

## Нужна ли коробка передач автомобилю с электроприводом?

# 06, июнь 2014

DOI: 10.7463/0614.0715866

Баулина Е. Е., Круташов А. В., Серебряков В. В.

УДК 629.331

Россия, Университет машиностроения

[baulina@mami.ru](mailto:baulina@mami.ru)

[vvs@mami.ru](mailto:vvs@mami.ru)

### Введение

В последнее время широкое распространение получают автомобили с электроприводом, к которым относятся электромобили и автомобили с комбинированными энергетическими установками. Появление их вызвано ухудшающейся экологической обстановкой и ужесточающимися требованиями к нормативным показателям вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания. Производители автомобилей ищут возможности выполнения этих норм и, естественно, обращаются к идее использования в качестве силового агрегата электродвигателя, так как характеристики электродвигателя как силового агрегата выглядят наиболее предпочтительными для применения его на транспортных средствах.

Однако, преобразование крутящего момента электродвигателя при передаче его к ведущим колёсам с использованием только одного редуктора (главной передачи) в трансмиссии автомобиля может быть недостаточным или, как минимум, требующим дополнительных исследований с целью нахождения путей наиболее эффективного использования его в качестве силового агрегата.

Известно что, максимальное значение крутящего момента электродвигателя сохраняется в достаточно широком диапазоне частоты вращения его вала. Считается, что в этом случае дополнительный редуктор для преобразования крутящего момента в трансмиссии автомобиля не требуется. В тоже время характеристика мощности электродвигателя существенно не отличается от характеристики мощности двигателя внутреннего сгорания, так как обычно максимальные значения его мощности также как у ДВС находятся в узком диапазоне частот вращения. Исходя из этого, напрашивается вывод о том, что в приводе автомобиля с электродвигателем должен быть дополнительный редуктор.

Исследованию целесообразности применения дополнительного редуктора при передаче крутящего момента от электродвигателя к ведущим колёсам автомобиля посвящена данная статья.

## Основная часть

Как было отмечено выше, автомобили, использующие в приводе электродвигатели – это, в основном, автомобили с КЭУ и электромобили. В зависимости от назначения их можно условно разделить на следующие группы.

1. Автомобили, предназначенные главным образом для движения по городу. Считается, что в их высокой динамике нет необходимости, она определяется режимом движения в городском цикле.

2. Автомобили универсального назначения. Эксплуатируются не только в городе. Режим движения этих автомобилей может быть любым. Им нужна высокая динамика и, возможно, часто потребуется двигаться с максимальной скоростью, определяемой максимальной мощностью электродвигателя.

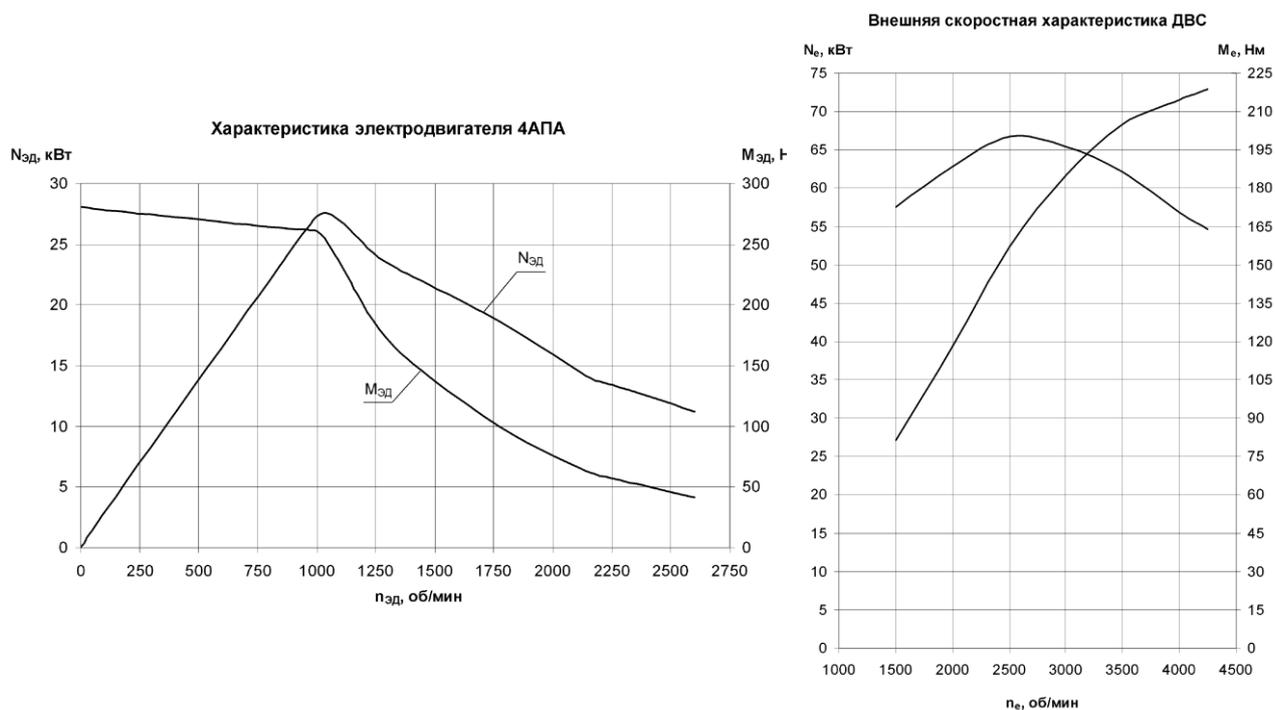
3. Автомобили, использующие тяговые электродвигатели для дополнительных расширяющих функций – реализации несимметричной тяги на колёсах с целью повышения проходимости, улучшения управляемости [1, 2]. Электродвигатели таких автомобилей могут располагаться вблизи колёс или встраиваться непосредственно в колёса.

4. Автомобили специальные, суммарная мощность электродвигателей которых обеспечивает максимальную реализацию сцепного веса в широком диапазоне частот вращения вала двигателя без применения дополнительных редукторов.

