

УДК 621.83.062.1

# ДИНАМИКА ОБМЕНА МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ТРАНСМИССИИ АВТОМОБИЛЯ МАХОВИКА-АККУМУЛЯТОРА С БЕССТУПЕНЧАТЫМ ПРИВОДОМ

А.А. Благодоров, д.т.н., проф. Курганский государственный университет  
А.В. Юркевич, к.т.н., Институт машиноведения УрО РАН

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Движение автомобиля в городе состоит из разгонов и торможений. Большая часть кинетической энергии, накопленной при разгоне, превращается в тепловую при торможении. С середины прошлого века в Европе и США неоднократно предпринимались попытки сохранить энергию при торможении для использования в последующем разгоне с помощью применения маховика с бесступенчатым приводом – гидрообъемным или фрикционным вариатором. Но ни одна из попыток не была принята для реализации в серийном производстве. Другое направление в решении почти той же задачи – гибридные автомобили с электрическими аккумуляторами – добились немалых практических успехов. Но и здесь есть проблемы. Главная – значительные потери, вызванные преобразованием энергии из одного вида в другой. Поэтому направление, связанное с использованием маховика с механическим приводом, несмотря на предыдущие неудачи, сохраняет теоретическую привлекательность.

Использование в качестве привода механического трансформатора с колебательным движением внутренних звеньев [1] даёт новые возможности, так как он обладает адаптивными свойствами. Наличие торсионов между выпрямителями и ведущими шестернями суммирующего редуктора позволяет создавать силовую функцию, потенциал которой определяется амплитудой колебаний и передаточным отношением. Амплитуда колебаний может регулироваться водителем, а передаточное отношение самопроизвольно изменяется в зависимости от нагрузки на ведомом валу. В результате обеспечивается регулируемая внутренняя автоматичность. Это фундаментальное свойство отличает такой трансформатор от вариатора.

Настоящая статья имеет целью показать возможность успешного решения задачи рекуперации энергии при торможении с помощью маховика-аккумулятора, причём при использовании указанного

выше трансформатора задача решается значительно проще, чем при использовании вариатора.

## ОТЛИЧИЕ СВОЙСТВ ВАРИАТОРА И ТРАНСФОРМАТОРА

В вариаторе реализуются неголономные связи между скоростями звеньев с помощью сил трения в подвижном контакте. В трансформаторе связи голономны, но в кинематической цепи имеются выпрямители, преобразующие угловые колебания на входе во вращение одного направления на выходе.

При определении преобразующих свойств трансформатора в качестве аргумента удобнее использовать не передаточное число  $u$ , а его обратную величину – передаточное отношение  $i = n_2/n_1$ , где  $n_2$  и  $n_1$  – частоты вращения ведомого и ведущего валов соответственно. Это позволяет изменением аргумента от 0 до 1,0 охватить весь бесконечно большой кинематический диапазон. Такой же диапазон изменения  $i$  будем применять для вариатора. Если вариатор конструктивно выполнен так, что его  $i_{max} > 1$ , то будем считать, что он дополнен редуктором, обеспечивающим  $i_{max} \in 1$ . Если у вариатора  $i_{min} > 0$ , то будем считать, что  $i \notin 0 \dots i_{min}$  обеспечивается за счёт скольжения.

Передаточное отношение вариатора устанавливается органом управления и не должно зависеть от внешней нагрузки. При отсутствии внешней нагрузки валы вариатора могут вращаться с любым постоянным значением  $i$ . У трансформатора при отсутствии нагрузки внутреннее передаточное отношение  $i_T > 1$ . При этом общее передаточное отношение  $i = i_T \cdot \varphi_0 \cdot i_p$ , где  $\varphi_0$  – амплитуда колебаний;  $i_p$  – передаточное отношение суммирующего редуктора. В [1] представлены внешние характеристики трансформатора при  $\varphi_{0max} \cdot i_p = 1$  и при  $\varphi_{0max} \cdot i_p = 1,2$ .

