пониманием технологии эквализации и экономической эффективности затрат. Думаю, что первая модель Шайтан-девайса поможет наработать опыт и принять правильное решение.

Есть еще некоторые задумки, о которых пока рано распространяться.

Заключение.

Подведём некоторые итоги, сделаем выводы.

1. Исправная батарея **не требует обслуживания** со стороны водителя автомобиля.
2. Проверить состояние батареи проще всего с помощью «**теста с фарами**».
3. Поскольку у нас эксплуатируются автомобили самых ранних выпусков, причем условия эксплуатации намного более жесткие, чем в Японии (холодная зима, например), то батареи у многих машин находятся не в лучшем состоянии.
4. Заряжать отдельный модуль, вынутый из пакета ВВБ, обычным зарядным устройством – **НЕЛЬЗЯ!** Он неминуемо **раздуется и взорвется**, так как тонкие пластиковые боковые стенки не могут сдержать давления внутри модуля.
5. В крайнем случае, если, например, после длительного хранения ВВБ разрядилась настолько, что ECU ВВБ не разрешает завестись автомобилю, можно подзарядить батарею **ЦЕЛИКОМ** от сети 220В, собрав нехитрое зарядное устройство из выпрямительного диода и балластного сопротивления (например, лампочки 220В мощностью 40-60Вт). Это **ОПАСНО ДЛЯ ЖИЗНИ** и делать это можно только тому, кто понимает, что делает. Например, имеет группу допуска по электробезопасности не ниже III. Прежде всего необходимо удостовериться, что батарея полностью



отключена от цепей автомобиля, поскольку выводы батареи могут оказаться под напряжением сети 220В и повредить внутренние цепи автомобиля. И, конечно, не прикасаться к батарее, выводам, корпусу, деталям выпрямительного устройства. Кроме того, при таком способе заряда есть большая опасность взрыва отдельных модулей (наиболее плохих- с малой ёмкостью, плохо заряженных). Нельзя оставлять заряжаемую батарею **без присмотра**, нельзя заряжать **долго**. Минут 10-20 хватит, чтобы «освежить» заряд батареи и, **отключив зарядку**, завести автомобиль. Далее система управления зарядит батарею сама.

6. Предохранительный клапан, установленный на каждом пластмассовом модуле, защищает модуль от разрыва внутренним давлением газа. Практика показывает, что если батарея в очень плохом состоянии, отдельные (потерявшие ёмкость) модули могут растрескаться и даже взорваться, при этом может произойти выброс электролита- опасной химической жидкости. Надо помнить, что электролит ВВБ – **щёлочь**, поэтому нейтрализовать его при попадании на кожу можно **кислотой**- например, уксусом или раствором борной кислоты. Уксус, конечно, должен быть разведен водой. На металл кузова электролит не действует.
7. Зарядно-тренировочное устройство для модулей высоковольтной батареи автомобиля Prius, названное нами «Шайтан-девайс», уже проходит натурные испытания. К сожалению, эксперименты проводятся с батареями, находящимися в очень плохом состоянии, что не позволяет получить быстрого «победного» результата. Однако можно утверждать, что измерение ёмкости модуля производится вполне объективно. Над режимом эквализации еще предстоит поработать- подобрать режимы, улучшить сервис.
8. Работы продолжаются, следите за нашими публикациями.

© Burrdozel, июнь 2006г