

УДК 629.113

МЕТОД РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ГИБРИДНОЙ ТРАНСМИССИЕЙ, ПОСТРОЕННОЙ ПО СХЕМЕ GM

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

Окончание. Начало в №4(69) 2011

2. Режим EVT2

На этом режиме включена блокировочная муфта М1. Ранее, на основании выражений (1), (2) и (3) были получены зависимости для определения угловых скоростей ведомого звена x и звена 3:

$$\omega_3 = 1/(1 - i_{50}) \omega_5 - 1/(1 - i_{50}) \omega_0,$$

$$\omega_3 = (1 - i_{35} i_{50}) / (1 - i_{50}) \omega_5 - i_{50} (1 - i_{35}) / (1 - i_{50}) \omega_0.$$

Преобразуем зависимость для определения ω_3 следующим образом:

$$\omega_5 ((1 - i_{35} i_{50}) / (1 - i_{50}) - i_3) = i_{50} (1 - i_{35}) / (1 - i_{50}) \omega_0,$$

где $i_3 = \omega_3 / \omega_5$ — передаточное отношение электрической части трансмиссии, которое является величиной переменной.

$$\text{Откуда } \omega_5 = (i_{50} - i_{35} i_{50}) / (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) \omega_0.$$

Подставим полученное выражение в зависимость для определения частоты вращения ведомого вала:

$\omega_x = [(i_{50} - i_{35} i_{50}) / (1 - i_{50}) (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) - i_{50} / (1 - i_{50})] \omega_0$
и определим общее кинематическое передаточное отношение передачи:

$$i_{ox} = \omega_0 / \omega_x = (1 - i_{50}) (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) / ((i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})) \quad (13)$$

Тогда силовое передаточное отношение передачи равно:

$$\tilde{i}_{ox} = ((1 - i_{50} \eta_{50}^Y) (1 - i_{35} \eta_{35}^Y i_{50} \eta_{50}^Y - i_3 \eta_{35}^Y + i_3 \eta_{35}^Y i_{50} \eta_{50}^Y) / ((i_{50} \eta_{50}^Y - i_{35} \eta_{35}^Y i_{50} \eta_{50}^Y) - i_{50} \eta_{50}^Y) - (1 - i_{35} \eta_{35}^Y i_{50} \eta_{50}^Y - i_3 \eta_{35}^Y + i_3 \eta_{35}^Y i_{50} \eta_{50}^Y))$$

Определим показатель степени Y_1 :

$$\text{sign}(Y_1) = \text{sign}(i_{50} / i_{ox} \cdot di_{ox} / di_{50}) \quad (14)$$

Поскольку внутреннее передаточное отношение планетарного ряда $i_{50} < 0$, а $i_{ox} > 0$, то первый сомножитель в правой части выражения (14) — отрицателен.

Частная производная от общего кинематического передаточного отношения передачи по кинемати-

ческому передаточному отношению планетарного ряда i_{50} равна:

$$di_{ox} / di_{50} = ((1 - i_{50})(i_3 - i_{35}) - (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})) / [(i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})] / [(i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})]^2 - ((1 - i_{50})(1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) \cdot [(1 - i_{35}) - (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) - i_{50} (i_3 + i_{35})] / (i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}))^2]$$

Определим показатель степени Y_2 :

$$\text{sign}(Y_2) = \text{sign}(i_{35} / i_{ox} \cdot di_{ox} / di_{35})$$

Поскольку внутреннее передаточное отношение планетарного ряда $i_{35} < 0$, а $i_{ox} > 0$, то первый сомножитель в правой части выражения (15) — отрицателен.

Частная производная от общего кинематического передаточного отношения передачи по кинематическому передаточному отношению планетарного ряда i_{35} равна:

$$di_{ox} / di_{35} = ((i_{50}^2 - i_{50}) [(i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})] - (1 - i_{50}) (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) (i_{35} i_{50} - i_{50})) / [(i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})]^2$$

Определим показатель степени Y_3 :

$$\text{sign}(Y_3) = \text{sign}(i_3 / i_{ox} \cdot di_{ox} / di_3) \quad (15)$$

Частная производная от общего кинематического передаточного отношения передачи по кинематическому передаточному отношению i_3 равна:

$$di_{ox} / di_3 = (1 - i_{50}) (i_{50} - 1) [(i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})] - (1 - i_{50}) (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50}) (i_{50} - i_{50}^2) / [(i_{50} - i_{35} i_{50}) - i_{50} (1 - i_{35} i_{50} - i_3 + i_3 i_{50})]^2]$$