Моменты на внешних валах вариатора могут принимать любые значения в пределах, ограниченных

для фрикционных вариаторов силой сжатия рабочих поверхностей и реализуемым коэффициентом трения. При этом должно выполняться условие равенства произведений моментов и угловых скоростей на ведущем и ведомом валах. Это условие сохранения механической энергии. Оно выполняется с точностью до КПД, который будем считать достаточно высоким для того, чтобы можно было рассматривать связи как идеальные.

В трансформаторе такое равенство тоже выполняется. При этом величина момента на ведомом валу ограничена регулируемой величиной амплитуды колебаний  $\varphi_0$  [1].

В вариаторе направление потока энергии может измениться на обратное, если номинально ведомый вал станет ведущим. В трансформаторе это исключено благодаря наличию выпрямителей.

В системе управления автомобилем, снабжённым маховиком с бесступенчатым приводом, должно быть четыре режима: 1 – разгон автомобиля от двигателя; 2 – разгон маховика от двигателя; 3 – торможение автомобиля с помощью разгона маховика; 4 – разгон автомобиля с использованием кинетической энергии маховика. Первые два режима не содержат ничего нового и здесь не рассматриваются.

## СИСТЕМА С ВАРИАТОРОМ

При торможении автомобиля с помощью разгона маховика (двигатель при этом отключён) уравнение энергии в дифференциальной форме будет иметь вид

$$dT_a = dT_M + dA_c, \quad (1)$$

где  $dT_a$  – дифференциал кинетической энергии автомобиля;  $dA_c$  – дифференциал работы сил сопротивления движению (дорожного и от сопротивления воздуха);  $dT_M$  – дифференциал кинетической энергии маховика. Для того чтобы величины, составляющие  $T_a$ ,  $T_M$  и  $A_c$ , были одной размерности, представим кинетическую энергию маховика в виде  $T_M = 0,5\delta m_a v_m^2$ , где  $\delta$  – коэффициент учёта вращающихся масс при отсоединённом двигателе;  $m_a$  – масса автомобиля;  $v_m$  – скорость автомобиля, при которой его кинетическая энергия равна кинетической энергии маховика. Скорость движения в городе должна быть не более 60 км/ч. Поэтому маховик и его привод от ведомого вала вариатора выбираются так, чтобы максимальная кинетическая энергия маховика была равна кинетической энергии автомобиля при скорости 60 км/ч. Тогда линейную скорость  $v_m$  можно считать соответствующей угловой скорости маховика.

Теперь уравнение (1) будет иметь вид

$$\delta m_a \cdot v_a \cdot dv_a = \delta m_a \cdot v_m dv_m + m_a g(\psi + f_s) ds, \quad (2)$$

где  $\Psi$  – коэффициент дорожного сопротивления;  $f_s$  – удельная сила сопротивления воздуха;  $ds$  – дифференциал пути,  $ds = v_a dt$ .

Разделив все члены (2) на произведение  $\delta m_a dt$ , получим

$$v_a v_a = v_a v_m + g\delta^{-1}(\psi + f_s)v_a.$$

Отсюда получим

$$v_m/v_a = \left[ v_a - g\delta^{-1}(\psi + f_s) \right] / v_a. \quad (3)$$

Отношение скоростей можно представить в виде

$$v_m/v_a = i(t) \cdot i_a, \quad (4)$$

где  $i(t)$  – передаточное отношение вариатора, изменяемое при управлении;  $i_a$  – постоянное передаточное отношение, учитывающее изменение кинематической цепи при отсоединении ведомого вала автомобиля от ведомого вала вариатора и соединении его с ведущим валом вариатора.