Автомобили 3 и 4 групп могут не иметь редукторов, установленных за электродвигателем, а для определения необходимости установки редукторов (и числа передач в них) за электродвигателями, использующимися в приводе автомобилей 1 и 2 групп, требуется анализ их тягово-скоростных характеристик.

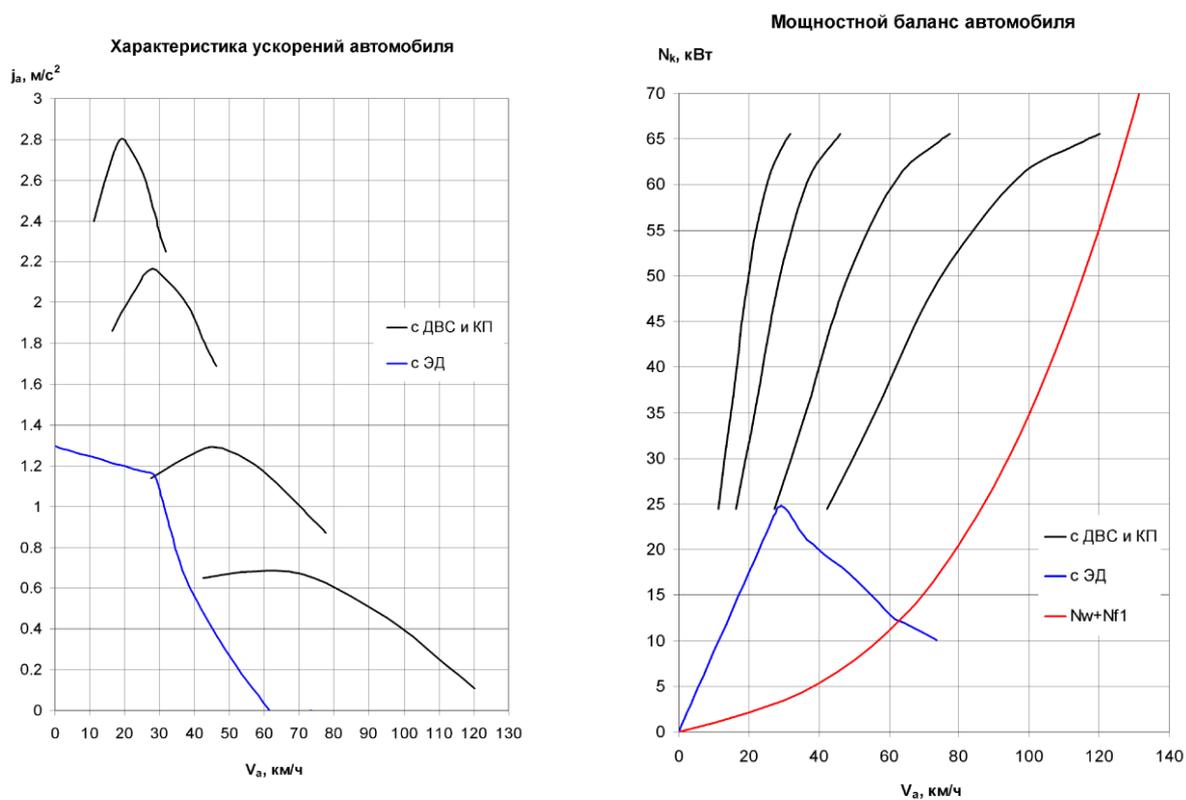
Рассмотрим случай применения электродвигателя на автомобилях с КЭУ. Такие автомобили содержат ДВС и, как минимум, одну обратимую электромашину. Назначение таких автомобилей – снижение расхода топлива с целью улучшения экологии мегаполисов. Поскольку автомобили с КЭУ эксплуатируются в городе, то основной режим их движения – городской цикл. Считается, что движение в городском потоке характерно относительно небольшими значениями ускорений, и если крутящего момента электродвигателя хватает для трогания с места и разгона до небольшой скорости с ускорениями, не сдерживающими транспортный поток, то необходимая динамика автомобилю обеспечена. Таким образом, казалось бы, высокая динамика в электротяге такому транспорту не нужна.

Действительно, расчёты и испытания экспериментального автомобиля-лаборатории, созданного в МАМИ на базе УАЗ-3153 с КЭУ [3], выполненной по параллельной схеме, показывают, что для обеспечения движения в городском цикле мощности установленного на нём электродвигателя в совокупности с мощностью ДВС достаточно. Характеристики двигателей рассматриваемого автомобиля приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Характеристики двигателей экспериментального автомобиля-лаборатории УАЗ-3153 с КЭУ.

Мощностной баланс и характеристика ускорений (рис. 2) показывают, что динамика автомобиля достаточна для движения в городском цикле, приведённом в Правилах №83 ЕЭК ООН.