Используя полученные выше зависимости для определения моментов и частот вращения звеньев, а также зависимость КПД от передаточного отношения трансмиссии, построим тягово-динамические характеристики транспортного средства с гибридной

трансмиссией, выполненной по схеме ГМ, для трех вариантов разгона:

- разгон только за счет энергии аккумуляторных батарей;
- разгон только за счет работы ДВС;
- комбинированный разгон (на первом этапе используется только энергия аккумуляторных батарей, а на втором этапе, начинающемся при некоторой скорости, движение осуществляется только за счет использования мощности ДВС).

При разгоне только за счет мощности аккумуляторных батарей зависимость динамического фактора D представляет собой несколько трансформированную (за счет передаточного отношения третьего планетарного ряда, промежуточной и главной передач) характеристику электромашин (рис. 12). Наличие планетарного ряда, расположенного между электромашинной и промежуточной передачей, значительно увеличило по сравнению с трансмиссией THS на малых скоростях значение динамического фактора.

Изменение динамического фактора при разгоне только за счет мощности ДВС показано на рис. 13. Как видно при движении на малых скоростях значение динамического фактора значительно превышает величину, которую возможно реализовать по условию сцепления ведущих колес с грунтом. Следует отметить, в случае разгона при постоянных оборотах ДВС, превышающих 2750 об/мин, частота вращения электромашин А при нулевой скорости транспортного средства будет превышать допустимое значение (5500 об/мин). Это хорошо видно на плане угловых скоростей этой трансмиссии (рис. 4): при нулевой скорости транспортного средства и нулевых оборотах электромашин В (звена 3), что отражается на плане точкой А, частота вращения электромашин А (звена 5) более чем в два раза превышает частоту вращения ведущего звена трансмиссии (ДВС). Таким

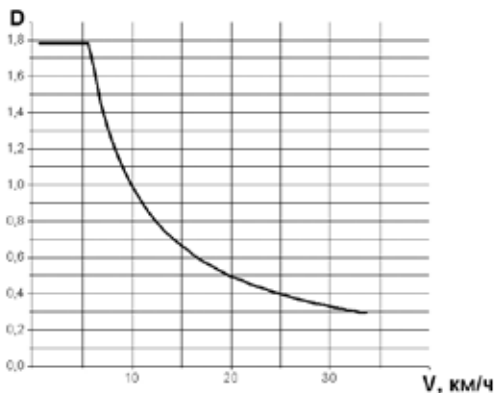


Рисунок 12

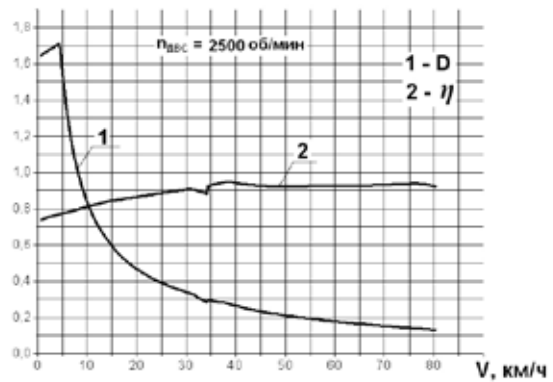
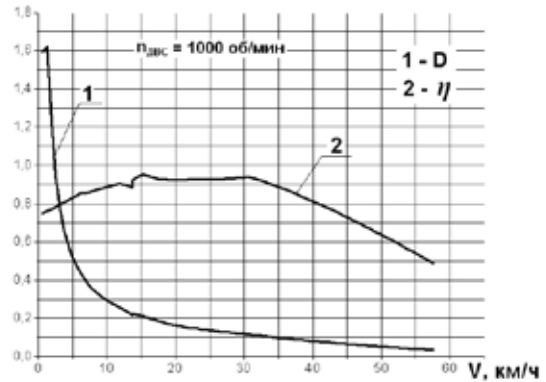