Ускорение (замедление) автомобиля не может быть произвольным. При испытаниях по Правилам ЕЭК ООН № 83 его величина задаётся, а при реальном движении в городе – регулируется водителем в соответствии с дорожной обстановкой. Поэтому обозначим его  $a_a$  и будем считать, что в каждом случае управления его величина разная, но постоянная. Тогда (3) с учётом (4) примет вид

$$i(t) \cdot i_a = \left[ a_a - g\delta^{-1}(\psi + f_s) \right] / v_a. \quad (5)$$

Покажем, что при постоянном значении  $i(t)$  обмена кинетической энергией между автомобилем и маховиком не происходит. Умножив (5) на  $\delta m_a$  и учитывая, что  $a_a$  – замедление, получим

$$-(i \cdot i_a v_a + a_a) \delta \cdot m_a = m_a g(\psi + f_s).$$

С учётом (4) при  $i(t) = const$  получим

$$-[(i \cdot i_a)^2 + 1] \cdot \delta \cdot a_a m_a = m_a g(\psi + f_s).$$

Здесь правая часть есть сила сопротивления движению автомобиля, а левая – сила инерции при замедлении автомобиля вместе с маховиком. Множитель в квадратных скобках увеличивает коэффициент учёта вращающихся масс. При этом  $a_a$  будет значительно меньше требуемого. Происходит «выбег» автомобиля, но с увеличенным значением  $\delta$ . Для того чтобы замедление автомобиля соответствовало требуемому, нужно сразу же по включении третьего режима обеспечить какую-то, пока неизвестную, скорость изменения  $i(t)$ .

Но прежде рассмотрим, какие операции следует выполнить для того, чтобы включить третий режим.

Пусть до включения третьего режима ведущий вал вариатора был соединён с валом двигателя и вращался с частотой  $n_1 = 0,5n_N$ , где  $n_N$  – частота вращения вала двигателя при максимальной мощности; ведомый

вал вариатора был соединён с ведомым валом автомобиля и вращался с частотой, соответствующей  $v_a = 30$  км/ч; вариатор имел передаточное отношение  $i = 0,5$ ; маховик вращался по инерции, а вал его привода вращался с частотой, соответствующей  $v_M = 10$  км/ч. Предложенные значения  $i$  и  $n_1$  вполне подходят для автомобиля типа «Газель», движущегося со скоростью 30 км/ч, но имеющего возможность развивать максимальную скорость 120 км/ч.

Для того чтобы включить третий режим, нужно выполнить следующие операции: 1) отсоединить двигатель от ведущего вала вариатора; 2) отсоединить ведомый вал автомобиля от ведомого вала вариатора; 3) соединить ведомый вал автомобиля с ведущим валом вариатора; 4) соединить ведомый вал вариатора с валом привода маховика. Первые две операции не вызывают затруднений. При выполнении третьей операции для того, чтобы ведущий вал вариатора вращался так же, как он вращался от двигателя, ведомый вал автомобиля нужно соединить с ним через ускоряющую передачу с передаточным отношением  $i_a = 2$ . Тогда  $i \cdot i_a = 1$ . Если передаточное отношение вариатора отличалось от 0,5, то безударное соединение валов может быть обеспечено с помощью синхронизатора. Момент инерции, приведённый к ведущему валу свободно вращающегося вариатора, невелик. Поэтому затраты энергии на синхронизацию будут незначительны.

При выполнении четвёртой операции синхронизация соединяемых валов может быть выполнена только с помощью изменения передаточного отношения вариатора. В рассматриваемом примере нужно уменьшить его в 3 раза. Следовательно, в системе управления должно быть автоматически действующее устройство, которое измеряет частоты вращения соединяемых валов, перемещает орган управления передаточным отношением так, чтобы обеспечить их равенство, включает соединительную муфту. Никакие фрикционные устройства тут не помогут. Во-первых, потому что передаточное отношение вариатора, как и зубчатой передачи, не должно зависеть от нагрузки; во-вторых, потому что к соединяемым валам приведены большие моменты инерции, учитывающие массу автомобиля и момент инерции маховика.

Теперь определим, как должно изменяться передаточное отношение после включения третьего режима.

