



**БАРБАШОВ**  
Николай Николаевич  
аспирант



**ЛЕОНОВ**  
Игорь Владимирович  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Теория механизмов  
и машин»  
(МГТУ им Н.Э. Баумана)

## Улучшение механических характеристик механизмов привода маховичных аккумуляторов энергии

**Н.Н. Барбашов, И.В. Леонов**

*Разработанная энергетическая модель позволяет провести моделирование характеристик машин с гибридными силовыми установками и выработать рекомендации по повышению экономичности машин с маховичным накопителем энергии путем выбора оптимального передаточного отношения при рекуперации энергии торможения.*

**Ключевые слова:** расход энергии, гибридный привод, проектирование, разгон, торможение, рекуперация энергии, моделирование.

*The developed energy model of the hybrid power vehicle with a flywheel energy accumulator permits to simulate the vehicle characteristics and to draw up recommendations to improve the vehicle efficiency based on the optimal gear ratio under braking energy recuperation.*

**Keywords:** power consumption, hybrid drive, designing, acceleration, braking, energy recuperation, modeling.

Основные причины роста потребления энергии машинами — их работа на неустановившихся режимах с частым чередованием разгонов и торможений. В последнее время в мире получили широкое распространение гибридные силовые установки, так как их применение позволяет снизить расходы топлива (например, по данным производителя автомобиля Toyota Prius на — 43%). В настоящее время запатентовано огромное количество различных гибридных схем, но наибольшее распространение получила гибридная схема, в которой обратимая электромашина соединяется параллельно с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) механической трансмиссией. Ведутся интенсивные разработки электромобилей.

Однако в российских условиях применение электромобилей вызывает дополнительные сложности по сравнению с гибридными. Аккумуляторные батареи не выдерживают низких температур зимой, а подзарядки таких машин — дело длительное, и требующее большого количества зарядных станций. Поэтому целесообразно использовать более простое техническое решение, основанное на применении маховичного аккумулятора энергии. Подобное решение уже применялось швейцарской компанией «Эрликон» около 60 лет назад в «гиробусе» — автобус с маховичным накопителем энергии. А в 1966—1973 гг. профессор Н.В. Гулиа создал гибридный силовой агрегат на базе автомобиля УАЗ и добился снижения расхода топлива на 45% [1].

Современная английская компания Flybrid подготовила систему рекуперации кинетической энергии на базе маховичного накопителя

и механической трансмиссии для гоночных автомобилей класса «Формула-1», но после нескольких тестов компания предпочла использовать маховичный накопитель с электрической передачей.

Практически единственным способом управления маховичным аккумулятором является изменение передаточного отношения его привода, однако теория способа управления изменением передаточного отношения для рекуперации энергии торможения транспортных машин до настоящего времени разработана недостаточно полно.

Рекуперация энергии торможения и ее накопление в маховике осуществляется путем изменения передаточного отношения вариатора, изображенного на рис. 1, связывающего маховик с трансмиссией машины.

Представленная модель описывает только одну степень свободы привода от трансмиссии машины маховика с помощью управляемого вариатора скоростей. При описании динамического поведения трансмиссии под действием внешнего возмущения и внутреннего в виде момента рекуперации при изменении передаточного отношения, необходимо использовать систему уравнений двухмассовой системы.

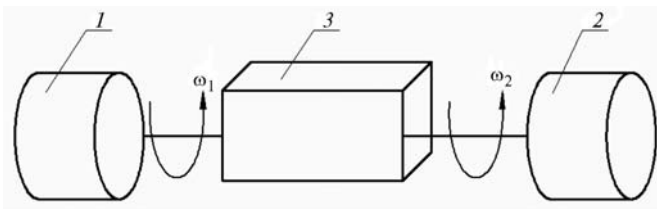


Рис. 1. Схема машины с маховичным аккумулятором энергии:

- 1 — момент инерции маховика аккумулятора;
- 2 — приведенный момент инерции машины;
- 3 — вариатор

Если в качестве критерия оптимизации выбрать кинетические потери энергии при торможении, то закон изменения передаточного отношения вариатора будет оптимальным, обеспечивая постоянное значение кинетической энергии машины:

$$T_{\Sigma} = T_{\max} + T_{\text{тр}} = \text{const},$$

где  $T_{\max} = \frac{J_{\max} (\omega_{\max})^2}{2}$  — кинетическая энергия

маховика;  $T_{\text{тр}} = \frac{J_{\text{тр}} (\omega_{\text{тр}})^2}{2}$  — кинетическая энергия трансмиссии машины;  $\omega_{\text{тр}}$ ,  $\omega_{\max}$  — угловые скорости выходного вала трансмиссии и маховика;  $J_{\max}$ ,  $J_{\text{тр}}$  — моменты инерции маховика и машины.