**Рис. 2.** Характеристика ускорений и мощностной баланс экспериментального автомобиля-лаборатории УАЗ-3153 с КЭУ.

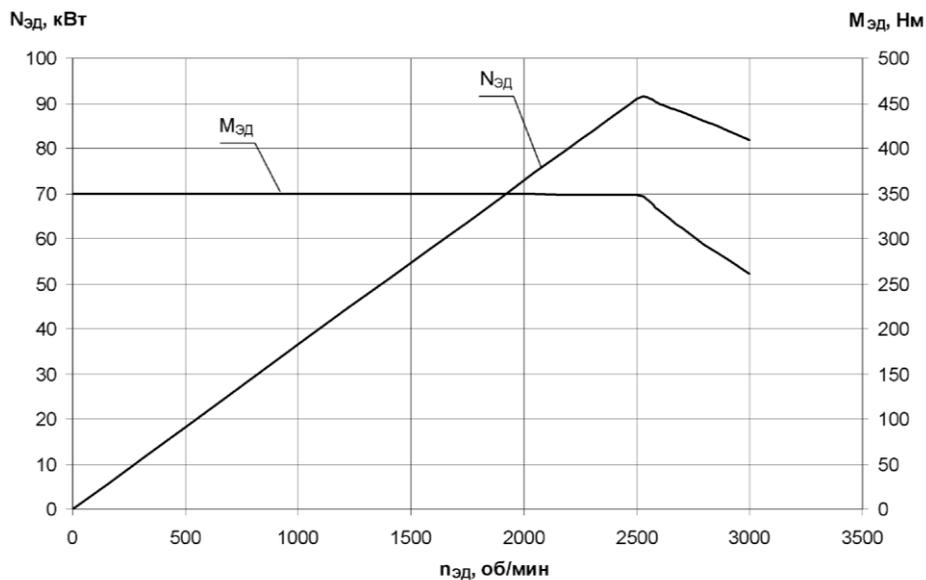
Максимальные ускорения, заданные этим циклом, не превышают  $1.04 \text{ м/с}^2$  [4]. Для трогания с места и разгона до скорости порядка 30 – 35 км/ч, равномерного движения с этой и несколько большими скоростями крутящего момента и мощности электродвигателя достаточно. При необходимости, согласно алгоритму работы КЭУ, подключается ДВС и в зависимости от избытка его мощности в коробке передач может быть включена 3-я или 4-я передачи. Таким образом, коробка передач при движении в городском цикле используется только в режиме ДВС и в этом случае для преобразования крутящего момента достаточно 2-х передач.

Некоторые КЭУ могут не иметь механической трансмиссии. Например, КЭУ, выполненные с использованием последовательной схемы. Общеизвестно, что её применение целесообразно в транспортных средствах, эксплуатация которых характеризуется либо выражено переменными режимами движения с множеством остановок (городские автобусы), либо специфическими условиями работы, связанными с длительным использованием обратимой электромашин в режиме генератора (лесная техника, военная техника и прочая спецтехника).

В последние 2-3 года начал расти интерес к КЭУ, сочетающей в себе функциональность последовательной и параллельной схем. Отмечается появление запатентованных разработок в этой области [5, 6], а также появились первые автомобили с КЭУ, построенными с применением последовательно-параллельной схемы. Простейшую реализацию этой схемы КЭУ можно получить, дополнив последовательную схему КЭУ механической связью между двумя электромашин и обеспечив возможность эту связь разрывать при помощи соединительной муфты. При разомкнутой муфте реализуется последовательная схема, а при замкнутой – параллельная. Это позволяет выбрать условия, в которых будут использоваться преимущества каждой из схем (например, последовательная – в затрудненном городском движении, а параллельная – на автостраде).

Последовательно-параллельная схема КЭУ ставит вопрос о необходимости коробки передач в трансмиссии. В МАМИ спроектирован автомобиль с КЭУ, построенной по последовательно-параллельной схеме на базе УАЗ-2360. На автомобиле установлен дизельный ДВС ЗМЗ-5143.10 и сравнимые с ним по мощности две обратимые электромашин производства НПП "Тэмп". Внешние скоростные характеристики ДВС и электромашин приведены на рис. 3.

### Характеристика электродвигателя производства НПП Тэмп



### Внешняя скоростная характеристика ДВС

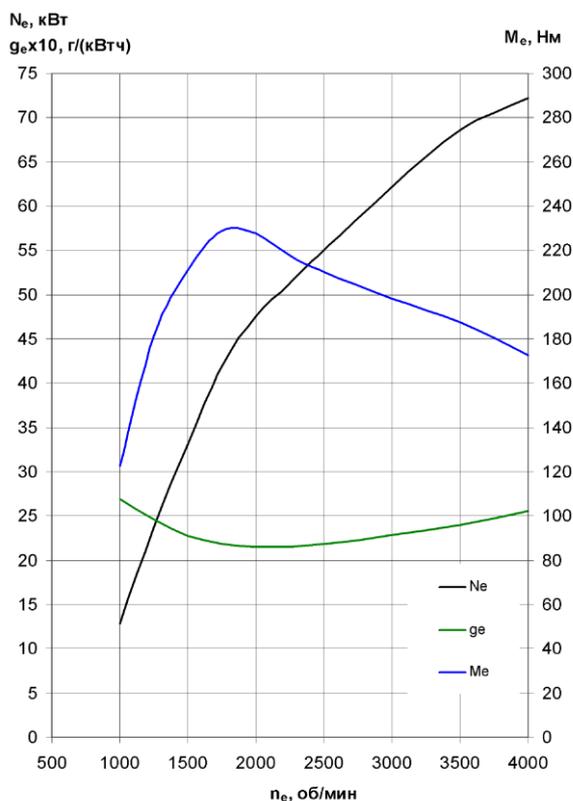
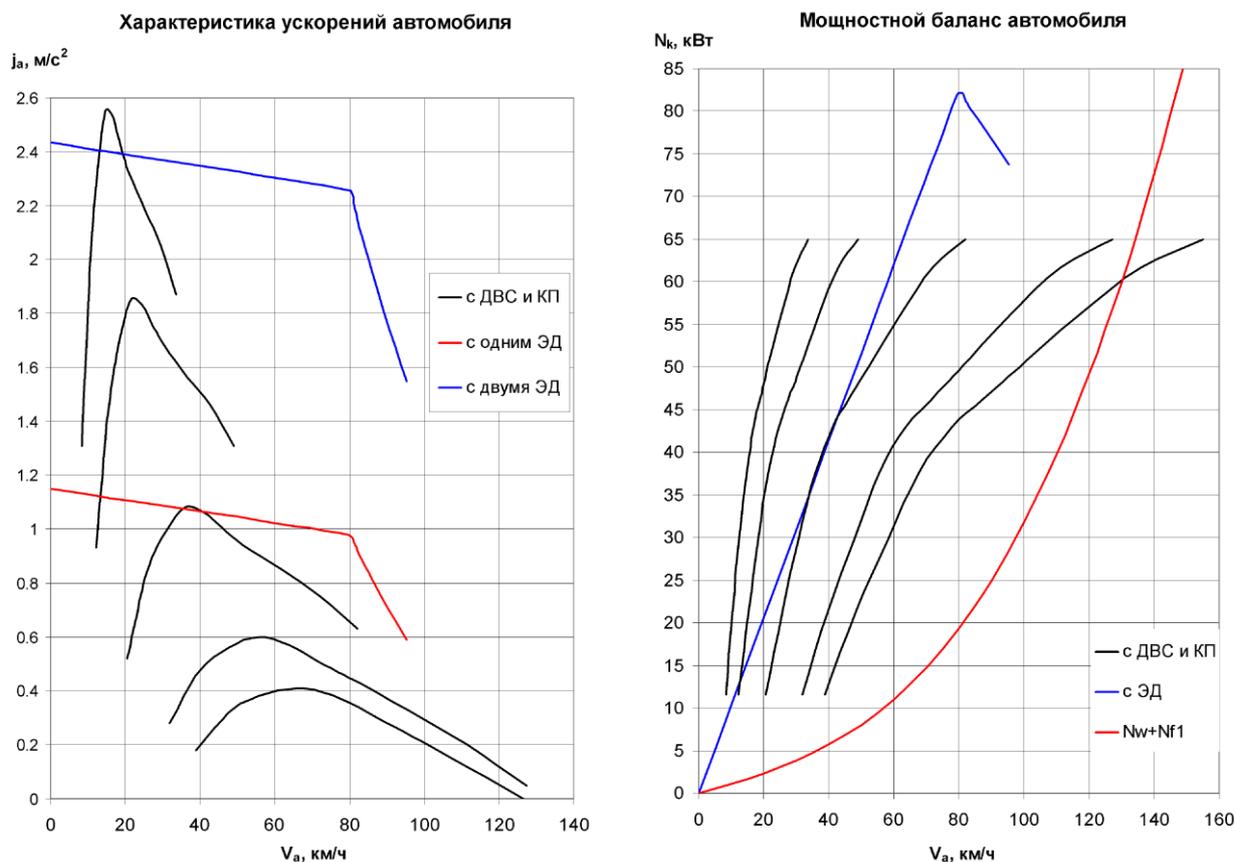