Будем считать, что кинетическая энергия системы изменяется только благодаря работе силы сопротивления движению. Тогда можно записать

$$T_t = T_0 - mg(\psi + f_n)s_t, \quad (6)$$

где  $T_t$  – кинетическая энергия системы (автомобиля и маховика) в текущее время;  $T_0$  – то же, но при  $t = 0$ ;  $S_t$  – путь, пройденный за время  $t$ . Разделив все члены на  $0,5 \delta t$ , получим

$$v_{at}^2 + v_{st}^2 = v_{a0}^2 + v_{s0}^2 - 2g\delta^{-1}(\psi + f_n)s_t.$$

Здесь

$$v_{at} = v_{a0} - a_a t; \quad s_t = v_{a0} \cdot t - 0,5 a_a t^2.$$

$$v_{st} = \sqrt{v_{s0}^2 + v_{a0}^2 - 2g\delta^{-1}(\psi + f_n)(v_{a0} \cdot t - 0,5 a_a t^2)} - v_{at}.$$

Передаточное отношение можно представить формулой

$$i(t) = [v_{s0}^2 + v_{a0}^2 - 2g\delta^{-1}(\psi + f_n)(v_{a0} \cdot t - 0,5 a_a t^2) - v_{at}^2]^{1/2} \cdot i_a^{-1} (v_{a0} - a_a t)^{-1} \quad (7)$$

Скорость изменения передаточного отношения, необходимая для обеспечения заданного значения  $a_a$ , определяется производной функции (7). Таким образом, автоматическое устройство, обеспечивающее синхронизацию при включении третьего режима, должно быть дополнено вычислительным и исполнительным устройствами, обеспечивающими нужную скорость изменения  $i(t)$  при включённом третьем режиме.

Заметим, что полностью остановить автомобиль с помощью разгона маховика не удастся. Из (4) видно, что при  $v_a \rightarrow 0$   $i(t) \rightarrow \infty$ . Поэтому на третьем режиме скорость  $v_a$  может быть уменьшена лишь до определённой величины, например 10 км/ч. Дальнейшее уменьшение скорости осуществляется с помощью тормозов и действия силы сопротивления движению. При этом третий режим должен быть включён.

Теперь рассмотрим четвёртый режим – разгон автомобиля с места с использованием энергии маховика.

При включении четвёртого режима возникают те же трудности, что и при включении третьего. Приверженцы вариаторов могут возразить, что третий и четвёртый режимы в вариаторе – это один и тот же режим, но с противоположным направлением энергии. Пусть так. Но его нужно включить, так как автомобиль был остановлен, а маховик имеет достаточно большую кинетическую энергию. Если у вариатора  $i_{min} > 0$ , то неизбежны значительные потери энергии во фрикционных устройствах.

Когда четвёртый режим наконец включён, уравнение (1) принимает вид

$$dT_a + dA_c = dT_M. \quad (8)$$

Теперь ведущим звеном является маховик, а ведомым – автомобиль. Поэтому вместо (4) будем иметь

$$v_a/v_M = i(t) \cdot i_m, \quad (9)$$

где  $i_m$  – постоянное передаточное отношение в направлении от ведомого вала вариатора через привод маховика к ведущему валу вариатора. Так как угловые скорости ведомого вала автомобиля и вала привода маховика должны соответствовать линейным скоростям  $v_a$  и  $v_m$ , то должно быть  $i_m = i_a$ .

На основании (8) можно получить

$$i(t) \dot{v}_a = \dot{v}_a \left[ a_n + g\delta^{-1}(\psi + f_n) \right], \quad (10)$$

где  $a_a$  – уже не замедление, а ускорение.

Управление передаточным отношением для получения заданного значения  $a_a$  вместо (7) теперь определяется формулой

$$i(t) = a_a t \cdot \left[ v_{a0}^2 - g\delta^{-1}(\psi + f_n) a_a t^2 - v_{at}^2 \right]^{-1/2} \cdot i_a^{-1}. \quad (11)$$

Так же, как и на третьем режиме, при постоянном значении  $i(t) = i$  обмена кинетической энергией между маховиком и автомобилем не происходит.

Необходимость сложной информационно-управляющей системы (ИУС) является основной трудностью при решении задачи рекуперации энергии при торможении с использованием вариатора.

