



## КРИТЕРИЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО АВТОМОБИЛЯ

В статье предлагается методика экономического сравнения различных вариантов гибридных автомобилей. По предлагаемой методике можно определить оптимальную характеристику тяговой батареи гибридного автомобиля. Используя методику, можно сравнить разные типы автомобилей.

Гибридный автомобиль, выбор емкости тяговой батареи, Plug-In Hybrid.

Тяговая батарея – один из самых дорогих элементов электромобиля. Согласно данным специалистов BloombergNEF [1] стоимость хранения 1 кВт·ч электроэнергии в 2020 году составляла 137 \$.

Стоимость тяговой батареи для электромобиля можно оценить в сумму от 5500\$ (для батареи емкостью 40 кВт·ч) до 13000\$ (для батареи емкостью 95 кВт·ч). При этом некоторые эксперты [2] указывают еще более высокую стоимость тяговых батарей.

До санкций со стороны западных стран 2022 года стоимость только тяговой батареи составляла около 40–50 % от стоимости аналогичного по классу автомобиля с бензиновым двигателем, что делает электромобиль сопоставимого класса примерно на 30 % дороже. При этом сокращение емкости тяговой батареи (и стоимости) находится в обратной зависимости с другим важнейшим технико-эксплуатационным показателем – пробегом на одной зарядке.

Решение оптимизации проблем экологичности (выбросов CO<sub>2</sub>), стоимости электромобиля и пробега на одной зарядке – в создании подключаемого гибридного автомобиля с характеристиками, обеспечивающими заданный показатель качества (минимальные затраты на приобретение, эксплуатацию, удобство/доступность пользования, воздействие на окружающую среду).

Все 4 показателя измеряются в разных физических значениях. Используя методику, можно выбрать оптимальную конфигурацию гибридного автомобиля и сравнить с чистым электромобилем.

1. Выбросы CO<sub>2</sub> измеряются в граммах на 100 км пробега.

2. Стоимость автомобиля выражается в денежных величинах.

3. Пробег на одной зарядке измеряется в километрах. Может быть выражен в потере времени (часов) на повторную зарядку при пробеге на дальние расстояния.

4. Экономия при работе на электроэнергии по сравнению с органическими топливами выражается в денежных величинах.

Таким образом, целевая функция определения параметров гибридного автомобиля примет вид:

$O = f(\text{Экол, Цена, Время, Экспл}) \rightarrow \min$ , (1)  
где Экол – экологический эффект в денежном выражении при использовании сравниваемых автомобилей;

Цена – разница в стоимости сравниваемых автомобилей;

Время – потери времени за зарядку при использовании батарей разной емкости;

Экспл – разница в затратах на эксплуатацию сравниваемых автомобилей.

При выборе критических характеристик гибридного автомобиля или сравнения разных типов автомобилей оптимальным будет являться тот, у которого суммарные затраты (целевая функция 1) будут минимальны.

Для объединения в одной целевой функции все 4 показателя должны быть переведены в денежное выражение.

1. Выбросы CO<sub>2</sub>. В нашей стране существует методика исчисления вреда, причиненного атмосферному воздуху [3–5]. Расчет по этой методике и нормативам позволит обоснованно оценить влияние экологического фактора, примененное в денежном выражении. Эти затраты не несет потребитель – владелец автомобиля. Поэтому критерий оптимальности должен учесть данный фактор в двух версиях – с ним и без него.

2. Стоимость автомобиля, влияющая на значение целевой функции минимизации издержек, складывается из стоимости (емкости) тяговой батареи и стоимости (мощности) двигателя внутреннего сгорания с генератором. Стоимость кузова, подвески, рулевого управления и пр. у сравниваемых типов автомобилей практически одинаковы и ими можно пренебречь. При сравнении автомобилей с ДВС и электромобилей дополнительно необходимо учитывать стоимость ДВС, трансмиссии и электромотора, управления.

Затраты на приобретение являются разовыми и выглядят на графике целевой функции как горизонтальная прямая. При этом разность в стоимости сравниваемых автомобилей должна быть дополнительно учтена в текущих затратах. Рекомендуется для более

дорогостоящего сравнимого варианта автомобиля учесть ежегодные дополнительные затраты, рассчитанные с условием возможного инвестирования разницы в стоимости и расчета дисконтированных потоков по формуле:

$$DI = \sum_{n=1}^n \frac{\Delta I}{(1+r)^n}, \quad (2)$$

где  $\Delta I$  – разница в инвестициях рассматриваемых вариантов, руб.;

$i$  – расчетный год;

$r$  – ставка дисконтирования. Рекомендуется взять ставку рефинансирования Центрального Банка РФ.

3. Для учета в целевой функции пробега на одной зарядке следует определить вероятность работы подключаемого гибридного автомобиля на электротяге и переход на энергию сгораемого в ДВС топлива. Очевидно, что при пробегах на малые расстояния автомобиль полностью работает на энергии, запасенной в тяговых батареях в режиме 100 % электромобиля. При пробегах на значительные расстояния и выработке запасов электроэнергии тяговых батарей (суперконденсаторов) автомобиль переходит в режим работы на ДВС. Вероятности (доли пробегов) на электротяге/ДВС зависят от емкости батарей и режимов эксплуатации автомобиля. Суточные пробеги должны быть детально изучены для населенных пунктов разных размеров.