Рис. 3. Внешние скоростные характеристики ДВС ЗМЗ-5143.10 и обратимой электромашины НПП "Темп"

Согласно мощностному балансу, приведённому к колёсам (рис. 4), электродвигатель этого автомобиля можно использовать в более широком диапазоне скоростей при равномерном движении, но есть ограничения при разгоне. Например, при реализации последовательной схемы используется только одна электромашина, которая обеспечит необходимую динамику только в режиме городского цикла, так как максимальные значения уско-

рений автомобиля в данном случае порядка  $1 \text{ м/с}^2$  (рис. 4). В другом же диапазоне ускорений динамика автомобиля при использовании только одного электродвигателя будет существенно хуже, чем с ДВС и коробкой передач: максимальные ускорения, обеспечиваемые только одним электродвигателем составляют  $1.15 \text{ м/с}^2$ , а обеспечиваемые ДВС при включении первой передачи в коробке передач –  $2.55 \text{ м/с}^2$ . Поэтому, либо требуется второй такой же электродвигатель, либо редуктор, установленный за электродвигателем.



**Рис. 4.** Характеристика ускорений и мощностной баланс автомобиля с ДВС и электродвигателями на примере УАЗ-2360.

Установка второго электродвигателя позволит использовать автомобиль с КЭУ не только как городской, но и как автомобиль универсального назначения с динамикой, соответствующей автомобилю с ДВС и традиционной трансмиссией. Максимальные ускорения на электротяге в этом случае сопоставимы с ускорениями, обеспечиваемыми ДВС в совокупности с коробкой передач (рис. 4).

Согласно приведённым на рис. 3 характеристикам как у ДВС, так и у электродвигателя максимальная мощность находится в узком диапазоне частот вращения, и характеристики мощностного баланса автомобиля с электродвигателем и с ДВС без коробки передач принципиально не отличаются (рис. 4). Движение автомобиля в городском цикле будет обеспечено на электротяге и без коробки передач, но в других условиях, отличных от городского цикла, электродвигатель обеспечит трогание автомобиля с места без сцепления, однако, в диапазоне низких скоростей у автомобиля может не быть достаточной

мощности для разгона, что можно компенсировать установкой за электродвигателем коробки передач. В этом случае автомобиль с КЭУ можно будет эксплуатировать не только в режиме городского цикла, но и в режимах интенсивных разгонов и торможений, свойственных автомобилям универсального назначения.

Строго говоря, у автомобиля с КЭУ ускорения и в режиме городского цикла могут превышать  $1 \text{ м/с}^2$ . Например, в типизированном городском цикле, используемом для оценки топливной экономичности автомобилей, приведённом в Правилах ЕЭК ООН №83, максимальные значения ускорений составляют  $1.04 \text{ м/с}^2$ , в цикле Federal Urban Driving Schedule (Федеральный городской цикл), используемом в США, также значения ускорений небольшие – максимум  $1.15 \text{ м/с}^2$ , в цикле UDDS –  $1.5 \text{ м/с}^2$ , в автобусных циклах Нюрнберга (Nurenberg city bus) и Нью-Йорка (NY city bus) – уже  $1.88 \text{ м/с}^2$  и  $2.77 \text{ м/с}^2$ , соответственно, в городском цикле Нью-Йорка (NY city cycle) –  $2.68 \text{ м/с}^2$ , а в городском цикле Лос-Анджелеса (LA92) максимальные ускорения  $3.08 \text{ м/с}^2$ . Такие ускорения скорее соответствуют классическим режимам эксплуатации автомобилей.

