

УДК 629.11.012

МЕТОД РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ГИБРИДНОЙ ТРАНСМИССИЕЙ TSH

Г.О. Котиев, д.т.н. / МГТУ им. Н.Э. Баумана
С.А. Харитонов, к.т.н. / МГТУ им. Н.Э. Баумана
М.В. Нагайцев, к.т.н. / ОАО «АВТОВАЗ»

Окончание. Начало см. в №5(64) 2010

На рис. 9 показаны зависимости изменения мощности, развиваемой ДВС $N_{ДВС}$, проходящей через электрическую часть трансмиссии (электромашины A и B , соответственно N_A и N_B) и механическую часть трансмиссии (БЦК планетарного ряда) $N_{Мех}$.

На первом этапе разгона транспортного средства электромашина A работает в режиме генератора, а электромашина B — в режиме двигателя. Далее при определенной скорости, зависящей от частоты вращения ДВС, электромашини меняются функциями. При этом в момент смены режимов

работы электромашин вся мощность ДВС передается только через механическую часть трансмиссии, тем самым трансмиссия на этом режиме работает с максимальным КПД (рис. 8). На графиках (рис. 9) это обозначено точкой M . Эту точку принято называть механической точкой режима работы трансмиссии.

До механической точки (точки M) мощность, проходящая через электрическую часть трансмиссии, линейно уменьшается, что соответствующим образом отражается и на графике КПД.

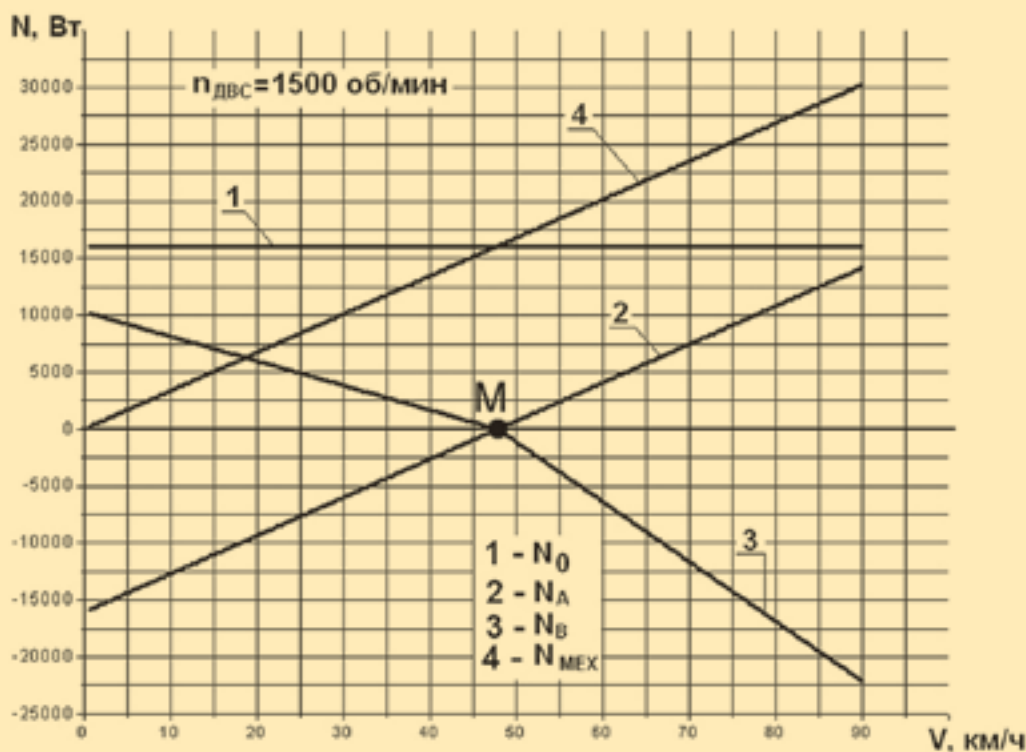


Рисунок 9

В механической точке КПД трансмиссии достигает своего максимального значения, поскольку вся мощность ДВС в этом случае передается только механической частью трансмиссии.

При дальнейшем увеличении скорости движения транспортного средства доля мощности ДВС, передаваемая электрической частью трансмиссии, начинает возрастать, что и приводит к соответствующему снижению КПД всей трансмиссии.