Для перевода долей пробегов на использовании энергии батарей/ДВС в денежное выражение необходимо воспользоваться формулой:

$$Z_{\text{время}} = \frac{P_{\text{ДВС}} \cdot L_{\text{год}} \cdot S_{\text{час}}}{V_{\text{расч}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{ДВС}}$  – доля работы гибридного автомобиля на ДВС;

$L_{\text{год}}$  – годовой пробег автомобиля, км. Берется из анализа эксплуатационных показателей для расчетных населенных пунктов;

$V_{\text{расч}}$  – расчетная скорость при пробеге на ДВС, км/ч. При включении ДВС на загородной дороге 80–100 км/ч; при движении в городских условиях 14–20 км/ч;

$S_{\text{час}}$  – средняя часовая ставка оплаты работников.

4. Сравнение годовых затрат на топливо/электроэнергию при сравнении рассматриваемого гибридного автомобиля с электромобилем определяется по формуле:

$$Z_{\text{топл}} = \frac{P_{\text{ДВС}} \cdot ((N_{\text{бенз}} \cdot C_{\text{бенз}}) - (N_{\text{эл}} \cdot C_{\text{эл}})) \cdot L_{\text{год}}}{100}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{бенз}}$  – норма расхода ископаемого топлива, литров (кг, м<sup>3</sup>)/100 км;

$C_{\text{бенз}}$  – стоимость топлива ископаемого происхождения, руб/литр (кг, м<sup>3</sup>);

$N_{\text{эл}}$  – норма расхода электроэнергии, кВт·ч/100 км;

$C_{\text{эл}}$  – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч.

При сравнении электромобиля с автомобилем с ДВС доля работы на ископаемом топливе ( $P_{\text{ДВС}}$ ) принимается равной 1.

Кроме разности в стоимости энергии, расходуемой на движение автомобиля, необходимо учитывать еще один фактор. Тяговая батарея имеет ограниченный ресурс, существенно меньше, чем ресурс автомо-

биля. Это значит, что за весь срок службы автомобиля владельцам потребуется поменять и дорогостоящий блок тяговых батарей. Ресурс тяговой батареи исчисляется в циклах заряда/разряда. Очевидно, что при равных пробегах автомобиль, имеющий меньшую емкость батареи, быстрее исчерпает ресурс. Средние годовые затраты на обновление тяговых батарей определяются по формуле:

$$Z_{\text{батар}} = \frac{N_{\text{эл}} \cdot L_{\text{год}} \cdot R \cdot C_{\text{бат}}}{100 \cdot Q}, \quad (5)$$

где  $R$  – ресурс батареи в циклах;

$C_{\text{бат}}$  – цена батареи, руб.;

$Q$  – емкость батареи, кВт·ч.

Так как цена батареи напрямую зависит от ее емкости, а удельная стоимость батареи ( $S_{\text{бат}}$ ) известна, то формула (5) примет вид:

$$Z_{\text{батар}} = \frac{N_{\text{эл}} \cdot L_{\text{год}} \cdot R \cdot S_{\text{бат}}}{100}, \text{ руб/год.} \quad (6)$$

Минимальное значение целевой функции 1 для различных вариантов позволит определить оптимальный вариант главной характеристики гибридного автомобиля – емкости батареи. Параллельно можно рассчитать варианты использования суперконденсаторов вместо батарей.

Окончательным результатом расчетов может стать сравнение оптимальных вариантов гибридного подключаемого автомобиля с батареей, суперконденсаторами, чистого электромобиля и базового автомобиля с ДВС.

## Литература

1. Battery Pack Prices Cited Below \$100/kWh for the First Time in 2020, While Market Average Sits at \$137/kWh. – URL: [about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/](http://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-cited-below-100-kwh-for-the-first-time-in-2020-while-market-average-sits-at-137-kwh/) (дата обращения: 10.10.2022) – Текст : электронный.

2. Когда электромобили сравняются по стоимости с бензиновыми машинами. – URL: [trashbox.ru/link/when-electric-cars-will-be-cost-like-ordinary-cars](http://trashbox.ru/link/when-electric-cars-will-be-cost-like-ordinary-cars) (дата обращения: 10.10.2022). – Текст : электронный.

3. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды (утвержден Распоряжением Правительства РФ от 8 июля 2015 г. № 1316-р). – URL: [www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71026758/](http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71026758/) (дата обращения: 10.10.2022) – Текст : электронный.

4. Методика исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды приказом Минприроды России от 28 января 2021 года № 59. – URL: [docs.cntd.ru/document/573536168](http://docs.cntd.ru/document/573536168) (дата обращения: 10.10.2022) – Текст : электронный.

5. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах : Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 № 913 (редакция от 24.01.2020). – URL: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_204671/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_204671/) (дата обращения: 10.10.2022) – Текст : электронный.

*A.V. Vostrov*  
*Vologda State University*

### **OPTIMIZATION CRITERION FOR DETERMINING HYBRID CAR CHARACTERISTICS**

The article proposes a methodology for economic comparison of various hybrid car variants. According to the proposed methodology, it is possible to determine the optimal characteristics of the traction battery of a hybrid car. Using the methodology, you can compare different types of cars.

Hybrid car, selecting the capacity of the traction battery, plug-in hybrid.