Рисунок 13

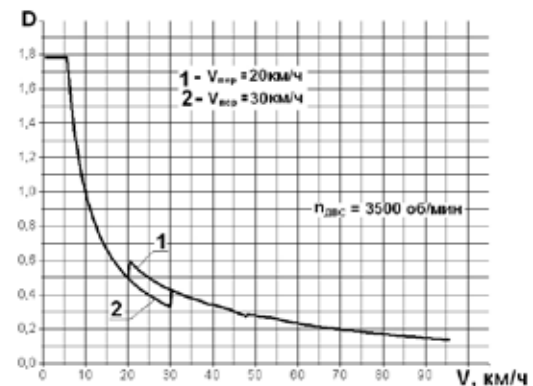
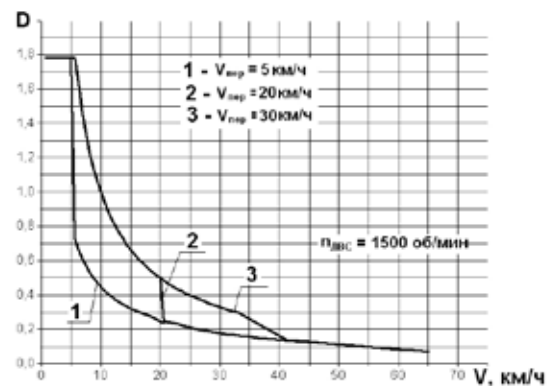


Рисунок 14

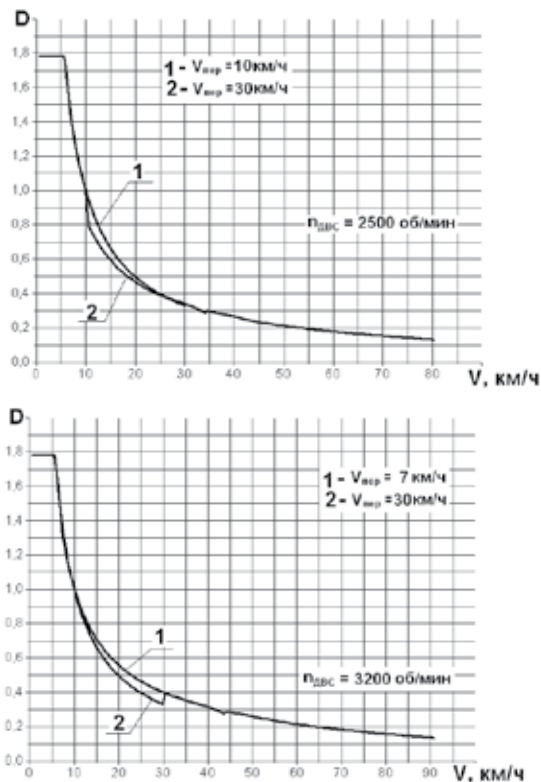


Рисунок 15

образом, в этом случае разгон можно осуществлять только с частотой вращения ДВС, не превышающей 2750 об/мин.

В случае комбинированного разгона определение динамического фактора проводилось при условии постоянства частоты вращения вала ДВС. В этом случае движение начинается только за счет энергии аккумуляторных батарей, а затем при некоторой скорости движения $V_{пер}$ происходит запуск ДВС, который выводится на определенную частоту вращения, аккумуляторные батареи отключаются, и движение осуществляется только лишь за счет мощности ДВС. Анализ полученных результатов показал, что для получения удовлетворительного качества перехода с режима движения только за счет энергии аккумуляторных батарей на режим EVT1 частота вращения вала ДВС должна находиться в достаточно узком диапазоне (от 2300 до 3200 об/мин).

При разгоне с меньшими оборотами ДВС в переходном режиме происходит резкое уменьшение динамического фактора (рис. 14а). Графики на рис. 14 построены для различных значений скорости $V_{пер}$.

Следует отметить, что при скорости 30 и 40 км/ч переход с режима движения только на аккумуляторных батареях происходит сразу на режим EVT2. Это объясняется тем, что для заданной частоты вращения вала ДВС и при таких скоростях перехода угло-

вая скорость ведомого вала трансмиссии становится больше той, при которой должен происходить переход с режима EVT1 на режим EVT2, поэтому необходимо производить переключение сразу на режим EVT2, минуя режим EVT1.

Если разгон осуществляется с частотой вращения ДВС, большей 3200 об/мин, то в момент перехода на режим движения EVT1 происходит скачкообразное увеличение динамического фактора (рис. 14б).