### СИСТЕМА С ТРАНСФОРМАТОРОМ

При использовании трансформатора с колебательным движением внутренних звеньев и наличием упругих валов между выпрямителями и суммирующим редуктором необходимость в сложной ИУС отпадает, так как подобный трансформатор обладает регулируемой внутренней автоматичностью. Водитель с помощью педали может изменять интенсивность обмена энергией так же, как он это делает при управлении подачей топлива или при торможении. При работе трансформатора за каждый оборот ведущего вала на каждом торсионном валу создаётся и пропадает потенциальная энергия  $\Pi = 0,5c\varphi_T^2$ , где  $c$  — угловая жёсткость, а  $\varphi_T$  — угол закрутки торсионного вала. Если ведомый вал трансформатора неподвижен (стоповый режим), то выпрямители, соединённые с ним торсионными валами, включены в течение всего цикла. Поэтому за один оборот ведущего вала потенциальная энергия каждого торсиона возрастает от нуля до максимума и уменьшается до нуля, возвращая ведущему валу энергию, затраченную на её создание. Так как имеется несколько торсионов, работающих со сдвигом по фазе, то при любом значении  $t$  есть какой-то уровень общей потенциальной энергии. В результате создаётся силовая функция, равная потенциальной энергии с обратным знаком. Эта силовая функция создаёт момент на ведомом валу трансформатора. Если ведомый вал вращается, то за время одного периода совершается работа, равная произведению момента на угол поворота. На величину этой работы, делённой на число торсионов, уменьшается величина потенциальной энергии, возвращаемой каждым торсионом на ведущий вал. Поэтому работа, затраченная ведущим валом за цикл, равна работе на ведомом валу за то же время. Потенциальная энергия каж-

дого торсионного вала участвует в передаче энергии от ведущего вала к ведомому, но только в течение цикла. В следующем цикле всё повторяется с нуля. Поэтому при интегрировании уравнений (1) или (8) за время множества циклов учитывать изменение потенциальной энергии не нужно. При увеличении угловой скорости ведомого вала фаза включённого состояния выпрямителей в цикле уменьшается; уменьшается максимальный угол закрутки торсионов; уменьшается значение силовой функции и момента, передаваемого на ведомый вал. Изменение угла закрутки в зависимости от  $i$  рассмотрено в [2]. Регулируемой водителем величиной является амплитуда колебаний  $\varphi_0$ .

В [1] получена внешняя характеристика трансформатора в относительных единицах. На её основе при  $\varphi_{0\max} \cdot i_p = 1,2$  получена тяговая характеристика применительно к автофургону на базе автомобиля типа «Газель». Она показана на рис. 1.

Характеристика получена при условии, что при  $v_{a\max} = 120$  км/ч удельная сила тяги  $f_T = f_g + \psi$ . При  $m_a = 3500$  кг, коэффициенте обтекаемости  $k_g = 0,4$  [Н·с<sup>2</sup>/м], площади поперечного сечения  $F = 3,8$  м<sup>2</sup> получим  $f_g = 0,05$ . Тогда при  $\psi = 0,02$   $f_T = k_2 0,07$ .

Аргументом характеристики может служить как скорость  $v_a$ , так и передаточное отношение  $i$ . Передаточное отношение  $i = 1$  соответствует скорости  $v_a = 120$  км/ч только при частоте вращения ведущего вала трансформатора  $n_i = n_N$  — частоте вращения вала двигателя при максимальной мощности. При  $n_i < n_N$  передаточным отношениям  $i$  соответствуют пропорционально меньшие значения  $v_a$ . При движении в городе режим  $n_i = n_N$  практически никогда не применяется. Поэтому в качестве аргумента будем использовать  $i$ .