Таким образом, для указанного выше режима движения транспортного средства (разгон с постоянными оборотами ДВС) высокие значения КПД трансмиссия имеет в весьма узком диапазоне скоростей, а движение с высокой скоростью становится невыгодным из-за слишком низких значений КПД трансмиссии.

Кроме того, следует отметить, что после прохождения механической точки в трансмиссии возникает циркуляция мощности. Это обстоятельство отражено на графиках (рис. 9) тем, что мощность, проходящая через механическую часть трансмиссии, начинает превышать мощность, развиваемую ДВС. Причем на режимах движения с максимальной скоростью величина мощности, проходящей через механическую часть трансмиссии, превышает мощность, развиваемую ДВС, практически в два раза.

На рис. 10 показаны графики изменения в процессе разгона транспортного средства момента ДВС ($M_{ДВС}$), моментов, развиваемых электромашинами А и В (соответственно M_A и M_B), и момента, нагружающего механическую часть трансмиссии ($M_{МЭХ}$).

Как видно из представленных графиков, формирование динамического фактора транспортного средства происходит за счет изменения момента электромашин В. Момент же, нагружающий электромашину А, и момент, передаваемый механической частью трансмиссии, при условии постоянства момента ДВС также постоянны. Такое соотношение моментов обусловлено условием равновесного состояния планетарного ряда, которое можно записать следующим равенством:

$$M_{МЭХ} + M_0 + M_{БЦК} = 0$$

Значительно расширить в процессе разгона диапазон скоростей, при котором трансмиссия обладает высокими значениями КПД, возможно, как показывают расчеты, за счет параллельного с изменением частоты вращения электромашин А увеличения и частоты вращения ДВС.

На рис. 11 и 12 представлены графики изменения КПД трансмиссии, динамического фактора и мощностей ДВС и электромашин для случая, когда в процессе разгона частота вращения ДВС линейно увеличивается с 1 000 об/мин до 3 500 об/мин.