В случае разгона при частоте ДВС, находящейся в диапазоне от 2300 до 3200 об/мин, качество переходного процесса в первую очередь зависит от скорости $V_{пер}$ (рис. 15). Причем, чем выше частота вращения вала ДВС, при которой осуществляется разгон, тем меньше должна быть величина скорости, при которой возможен плавный переход с режима движения только за счет энергии аккумуляторных батарей на режим EVT1.

Переход же с режима EVT1 на режим EVT2 всегда проходит весьма плавно и качество этого перехода не зависит ни от частоты вращения вала ДВС, ни от скорости, при которой этот переход осуществляется.

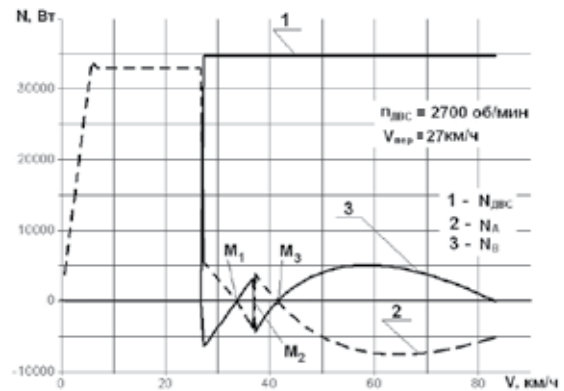


Рисунок 16

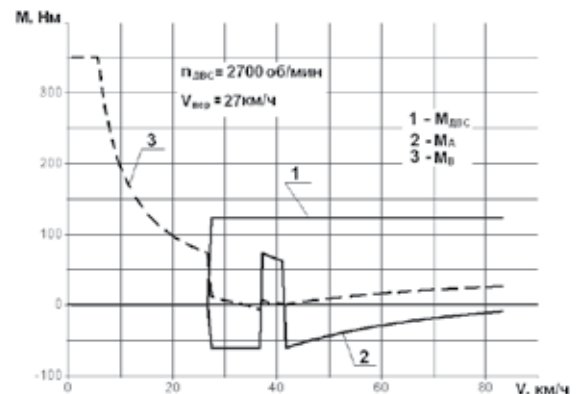


Рисунок 17

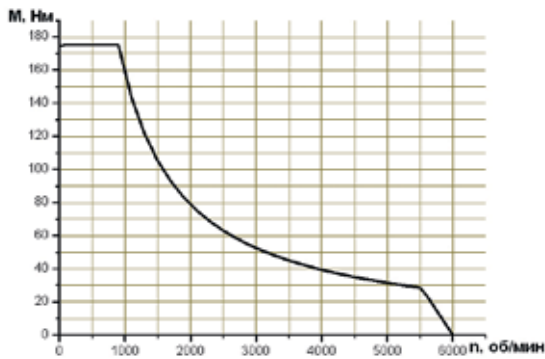


Рисунок 18

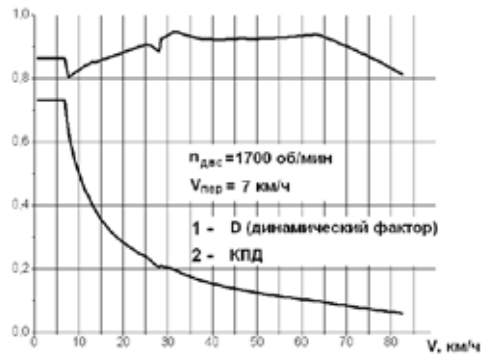


Рисунок 22

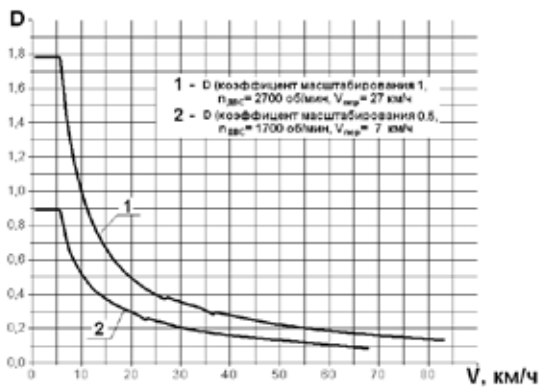


Рисунок 19

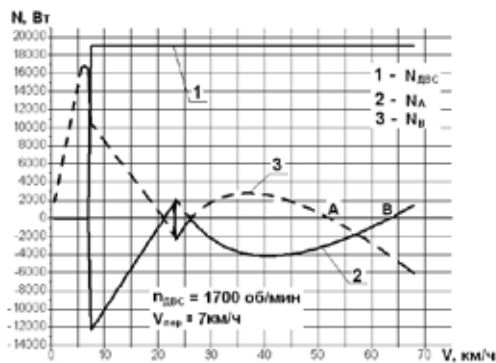


Рисунок 20

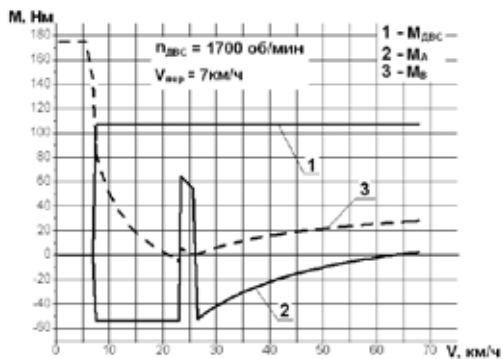


Рисунок 21

На рис. 16 и 17 представлены графики изменения мощности и моментов электромашин А и В (соответственно N_A, N_B и M_A, M_B) и ДВС ($N_{ДВС}$ и $M_{ДВС}$), полученные для частоты вращения вала ДВС 2700 об/мин и скорости $V_{пер} = 27 \text{ км/ч}$.

Из графиков на рис. 16 видно, что кинематическая схема трансмиссии, разработанная фирмой GM, обеспечивает три механические точки (M_1, M_2 и M_3). Под термином механическая точка принято понимать такой режим работы трансмиссии, при котором вся мощность ДВС передается только механической частью трансмиссии.

Кроме того, можно отметить, что при данной кинематической схеме в трансмиссии отсутствует циркуляция мощности, наличие которой было обнаружено при анализе трансмиссии TOYOTA THS.

Следует отметить что мощность, реализуемая электромашинами на режимах EVT1 и EVT2, значительно меньше максимальной мощности, которую могут развить эти электромашин (рис. 16). Только на режиме движения, осуществляемого за счет энергии аккумуляторных батарей, электромашин В развивает мощность, близкую к максимальной (рис. 16). При этом следует отметить, что величина динамического фактора более чем в два раза превосходит величину, определяемую сцепными качествами колес с дорогой. Поэтому целесообразно в этой трансмиссии использовать электромашин меньшей мощности. Для этого путем масштабирования исходной внешней характеристики электромашин была получена виртуальная внешняя характеристика. При этом диапазон изменения частоты вращения остался неизменным, а момент для каждого значения частоты был умножен на коэффициент масштабирования. На рис. 18 представлена полученная таким образом виртуальная внешняя характеристика электромашин, полученная путем умножения значений момента на коэффициент 0,5.

На рис. 19 для сравнения показаны два графика изменения динамического фактора. Один из