Даже если на автомобиль устанавливать электродвигатель с крутящим моментом, соответствующим крутящему моменту ДВС, то из-за неблагоприятной характеристики мощности электродвигателя автомобиль может иметь плохую динамику. Так, например, были проведены расчёты разгонных характеристик автомобиля с КЭУ, построенной с использованием последовательно-параллельной схемы, на базе КАМАЗ-4308 с обратимыми электромашинами производства НПП "Тэмп" (рис. 5).

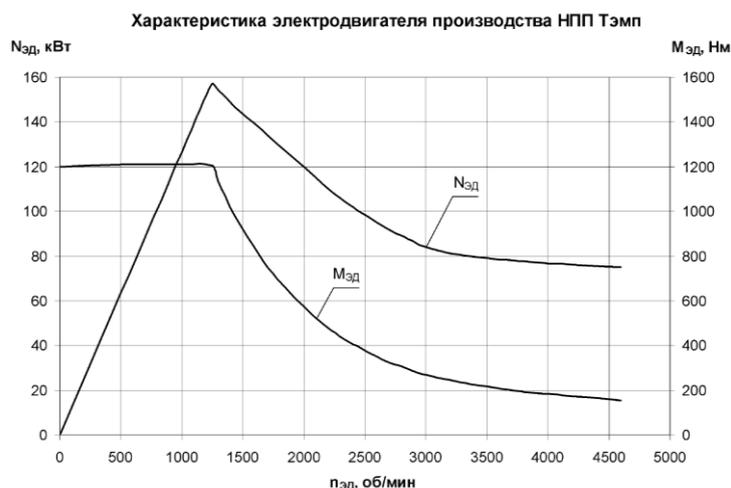
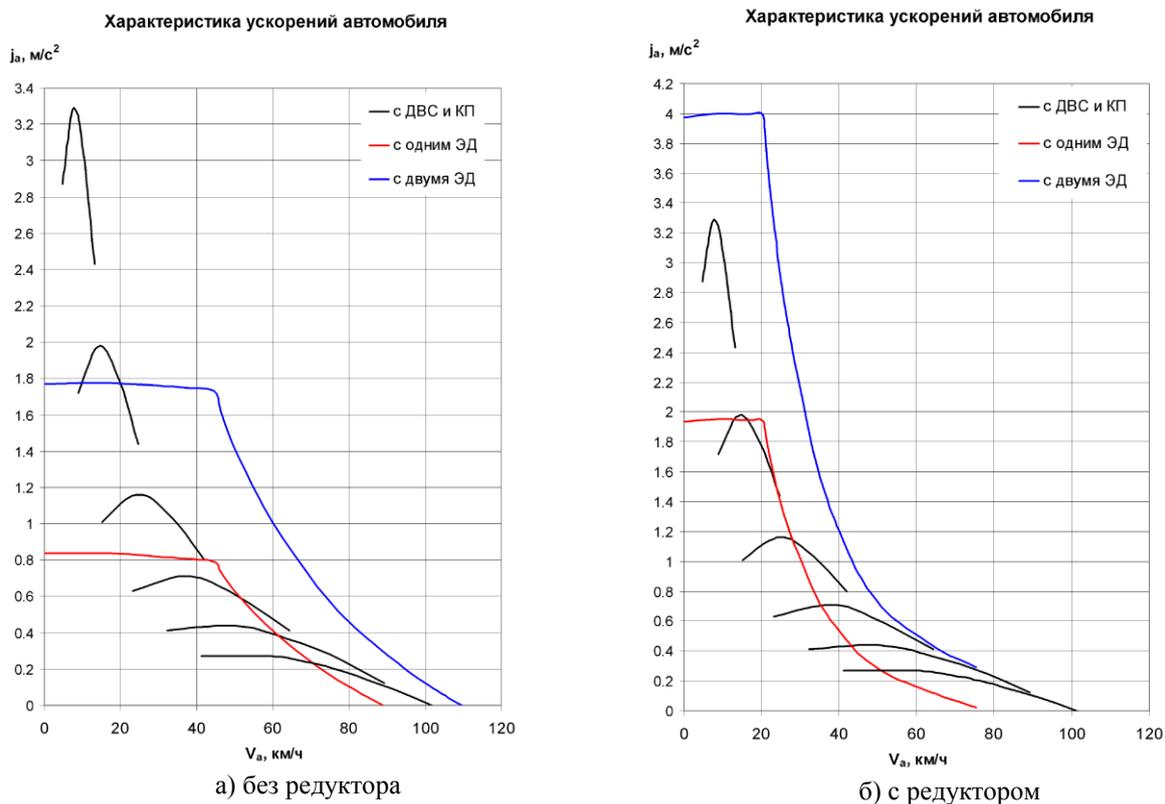


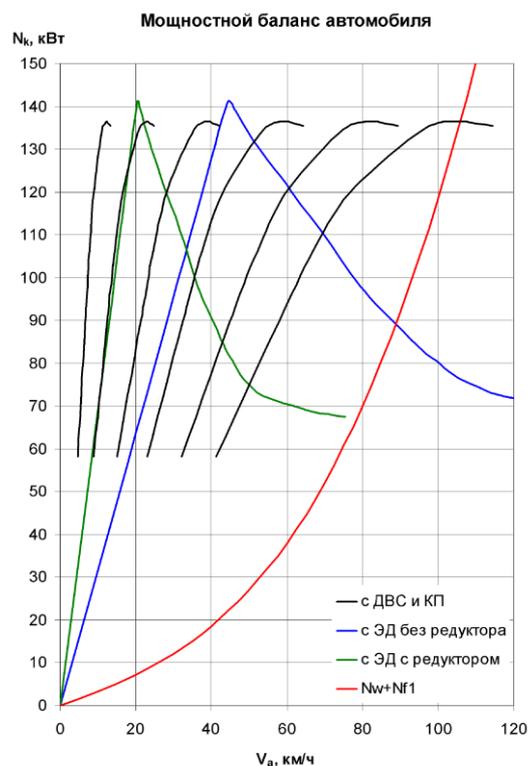
Рис. 5. Внешняя скоростная характеристика обратимой электромшины НПП "Тэмп".