На рис. 1 тяговая характеристика представлена двумя ветвями:  $f_T(i)$  и  $f'_T(i)$ . Здесь  $f_T(i)$  — тяговая характеристика, полученная при условии, что момент на ведущем валу трансформатора не превышает величину  $M_N$  — момент, развиваемый двигателем в ре-

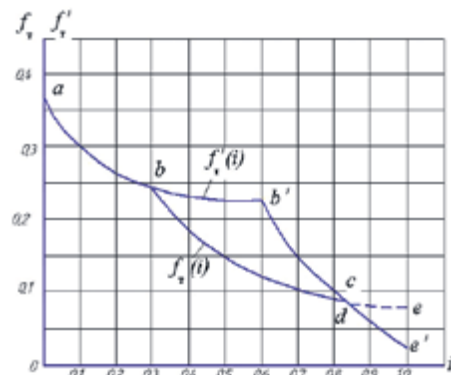


Рисунок 1. Внешняя характеристика трансформатора

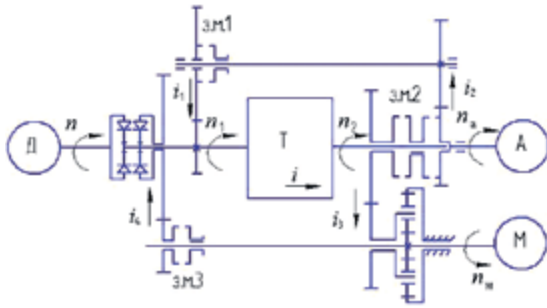


Рисунок 2. Кинематическая схема трансмиссии

жиме максимальной мощности. Характеристику  $f_T(i)$  следует использовать при расчёте разгона автомобиля или маховика от двигателя (1-й и 2-й режимы). Участок  $de$ , показанный пунктиром, соответствует включению прямой передачи. На 3-м и 4-м режимах момент на ведущем валу трансформатора создаётся не двигателем, а с помощью использования кинетической энергии автомобиля или маховика. Поэтому на этих режимах следует использовать характеристику  $f'_T(i)$ . При  $f'_T(i) > f_T(i)$  мощность, передаваемая трансформатором, может превышать мощность двигателя. Режим прямой передачи не используется, так как двигатель может работать на минимальных холостых оборотах или даже быть выключенным.

На рис. 2 представлена кинематическая схема трансмиссии, соединяющая двигатель (Д), трансформатор (Т), ведомый вал автомобиля (А) и вал маховика (М). Режимы переключаются с помощью зубчатых муфт 3М1, 3М2, 3М3, снабжённых синхронизаторами. При переключении режимов педаль, управляющая амплитудой колебаний, отпущена,  $\varphi_0 = 0$ . Поэтому переключение режимов осуществляется без затруднений.

Маховик для автомобиля типа «Газель» с полной массой  $m_a = 3500$  кг представляет собой установленный на подшипниках полуметровый отрезок стальной трубы с толщиной стенки 10 мм и диаметром 300 мм. Для того чтобы его масса была в 100 раз меньше массы автомобиля, а его кинетическая энергия равнялась кинетической энергии автомобиля, линейная скорость обода маховика должна быть в 10 раз больше линейной скорости автомобиля. Тогда кинетическая энергия такого маховика при частоте его вращения  $10000 \text{ мин}^{-1}$  будет равна кинетической энергии автомобиля при скорости 60 км/ч. При этом растягивающие напряжения в ободу маховика, возникающие от действия центробежных сил, не превышают 225 МПа. Гироскопический момент, действующий на опоры маховика при крутых поворотах автомобиля, не превышает 450 Нм.

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ

При  $n_1 = n_N = 5000 \text{ мин}^{-1}$  автомобиль набирает скорость  $v_a = 60 \text{ км/ч}$  при  $i = 0,5$  и  $= 2500 \text{ мин}^{-1}$ . Тогда  $v_a = 60 \cdot n_a / 2500 \text{ [км/ч]}$ ;  $v_m = 60 \cdot n_m / 10000 \text{ [км/ч]}$ .

На третьем режиме (при торможении автомобиля маховиком) ведомый вал автомобиля ( $n_a$ ) соединён с ведущим валом трансформатора ( $n_1$ ). Для того чтобы при  $n_a = 2500 \text{ мин}^{-1}$  получить  $n_1 = 5000 \text{ мин}^{-1}$ , нужно, чтобы произведение  $i_1 \cdot i_2$  было равно 2. Это произведение и есть передаточное отношение  $i_a$ , использованное в (4). Но оно может несколько отличаться от указанной величины, если это оправдано практической целесообразностью.