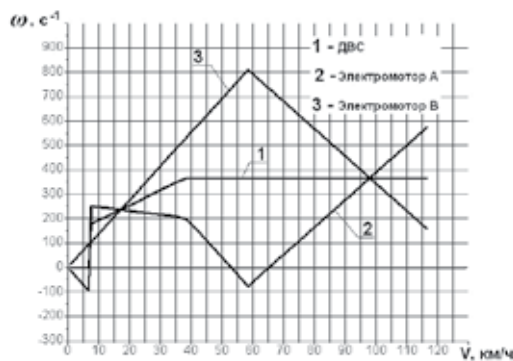


Рисунок 23

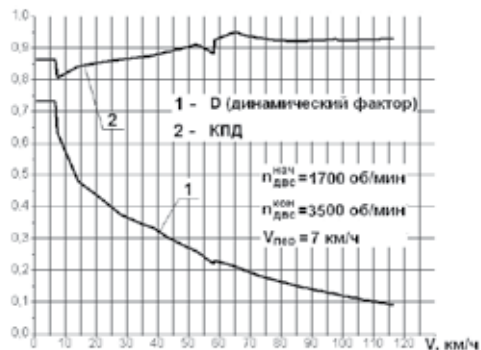


Рисунок 24

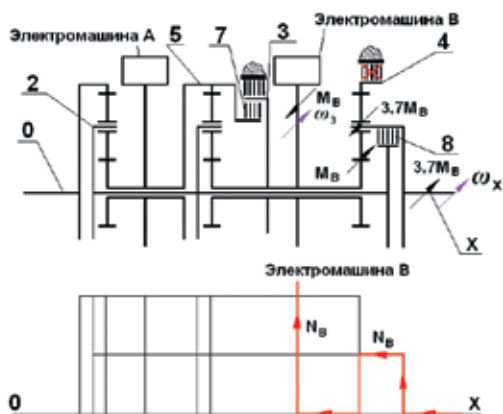


Рисунок 25. Торможение с переводом ДВС в режим холостого хода
 а) Режим EVT1: электромашина А — генератор; электромашина В — двигатель

них построен для трансмиссии с электромашинами мощностью 33 кВт, а второй — для трансмиссии с электромашинами, внешняя характеристика которых представлена на рис. 18. Изменение мощности используемых электромашин привело и к изменению параметров, определяющих плавный переход с режима движения, при котором используется только энергия аккумуляторных батарей, на режим EVT1. Поэтому графики на рис. 19 построены для различных оборотов ДВС $n_{ДВС}$ и скорости перехода $V_{пер}$ с одного режима на другой.

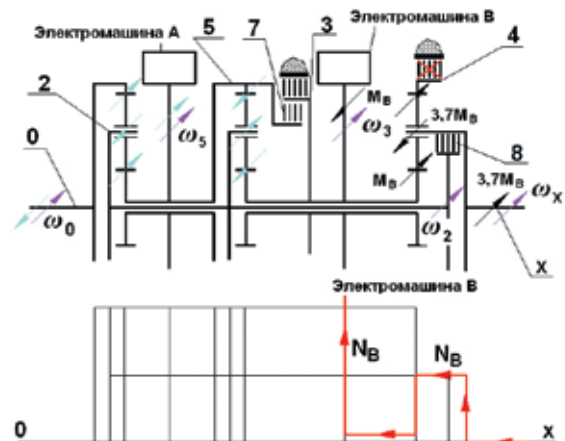


Рисунок 26. Режим EVT1: электромашина А — двигатель; электромашина В — генератор

На рис. 20 и 21 показаны зависимости изменения мощности и моментов электромашин А, В и ДВС. На графиках изменения мощностей можно отметить диапазон скорости (участок АВ), на котором обе электромашин работают в режиме генератора, т.е. обе они работают на зарядку аккумуляторных батарей.

Уменьшение мощности электромашин на 50% практически не изменяет характер зависимости $\eta = f(V)$ и $D = f(V)$ (рис. 22), но следует отметить, что при скоростях движения, больших 60 км/ч, наблюдается уменьшение КПД всей трансмиссии. Это обстоятельство можно объяснить значительным увеличением доли мощности ДВС, передаваемой электрической частью трансмиссии.

Если же в процессе разгона увеличивать по линейному закону частоту вращения ДВС, например, с 1700 об/мин до 3500 об/мин (рис. 23), то это позволяет избежать резкого уменьшения КПД всей трансмиссии (рис. 24).

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.

Режим движения только на энергии аккумуляторных батарей

В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства полностью поглощается электромашинной В и затем накапливается в аккумуляторных батареях. Нагруженность звеньев трансмиссии и распределение потоков мощности для случая движения только на аккумуляторных батареях представлено на рис. 25.

Для данного варианта режима работы ДВС нагруженность звеньев планетарного механизма и распределение потоков мощности показано на рис. 26.