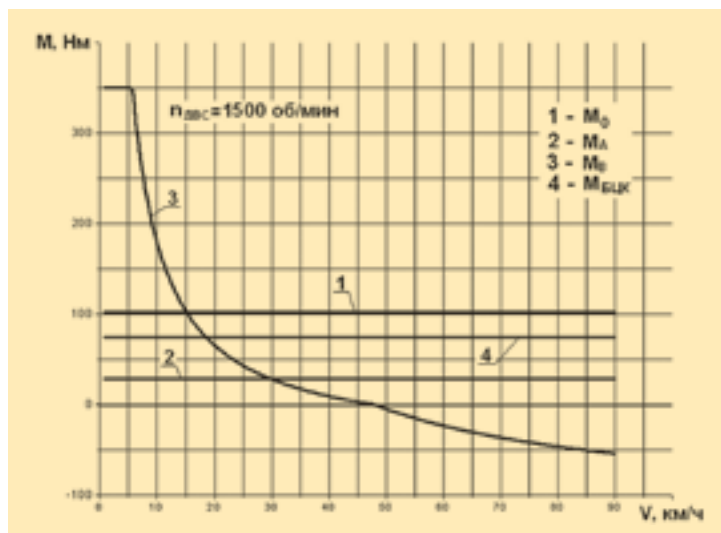


Рисунок 10

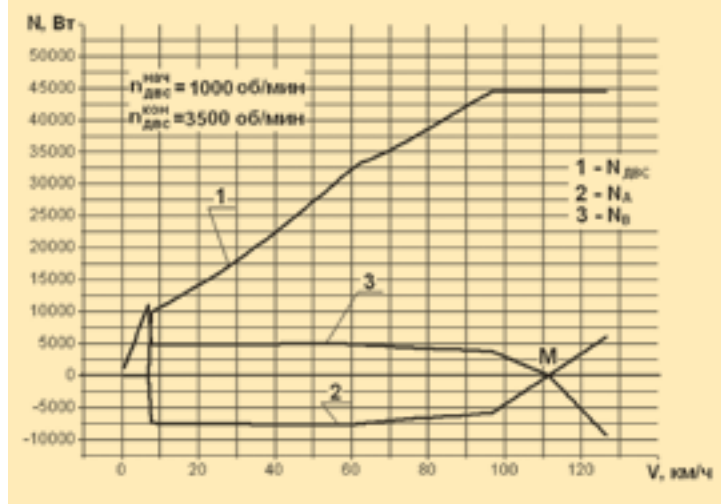
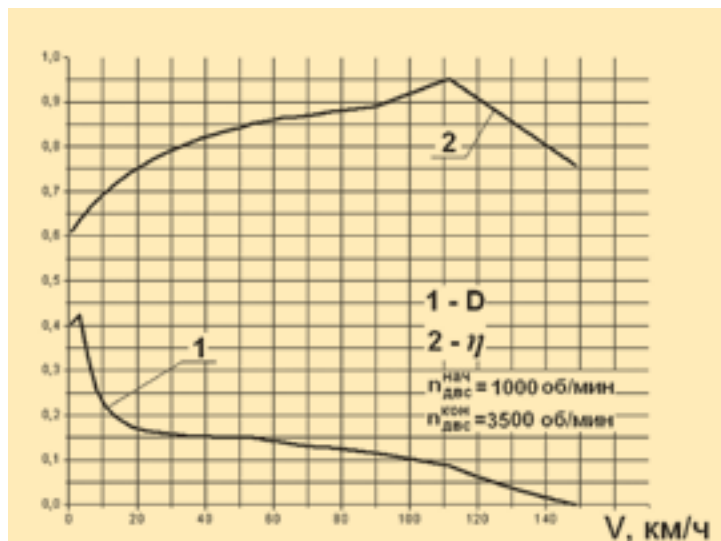


Рисунок 11

Максимальная частота вращения ДВС при разгоне 3 500 об/мин выбрана на основании того, что при этой частоте ДВС развивает максимальный момент.

Как видно из графика на рис. 11а, увеличение частоты вращения ДВС в процессе разгона приводит к существенному увеличению КПД трансмиссии как при движении с малой скоростью, так и при движении с высокой скоростью. Так, при максимально допустимой скорости по сопротивлению (~150 км/ч) КПД трансмиссии равен, примерно, 0,75, в то время как при разгоне с постоянными оборотами ДВС, КПД трансмиссии уже при скорости 70 км/ч становится меньше 0,70 (рис. 8б).

В третьем (комбинированном) варианте разгона на первом этапе используется только энергия аккумуляторных батарей, а на втором этапе, начинающемся при некоторой скорости, аккумуляторные батареи полностью отключаются, заводится ДВС и дальнейшее движение осуществляется только за счет использования мощности ДВС. Следует отметить, что скорость, при которой происходит переход с одного режима работы моторно-трансмиссионной установки на другой, весьма существенно влияет на качество этого перехода.

На рис. 13 показано изменение динамического фактора, определенного для частоты вращения ДВС $n_{\text{ДВС}} = 1\ 000$ и $2\ 500$ об/мин и различных скоростей

перехода с одного режима работы трансмиссии на другой.

Как видно из графиков на рис. 13а, при малой частоте вращения вала ДВС (1 000 об/мин) качество перехода с режима движения с использованием только энергии аккумуляторных батарей на режим движения только за счет мощности ДВС весьма существенно зависит от скорости транспортного средства, при которой этот переход осуществляется. Судя по графикам, для частоты вращения ДВС 1 000 об/мин переход с одного режима работы трансмиссии на другой желательно осуществлять при скорости 7 км/ч. Переход же при больших скоростях (даже при 10 км/ч) приводит к резкому уменьшению тяговых усилий на ведущих колесах транспортного средства, и, как следствие этого, к такому же уменьшению ускорения. Причем, чем выше скорость перехода, тем больше разница тяговых усилий на разных режимах работы трансмиссии.