На четвёртом режиме (при разгоне автомобиля от маховика) ведущий вал трансформатора ( $n_1$ ) приводится в движение от вала маховика ( $n_m$ ). Для того чтобы при  $n_m = 10000 \text{ мин}^{-1}$  получить  $n_1 = 5000 \text{ мин}^{-1}$ , передаточное отношение  $i_4$  (рис. 2) должно быть равно 0,5. Если максимальная угловая скорость маховика достигается при передаточном отношении трансформатора  $i = 0,5$ , то должно быть  $i_3 = 4$  (рис. 2). Тогда  $i_3 \cdot i_4 = 2$ , что соответствует  $i_m$  в (9). Но для того, чтобы обеспечить возможность торможения автомобиля с помощью разгона маховика при меньших значениях  $v_a$ , целесообразно уменьшить  $i$  при  $v_{m \text{ max}}$ , например, до величины  $i = 0,3$ . Тогда передаточное отношение  $i_3$  (рис. 2) принимает значение  $i_3 = 6,66$  (включая простую и планетарную передачи).

## ЭНЕРГОЗАТРАТЫ

Разгон маховика от двигателя через трансформатор (режим № 2) может происходить при работе двигателя в самом экономичном режиме. Поэтому было бы заманчиво при движении по простому городскому циклу, соответствующему Правилам, перед каждым подциклом разгонять маховик до максимальной кинетической энергии и использовать её для совершения работы, потребной на весь подцикл или на большую его часть, подключая двигатель только тогда, когда кинетической энергии маховика оказывается недостаточно для обеспечения требуемых параметров движения. Между подциклами есть достаточно времени (21 с.) для восполнения кинетической энергии маховика.

Но в простом городском цикле есть подциклы разной энергоёмкости. При подцикле с наименьшей энергоёмкостью недоиспользованная кинетическая энергия маховика может привести к тому, что при включении третьего режима передаточное отношение трансформатора может оказаться  $i > 1,0$ . При этом удельная сила тяги будет слишком мала для обеспечения требуемого замедления автомобиля.

Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Во всех трёх подциклах, предложенных Правилами, замедление при  $v_a < 10$  км/ч равно  $0,92$  м/с<sup>2</sup>. Это замедление обеспечивается с использованием тормозов. Мы тоже будем использовать тормоза только при  $v_a < 10$  км/ч. Но при  $v_a > 10$  км/ч замедления в подциклах заданы различные. В наименее энергоёмком подцикле  $a_a = -0,69$  м/с<sup>2</sup>. Нужно считать порядок чередования подциклов случайным. Тогда начальное значение кинетической энергии маховика перед каждым подциклом должно быть одним и тем же.

На третьем режиме замедление автомобиля определяется уравнением

$$a_a = -g\delta^{-1}(i \cdot \gamma \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot f'_T(i) + \psi + f_s), \quad (12)$$

где  $\gamma$  – доля используемой водителем величины  $\varphi_0$ ,  $\gamma \in 0 \dots 1,0$ . При  $i \cdot \gamma = 1$  удельная сила тяги  $f_T = 0,025$  (рис. 1). Соппротивление воздуха учитывать не будем ( $f_s = 0$ ). Принимаем  $\psi = 0,02$ . Тогда для того, чтобы получить  $a_a = -0,69$  м/с<sup>2</sup>, нужно применять  $i_1 \cdot i_2 = 2,12$ . Это немного больше, чем мы предполагали ранее, но вполне допустимо.

Теперь с помощью представленных выше зависимостей  $v_a(n_a)$  и  $v_M(n_M)$  можно определить функцию  $i(v_a, v_M)$ , что важно для нахождения ускорений на третьем и четвёртом режимах. На третьем режиме  $i = 0,283 v_M/v_a$ , а на четвёртом –  $i = 0,5 v_a/v_M$ .