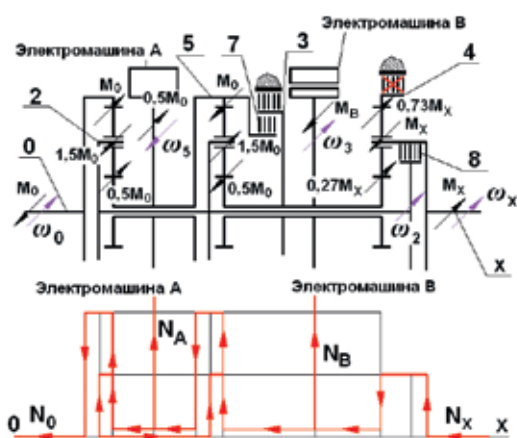


Рисунок 27. Режим EVT2: электромашина А — генератор; электромашина В — двигатель

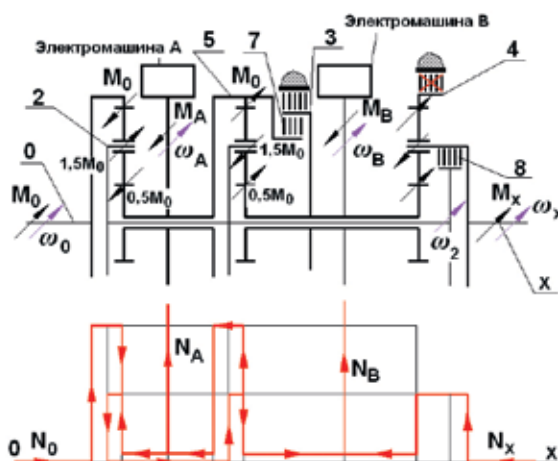


Рисунок 30. Режим EVT1: электромашина А — двигатель; электромашина В — генератор

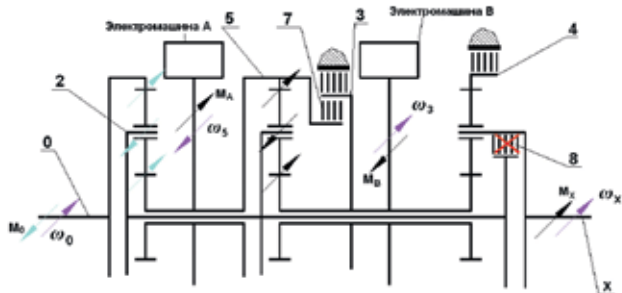


Рисунок 28. Режим EVT2: электромашина А — двигатель; электромашина В — генератор

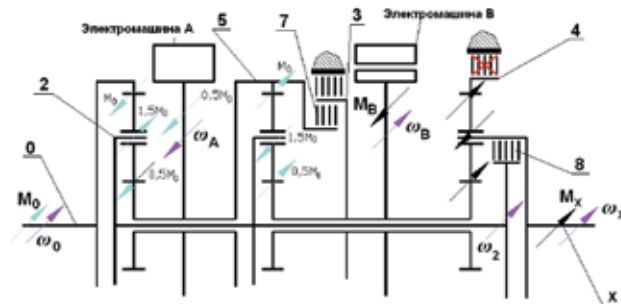


Рисунок 31. Режим EVT2: электромашина А — генератор; электромашина В — двигатель; ДВС — в тяговом режиме

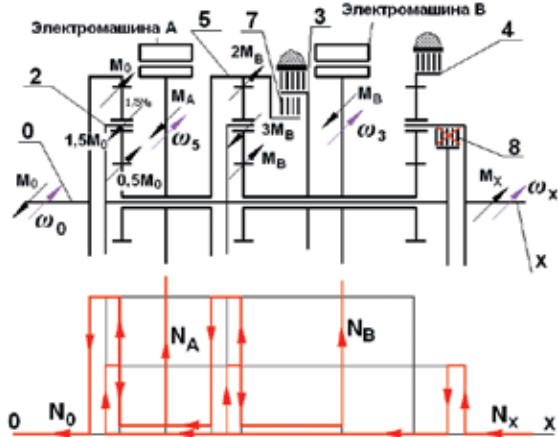


Рисунок 29. Торможение при работе ДВС в тяговом режиме
а) Режим EVT1: электромашина А — генератор; электромашина В — двигатель

Несложный анализ равновесного состояния звеньев показывает, что для равновесия звена 5 необходимо, чтобы электромашина А работала в режиме электродвигателя, т.е. момент, развиваемый ею, должен быть направлен в том же направлении, в котором

происходит вращение этого звена. Но для этого необходим источник энергии, которым может быть либо блок аккумуляторных батарей, либо электромашина В. И то, и другое противоречит принятому допущению. Поэтому для реализации в этом случае режима торможения с рекуперацией кинетической энергии транспортного средства в электрическую необходимо перевести электромашину А в нейтральный режим работы. В результате кинетическая энергия движения транспортного средства, так же как и в предыдущем случае, полностью трансформируется электромашиной В в электрическую, и затем накапливается в аккумуляторных батареях.