Увеличение частоты вращения ДВС до 2 500 об/мин приводит к тому, что процесс перехода с одного режима работы на другой сглаживается (рис. 13б), но при этом точка, при которой происходит плавный переход, смещается в сторону больших скоростей. Так переход, осуществляемый при скорости 80 км/ч, происходит с незначительным изменением тягового усилия на ведущих колесах транспортного сред-

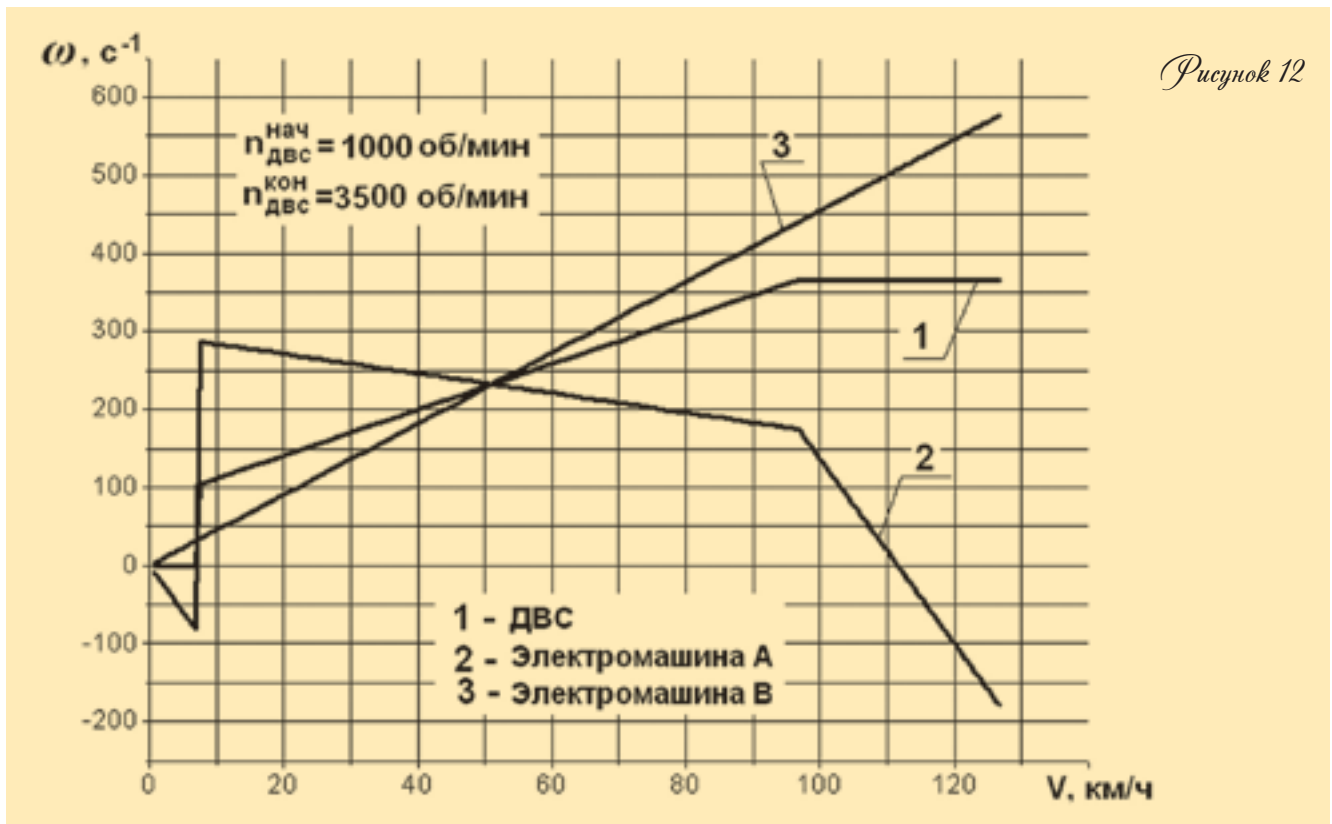


Рисунок 12

ства, что благоприятным образом скажется и на качестве этого перехода.

Кроме того, следует отметить, что при переходе с режима движения с использованием только энергии аккумуляторных батарей на режим движения только за счет мощности ДВС частота вращения электродвигателя A (ω_A) должна скачкообразно изменить свое значение (рис. 14).

Проведем анализ работы трансмиссии в режиме торможения транспортного средства, т.е. определим распределение потоков мощности и нагруженность звеньев планетарного механизма в случае, когда выходное звено x становится ведущим звеном. При этом рассмотрим два случая.