Таким образом, при прохождении подцикла с малой энергоёмкостью, назовём его первым, при включённом третьем режиме перед окончательным торможением ( $v_a = 10$  км/ч) для того, чтобы обеспечивалось заданное замедление, должно быть  $v_M \leq 35,3$  км/ч. Энергетический баланс можно представить уравнением

$$T_{M0} + A_D = m \cdot g \cdot \psi \cdot s_0 + 0,5\delta \cdot v_{aT}^2 - m \cdot g \cdot \psi \cdot s_T + T_{M1}. \quad (13)$$

Здесь  $T_{M0}$  – начальное значение кинетической энергии маховика;  $A_D$  – энергия, затраченная двигателем в ходе подцикла;  $s_0$  – общий путь подцикла;  $v_{aT}$  – скорость, при которой включаются тормоза,  $v_{aT} = 10$  км/ч;  $s_T$  – путь, пройденный с использованием тормозов;  $T_{M1}$  – кинетическая энергия маховика в конце подцикла.

Для первого подцикла

$$T_{M1} = 0,5m \cdot g \cdot v_{M1}^2,$$

где  $v_{M1} = 35,3$  км/ч (9,8 м/с). Тогда, задавая  $A_D = 0$ , получим

$$T_{M0} = 0,5m \cdot g \cdot v_{M0}^2,$$

где  $v_{M0}^2 = 39,8$  км/ч (11,05 м/с). Если бы всё движение состояло из повторяющихся первых подциклов, то можно было бы на остановках между подциклами раскручивать маховик от 35,3 до 39,8 км/ч и не использовать двигатель при движении. При этом расход топлива был бы минимальным. Такое движение могло бы быть аналогом движения в транспортных заторах. Но это отдельный вопрос.

Второй и третий подциклы по Правилам более энергоёмкие и  $A_D \neq 0$ . Кроме того, задаваемые замедления при  $v_a = 10$  км/ч тоже несколько большие. Для того чтобы обеспечивались заданные замедления, значение начальной скорости  $v_{M0}$  для всех подциклов должно быть не более 36 км/ч.

Уточнённая оценка уменьшения расхода топлива требует данных по многопараметровой характеристике двигателя. Здесь же ограничимся оценкой уменьшения общего расхода энергии. При этом выбор начальной  $v_{M0}$  не имеет значения.

На основании (13) удельный (отнесённый к массе автомобиля) суммарный расход энергии в любом подцикле для автомобиля с маховиком-аккумулятором и без него можно представить уравнением

$$A/m_a = g\psi s_0 + 0,5\delta v_a^2 - g\psi s_T. \quad (14)$$

Но здесь для автомобиля с маховиком-аккумулятором:  $v_a = 10$  км/ч;  $S_T$  – путь, пройденный с использованием тормозов. А для автомобиля без маховика-аккумулятора:  $v_a$  – максимальная скорость автомобиля в подцикле;  $S_T$  – путь, пройденный с отрицательным ускорением вне зависимости от того, за счёт чего оно получено (тормоза, торможение двигателем, сопротивление движению).

Расчёт суммарных энергозатрат по полному городскому циклу в соответствии с Правилами ЕЭК ООН № 83 показал, что автомобиль с маховиком-аккумулятором расходует энергии на 33% меньше, чем автомобиль без него. Расход топлива может отличаться ещё больше по причинам, изложенным выше. Вместе с расходом топлива уменьшается и объём экологически вредных выбросов в атмосферу. Приведённая количественная оценка справедлива для системы с идеальными связями. В реальной системе выигрыш будет несколько меньше, но ненамного. Потери энергии в механических выпрямителях не превышают 2% [2], а потери в других кинематических парах нетрудно оценить по кинематической схеме. Полученный результат свидетельствует о целесообразности и даже необходимости проведения плановых ОКР по изложенному направлению и в первую очередь для такого массового городского автомобиля, как «Газель», но только с применением трансформатора, обладающего регулируемой внутренней автоматичностью, а не вариатора, у которого этого свойства нет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Благодравов А.А. Расчёт внешней характеристики механического трансформатора с колебательным движением внутренних звеньев // Вестник машиностроения. – 2011. – № 10. – С. 8–13.
2. Благодравов А.А. Механические бесступенчатые передачи. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 202 с.