Таким образом, торможение с переводом ДВС в режим холостого хода возможно только в том случае, если электромашина А будет находиться в нейтральном состоянии.

В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства распределяется между двумя электромашинами (А и В) и ДВС (см. рис. 27).

Такой режим работы трансмиссии невозможен, поскольку для получения равновесного состояния звена 5 необходимо изменить направление действия

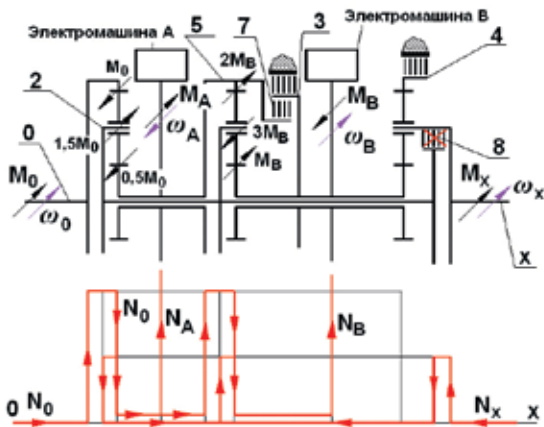


Рисунок 32. Режим EVT2: электромашина А — двигатель; электромашина В — генератор; ДВС — в тяговом режиме

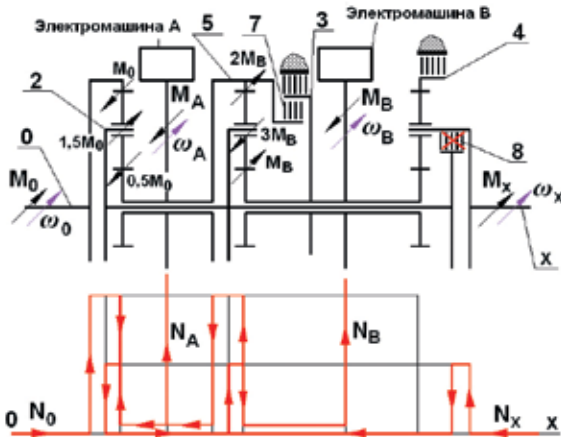


Рисунок 33

момента либо электромашин А, либо электромашин В (см. рис. 28). В том и в другом случае электромашин должны будут работать в режиме электродвигателя, что, как уже отмечалось выше, не соответствует принятому допущению.

В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства распределяется между тремя агрегатами: ДВС, электромашин А и электромашин В (рис. 29).

Таким образом, для данной трансмиссии торможение с рекуперацией кинетической энергии в электрическую при переводе ДВС в режим холостого хода возможно, практически, на всех режимах ее работы.

Нагруженность звеньев планетарного механизма и распределение потоков мощности для этого случая представлены на рис. 30. Как видно, кинетическая энергия транспортного средства полностью преобразуется электромашин В, часть энергии, вырабатываемой ДВС, преобразуется в электрическую

электромашин А, а другая часть — электромашин В.

Для равновесного состояния звена 5 необходимо, чтобы электромашин А работала в режиме электродвигателя (см. рис. 31). Но для этого необходим источник энергии, которым может быть либо блок аккумуляторных батарей, либо электромашин В. И то, и другое противоречит принятому допущению. Перевод этой электромашин в нейтральный режим недопустим, поскольку это нарушит равновесное состояние как звена 5, так и первого планетарного ряда ПР1 (рис. 3). Поэтому можно отметить, что данный режим работы трансмиссии недопустим.

Нагруженность звеньев и распределение потоков мощности для этого режима показаны на рис. 32. Как видно, кинетическая энергия движения транспортного средства полностью поступает в электромашин В, часть энергии ДВС передается в электромашин В, а другая — в электромашин А.

Нагруженность звеньев и распределение потоков мощности для этого режима показаны на рис. 33. Как видно, кинетическая энергия движения транспортного средства полностью поступает в электромашин В, а другая — в электромашин А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tim M. Grewe, Brendan M. Conlon, Alan G. Holmes, «Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission», SAE 2007-01-0273.
2. Красеньков В.И., Вашец А.Д. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин. — М.: Машиностроение. 1986. — 273 с.
3. Крейнс М.А., Розовский М.С. Зубчатые механизмы. — М.: Наука. 1972. — 427 с.