Расчёты показали, что использование электродвигателей "напрямую" может обеспечить движение автомобиля исключительно в цикле, приведённом в Правилах №83 ЕЭК ООН, т.к. ускорения даже на двух электромшинах не превышают  $1 \text{ м/с}^2$  (рис. 6а). Это говорит о том, что автомобиль с последовательно-параллельной схемой КЭУ при таких характеристиках электромашин не только не может эксплуатироваться в других режимах, но и в городском цикле на нём невозможно реализовать последовательную схему КЭУ.



**Рис. 6.** Характеристика ускорений автомобиля с ДВС и электродвигателями на примере КАМАЗ-4308.

Мощностной баланс исследуемого автомобиля (рис. 7) показывает, что редуктора с одним передаточным числом всё равно недостаточно, так как характеристики мощности ДВС и электродвигателя НПП "Тэмп" принципиально не отличаются.

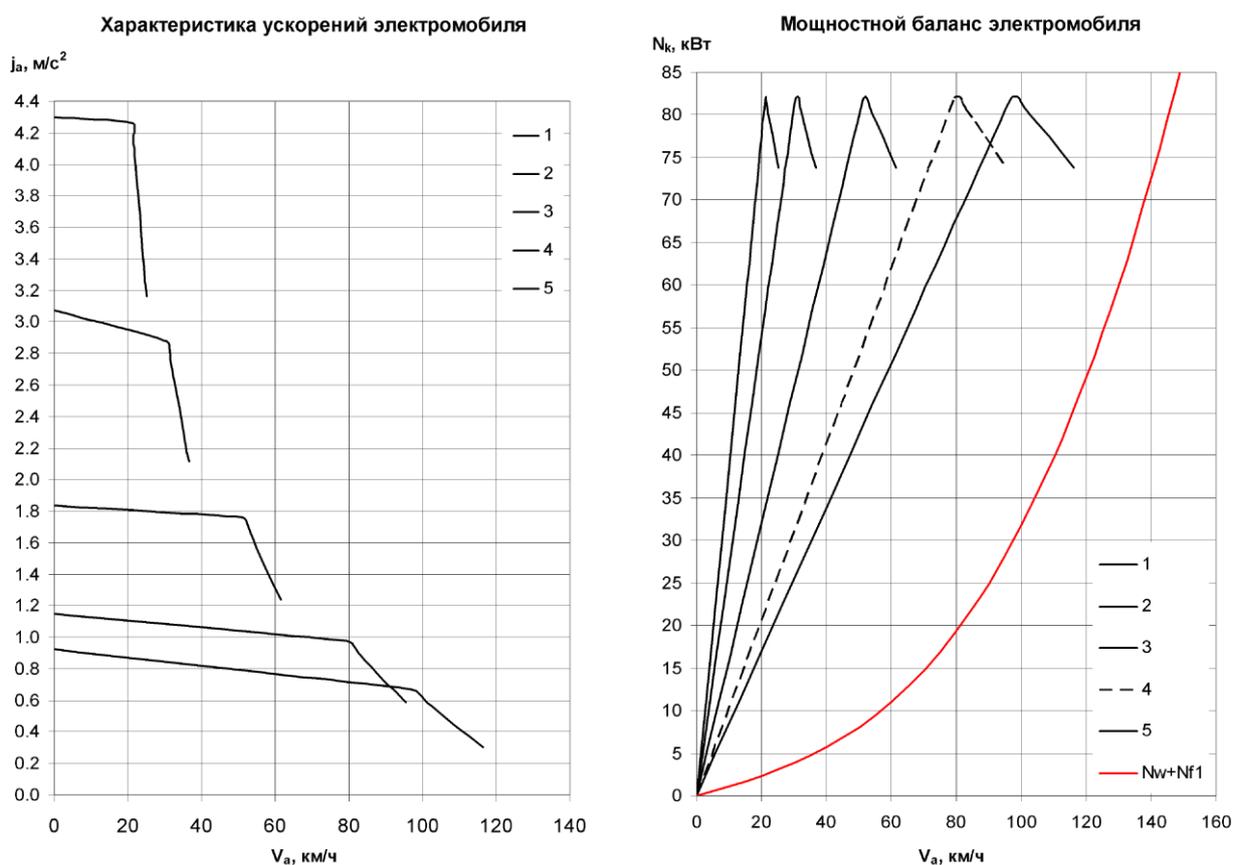


**Рис. 7.** Мощностной баланс автомобиля с ДВС и электродвигателем на примере КАМАЗ-4308.

Таким образом, для реализации высокой динамики (соответствующей классическим режимам эксплуатации) автомобилю с электродвигателем нужна коробка передач.

Для подтверждения необходимости применения коробки передач, как на электромобиле, так и на автомобиле с комбинированной энергетической установкой, целесообразно построить сравнительные графики ускорений и мощностного баланса автомобиля с электродвигателем без коробки передач и с электродвигателем в сочетании с 2-х, 3-х, 4-х ступенчатыми коробками передач на основе внешних скоростных характеристик электродвигателя. На рис. 8 приведены характеристики ускорений и мощностного баланса применительно к автомобилю УАЗ-2360 с электродвигателем производства НПП "Тэмп" и пятиступенчатой коробкой передач со следующими значениями передаточных чисел:  $i_1 = 3.78$ ,  $i_2 = 2.6$ ,  $i_3 = 1.55$ ,  $i_4 = 1$ ,  $i_5 = 0.82$ . Так как 4-я передача прямая, то характеристика мощности на этой передаче соответствует характеристике мощности без коробки передач.

Согласно приведённой на рис. 8 характеристике мощностного баланса применение в сочетании с электродвигателем коробки передач позволяет расширить зону максимальной мощности до достаточно широкого диапазона скоростей автомобиля. Наличие коробки передач оправдано и более высокими значениями ускорений по сравнению с ускорениями, обеспечиваемыми одним электродвигателем (рис. 4 и 8).