В первом случае торможение осуществляется при полном отпуске педали управления скоростью транспортного средства. При этом дроссельная заслонка управления ДВС полностью закрывается, и двигатель переходит в режим работы холостого хода. Во втором случае предполагается, что педаль управления скоростью движения транспортного средства также полностью отпускается, но ДВС при этом продолжает работать в ведущем режиме.

При расчетах будем считать, что кинетическая энергия транспортного средства преобразуется с помощью одной или двух электромашин в электрическую и накапливается в аккумуляторных батареях. Для этого связь между двумя электромашинами должна быть разорвана, с тем, чтобы вырабатываемая ими энергия могла полностью поступать в аккумуляторные батареи. Это обстоятельство по-зволяет считать, что в режиме торможения транспортного средства электромашин работают независимо друг от друга и могут либо работать в режиме генератора, либо находиться в нейтральном состоянии.

ТОРМОЖЕНИЕ С ПЕРЕВОДОМ ДВС В РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

A) Электромашин A — генератор; электромашин B — двигатель

В этом случае для реализации тормозного режима электромашин B необходимо перевести в режим генератора, что отражается в изменении направления действия развиваемого им момента. Кроме того, перевод ДВС в режим холостого хода также приводит к изменению направления действия развиваемого им момента. Поэтому, по сравнению с распределением нагруженности звеньев в режиме разгона, картина нагруженности звеньев в этом случае существенно изменится.

Как видно из рис. 15 для сохранения равновесного состояния звена 2 необходимо, чтобы момент на электромашин A изменил свое направление, при