**Рис. 8.** Характеристики ускорений и мощностного баланса на примере автомобиля УАЗ-2360 с электродвигателем производства НПП "Тэмп".

Таким образом, для того, чтобы автомобилю с электродвигателем производства НПП "Тэмп" достичь той же динамики, что и у серийного автомобиля с ДВС необходимо за электродвигателем установить штатную коробку передач.

Многие производители для создания автомобилей с КЭУ используют параллельную схему. Самый распространенный вариант параллельной схемы КЭУ – это расположенные друг за другом ДВС, сцепление, обратимая электромашина и автоматическая трансмиссия. Наличие сцепления между ДВС и электромашиной позволяет реализовать движение в режиме электромобиля без вращения вала ДВС. Многоступенчатая автоматическая коробка передач может быть активно использована не только совместно с ДВС, но и при движении на электротяге. В качестве коробки передач может быть применен механический вариатор (Honda Insight), либо ГМП (Volkswagen Touareg), либо автоматизированная механическая коробка передач (Peugeot 3008 Hybrid) [7, 8, 9].

Несмотря на то, что с увеличением частоты вращения электродвигателя происходит падение его крутящего момента, что благоприятно для транспортного средства, у некоторых электродвигателей такая характеристика только в достаточно узком диапазоне частот вращения, поэтому мировые производители автомобилей с КЭУ и электрических приводов отмечают, что использование в электроприводе редуктора с несколькими (хотя бы с двумя) передаточными числами позволяет существенно улучшить тяговые и энергетические свойства этого привода [8]. Наличие хотя бы одной понижающей передачи позволяет развить требуемый крутящий момент на колесах автомобиля, без использования высокомоментного электродвигателя. Вторая передача обеспечивает автомобилю заданную максимальную скорость на электротяге. Кроме того, так же как и ДВС, электродвигатель имеет свою характеристику КПД. Коробка передач с несколькими передачами позволяет выбирать более энергоэффективный режим работы электродвигателя. За счет коробки передач уменьшаются потери энергии (по заявлению FEV, даже двухступенчатая коробка передач позволяет снизить их на 8...10%), появляется возможность уменьшить массу электродвигателя и ёмкость батареи [9].

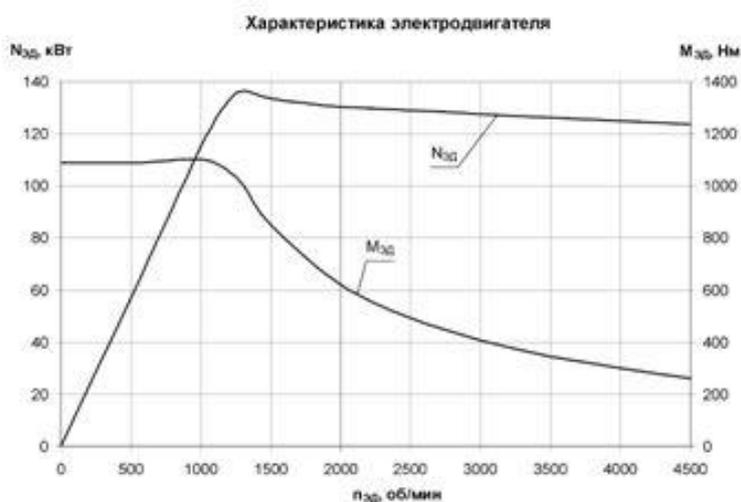


Рис. 9. Более благоприятная характеристика электродвигателя.

Однако, если на автомобиль установить электродвигатель с более благоприятными характеристиками мощности (пологая полка падения мощности после пика), представленными на рис. 9, можно сократить число ступеней в коробке передач.

Но даже с благоприятной характеристикой мощности и момента КПД электродвигателя на режиме низких частот вращения достаточно низок (рис. 10). Это свидетельствует о том, что характеристика электродвигателя от нулевой частоты вращения обеспечивает трогание автомобиля с места без сцепления, но в зоне низких частот вращения значительная часть энергии электродвигателя уходит в тепло, что с точки зрения потерь аналогично буксованию сцепления.

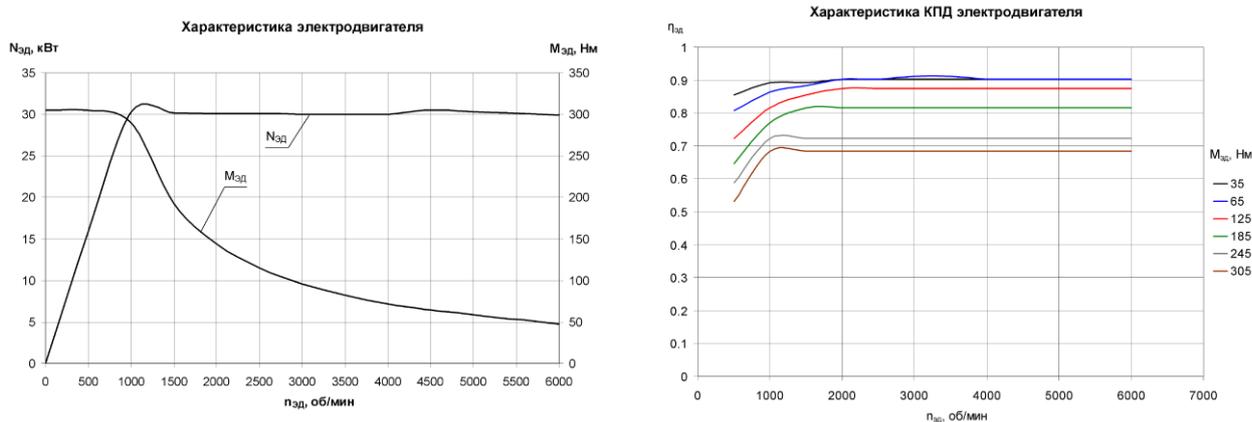


Рис. 10. Внешняя характеристика и характеристика КПД электродвигателя автомобиля Toyota Prius.

## Заключение

Таким образом, обобщая всё вышеизложенное можно сделать вывод о том, что необходимость в коробке передач в сочетании с электродвигателем, выбор количества передач и значений передаточных чисел требуют тщательного анализа и зависят как от назначения автомобиля, так и от характеристик применяемых электродвигателей – от характера "полки" мощности, её протяжённости по частоте вращения, от степени падения КПД электродвигателя при малой, стартовой частоте вращения.

## Список литературы

1. Круташов А.В., Бахмутов С.В., Баулина Е.Е. Транспортное средство с комбинированной энергетической установкой расширенных функциональных возможностей: пат. 2473432 РФ. 2013.
2. Бахмутов С.В., Круташов А.В., Маликов О.В. Расширение функциональных возможностей – необходимый шаг в развитии конструкций гибридных автомобилей // Журнал Автомобильных Инженеров (Журнал ААИ). 2012. № 6 (77). С. 43-46.
3. Карунин А.Л., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Круташов А.В., Баулина Е.Е., Авруцкий Е.В., Карпухин К.Е. Экспериментальный многоцелевой гибридный автомобиль // Автомобильная промышленность. 2006. № 7. С. 5-8.

4. Правила ЕЭК ООН № 83/Добавление 82/Пересмотр 3. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении выбросов загрязняющих веществ в зависимости от топлива, необходимого для двигателей.
5. Николаенко А.В., Бахмутов С.В., Селифонов В.В., Павлушков Б.Э., Филонов А.И., Благушко Я.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е., Данилин М.Ф. Комбинированная энергетическая установка транспортного средства (варианты): пат. 2424919 РФ. 2011.
6. Бахмутов С.В., Павлушков Б.Э., Селифонов В.В., Серебряков В.В., Филонов А.И., Благушко Я.В., Маликов О.В., Баулина Е.Е., Куликов И.А., Карпухин К.Е. Комбинированная энергетическая установка гибридного автомобиля: пат. 2457959 РФ. 2012.
7. Gear change: Hybrid Transmission // Electric & Hybrid Vehicle Technology International. January 2010. P. 36-42.
8. Gearing up for EVs // Electric & Hybrid Vehicle Technology International. January 2011. P. 166.
9. Farah Alkhalisi. Greener gears // Electric & Hybrid Vehicle Technology International. January 2012. P. 44-49.

## Can a gearbox be of use in an electric vehicle?

# 06, June 2014

DOI: [10.7463/0614.0715866](https://doi.org/10.7463/0614.0715866)

E.E. Baulina, A.V. Krutashov, V.V. Serebryakov

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI), 107023, Moscow, Russian Federation

[baulina@mami.ru](mailto:baulina@mami.ru)

[vvs@mami.ru](mailto:vvs@mami.ru)

A share of vehicles with electric powertrains, including pure electric vehicles and hybrid electric vehicles, is growing intensively nowadays. It is well known that electric motor can maintain its maximum torque in a wide speed range. One can say that this fact implies no need of reduction gears while using an electric motor for propulsion. On the other hand, power curve of electric motor is very similar to that of IC engines with its maximum power values lying in relatively narrow speed range. This, on the contrary, leads to conclusion that using reduction gears in an electric drive makes some sense. In this paper, an analysis carried out in order to reveal benefits of placing reduction gears between electric motor and driving wheels of a vehicle. Some conclusions were made about selecting a gearbox matching with electric motor and choosing its gear number and ratios. These decisions depend strongly on vehicle's purpose and characteristics of an electric motor.

---

**Publications with keywords:** [the combined power installation](#), [gearbox](#), [automobile](#), [electric motor](#), [horsepower balance](#)

**Publications with words:** [the combined power installation](#), [gearbox](#), [automobile](#), [electric motor](#), [horsepower balance](#)

---

### References

1. Krutashov A.V., Bakhmutov S.V., Baulina E.E. *Transportnoe sredstvo s kombinirovannoy energeticheskoy ustanovkoy rasshirenykh funktsional'nykh vozmozhnostey* [HEV with wide range of functional capabilities]. Patent RF, no. 2473432. 2013. (in Russian).

2. Bakhmutov S.V., Krutashov A.V., Malikov O.V. [Expansion of functionality is a necessary step in the design of the hybrid car]. *Zhurnal Avtomobil'nykh Inzhenerov (Zhurnal AAI)*, 2012, no. 6 (77), pp. 43-46. (in Russian).
3. Karunin A.L., Bakhmutov S.V., Selifonov V.V., Krutashov A.V., Baulina E.E., Avrutskiy E.V., Karpukhin K.E. [Experimental multifunctional HEV]. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2006, no. 7, pp. 5-8. (in Russian).
4. E/ECE/324-E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.82/Rev.3. Regulation No. 83. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements.
5. Nikolaenko A.V., Bakhmutov S.V., Selifonov V.V., Pavlushkov B.E., Filonov A.I., Blagushko Ya.V., Baulina E.E., Kulikov I.A., Karpukhin K.E., Danilin M.F. *Kombinirovannaya energeticheskaya ustanovka transportnogo sredstva (varianty)* [Hybrid vehicle powertrain (options)]. Patent RF, no. 2424919. 2011. (in Russian).
6. Bakhmutov S.V., Pavlushkov B.E., Selifonov V.V., Serebryakov V.V., Filonov A.I., Blagushko Ya.V., Malikov O.V., Baulina E.E., Kulikov I.A., Karpukhin K.E. *Kombinirovannaya energeticheskaya ustanovka gibridnogo avtomobilya* [Hybrid powertrain for HEV]. Patent RF, no. 2457959. 2012. (in Russian).
7. Gear change: Hybrid Transmission. *Electric & Hybrid Vehicle Technology International*, January 2010, pp. 36-42.
8. Gearing up for EVs. *Electric & Hybrid Vehicle Technology International*, January 2011, p. 166.
9. Farah Alkhalisi. Greener gears. *Electric & Hybrid Vehicle Technology International*, January 2012, pp. 44-49.