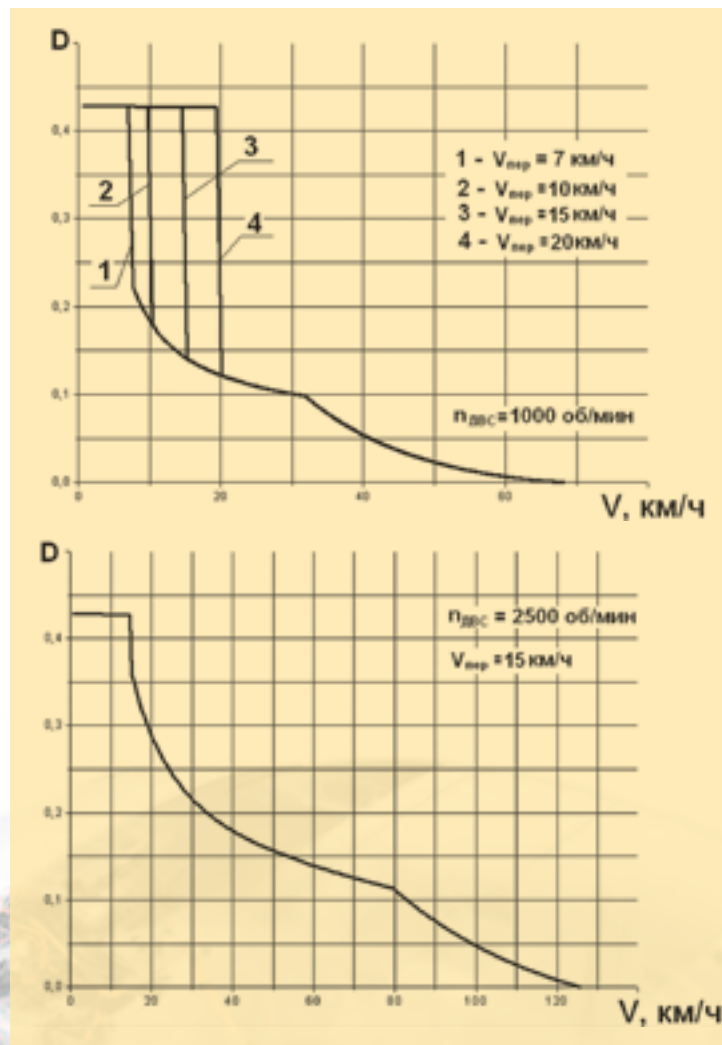


Рисунок 13

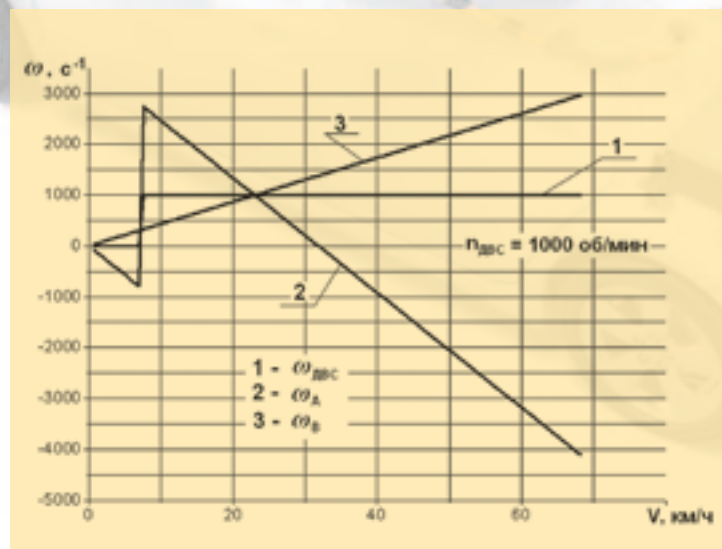


Рисунок 14

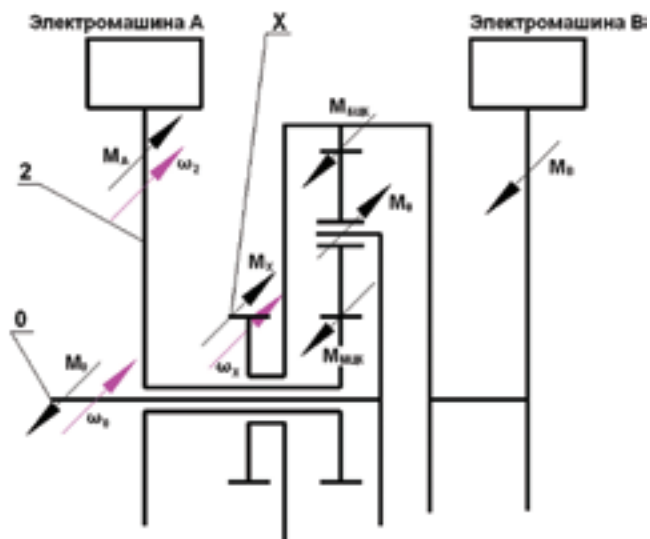


Рисунок 15

этом направлении вращения должно остаться неизменным. Это означает, что электрическая машина А должна перейти в режим работы электродвигателя. Но для этого необходим источник энергии, которым может быть либо блок аккумуляторных батарей, либо электрическая машина В. И то, и другое противоречит принятому допущению.

Таким образом, торможение при переводе ДВС в режим холостого хода возможно только в том случае, если электрическая машина А будет находиться в нейтральном состоянии. Другими словами, моменты $M_{\text{МЛК}}$, M_0 и $M_{\text{МЛР}}$ должны быть равны нулю. Торможение же транспортного средства в этом случае может быть осуществлено только лишь за счет электрической машины В.

Определение нагруженности звеньев трансмиссии и распределение потоков мощности в этом случае определяется довольно просто (рис. 16). Как видно, энергия поступательного движения транспортного средства поступает в электрическую машину В, где преобразуется в электрическую и далее накапливается в аккумуляторных батареях.

Б) Электрическая машина А — двигатель;
электрическая машина В — генератор

Как было отмечено выше, при определенной скорости движения, зависящей от частоты вращения ДВС, электрические машины А и В меняются функциями, т.е. электрическая машина А переходит в режим работы электродвигателя, а электрическая машина В — генератора. Для такого варианта работы электрических машин распределение потоков мощности и нагруженность звеньев при переводе ДВС в режим холостого хода представлены на рис. 17. Как видно, в этом случае часть кинетической энергии движения транспортного средства поступает в электромоторы А и В, где преобразо-

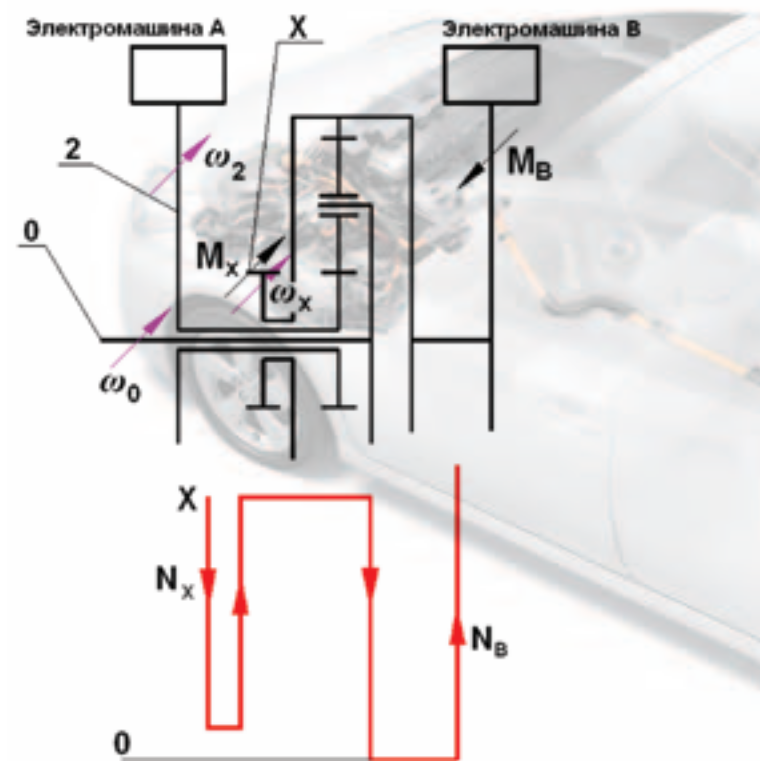


Рисунок 16

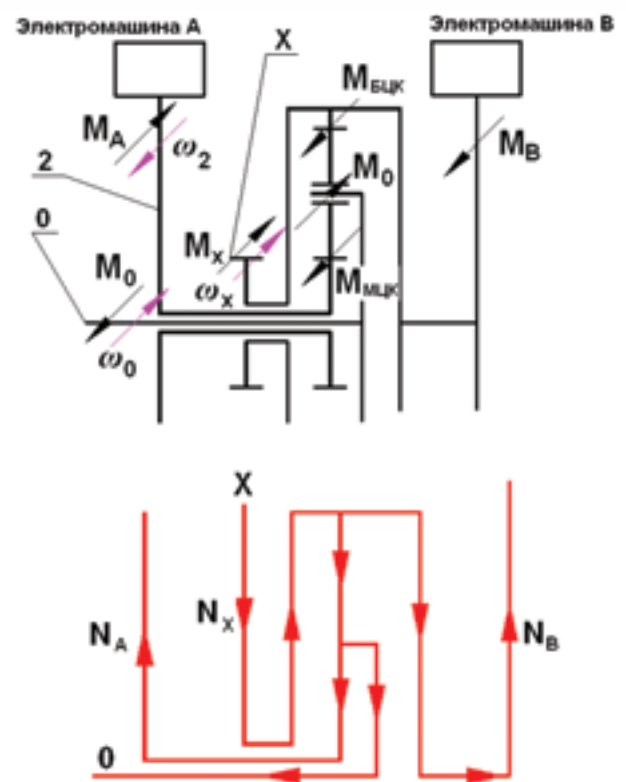


Рисунок 17

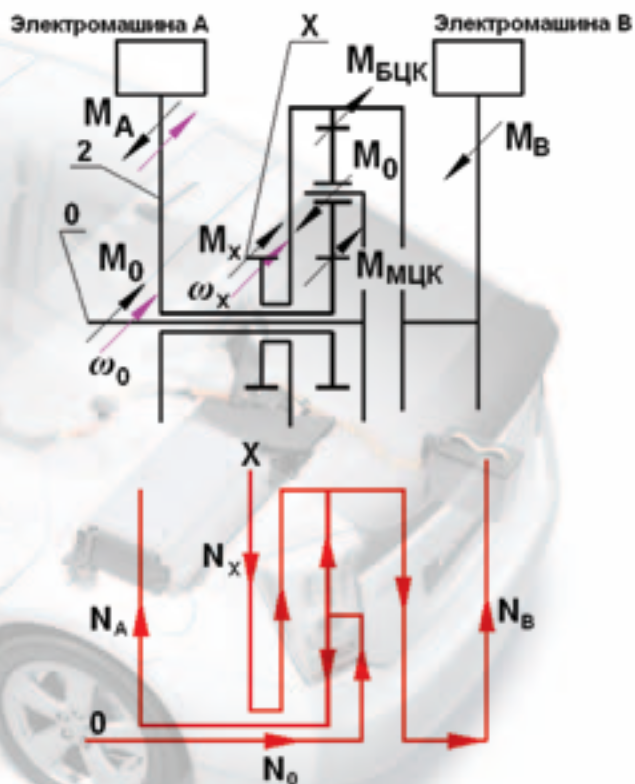


Рисунок 18

выдается в электрическую, а другая часть тратится на преодоление сопротивлений в ДВС.

ТОРМОЖЕНИЕ ПРИ РАБОТЕ ДВС В ТЯГОВОМ РЕЖИМЕ

А) *Электромашинa A — генератор; электромашинa B — двигатель*

В этом случае также, как и в предыдущем, электромашину B необходимо перевести в режим генератора, что возможно только при изменении направления действия развиваемого им момента.

Нагруженность моментами звеньев планетарных рядов для этого случая представлена на рис. 18.

Как видно, кинетическая энергия транспортного средства полностью поступает на электромотор B. Энергия же, вырабатываемая ДВС, с помощью планетарного ряда разделяется на два потока, один из которых поступает в электромашину A, а второй — в электромашину B, в которых она преобразуется в электрическую и далее поступает в аккумуляторные батареи.

Таким образом, из анализа потоков мощности следует, что торможение транспортного средства обеспечивается также как и в предыдущем случае только лишь за счет тормозных свойств электро-

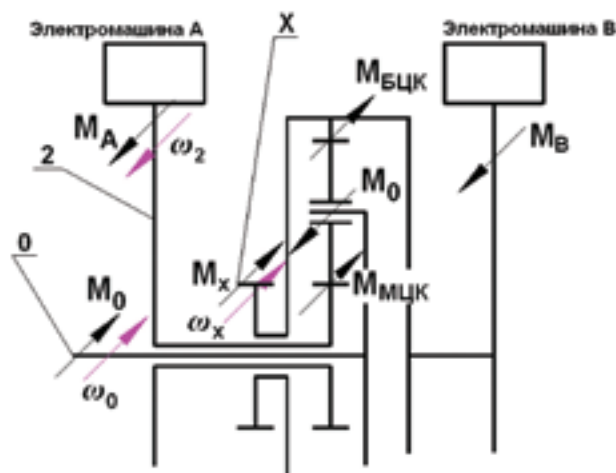


Рисунок 19

машины B, а вся энергия, вырабатываемая ДВС, поступает с помощью электромашин A и B в аккумуляторные батареи. Такой режим работы ДВС при торможении транспортного средства следует, очевидно, рекомендовать в том случае, если аккумуляторные батареи сильно разряжены.

Б) *Электромашинa A — двигатель; электромашинa B — генератор*

Как видно из рис. 19, переход электромашин A из режима двигателя в режим генератора невозможен, поскольку изменение направления действия момента, развиваемого этой электромашиной, приведет к нарушению равновесного состояния звена 2. Это означает, что для сохранения равновесного состояния этого звена электромашинa A должна продолжать работать в режиме электродвигателя. Но, как уже отмечалось выше, для этого необходим источник энергии, которым может быть либо блок аккумуляторных батарей, либо электромашинa B. И то, и другое противоречит принятому допущению.

Таким образом, реализация режима торможения транспортного средства в этом случае физически невозможна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deve Hermance, Shinichi Abe, «Hybrid Vehicles Lessons Learned and Future Prospects», SAE 2006-21-0027.
2. Красеньков В.И., Вашец А.Д. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин. — М.: Машиностроение. 1986. — 273 с.
3. Jerome Meisel, «An Analytic Foundation for the Toyota Prius THS-II Powertrain with a Comparison to a Strong Parallel Hybrid-Electric Powertrain, 2006-01-0666.
4. Крейнс М.А., Розовский М.С. Зубчатые механизмы. — М.: Наука. 1972. — 427 с.