Первая задача, решаемая с помощью динамической модели (см. рис. 1) — это расчет необходимого момента инерции маховика. Начальный запас кинетической энергии машины перед торможением и запас ее в маховике после торможения должны быть равны:

$$T_{\max} = \frac{J_{\max} (\omega_{\max})_{\max}^2}{2} = T_{\text{тр max}} = \frac{J_{\text{тр}} (\omega_{\text{тр}})_{\max}^2}{2}.$$

Это соотношение позволяет определить необходимый момент инерции маховика для использования всей кинетической энергии машины и исключения кинетических потерь при торможении

$$\frac{J_{\text{тр}}}{J_{\max}} = \left[ \frac{(\omega_{\max})_{\max}}{(\omega_{\text{тр}})_{\max}} \right]^2 = (U_{\text{вар}})_{\max}^2.$$

Вторая задача, которую необходимо решить — это расчет закона изменения передаточного отношения при полной рекуперации энергии торможения. По традиции кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана закон изменения скорости маховика при торможении машины с учетом необходимого соотношения моментов инерции определяется по уравнению сохранения энергии машины и имеет вид

$$\frac{\omega_{\max}}{(\omega_{\max})_{\max}} = \sqrt{1 - \left[ \frac{\omega_{\text{тр}}}{(\omega_{\text{тр}})_{\max}} \right]^2}.$$

Необходимый закон изменения передаточного отношения вариатора в функции отношения максимальной и текущей скорости  $\frac{(\omega_{\text{тр}})_{\max}}{\omega_{\text{тр}}}$

при торможении имеет следующий вид:

$$U_{\text{вар}}(\omega_{\text{тр}}) = \sqrt{\left[ \frac{(\omega_{\text{max}})_{\text{max}}}{\omega_{\text{тр}}} \right]^2 - 1}$$

Анализ этого уравнения позволяет получить безразмерную зависимость оптимального закона изменения передаточного отношения вариатора:

$$U_{\text{вар}}(\omega_{\text{тр}}) = \sqrt{\left[ \frac{(U_{\text{вар}})_{\text{max}}(\omega_{\text{тр}})_{\text{max}}}{\omega_{\text{тр}}} \right]^2 - 1}$$

На рис. 2 представлена оптимальная зависимость изменения передаточной функции вариатора при торможении, начиная с максимального значения скорости движения главного вала машины  $\omega_{2\text{max}}$ .

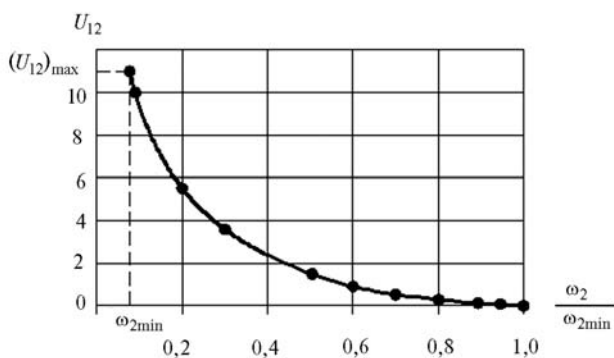


Рис. 2. Зависимость передаточной функции вариатора для обеспечения постоянного значения кинетической энергии системы

Практически все известные вариаторы скоростей имеют ограничение по максимальному и минимальному передаточным отношениям, и это будет сказываться на экономических характеристиках процесса рекуперации энергии маховичным аккумулятором. При ограничении максимального значения передаточного отношения вариатора  $(U_{12})_{\text{max}}$  перекачка кинетической энергии в маховик при торможении машины прекращается при достижении скорости трансмиссии машины  $\omega_{2\text{min}}$ , как показано на рис. 2:

$$(\omega_2)_{\text{min}} = \frac{(\omega_1)_{\text{max}}}{(U_{12})_{\text{max}}}$$

Управление рекуперацией энергии осуществляется системой управления, при этом полная остановка машины должна обеспечиваться обычной тормозной системой с некоторыми потерями кинетической энергии. При ограниченном минимальном передаточном отношении  $(U_{12})_{\text{min}}$  при достижении максимального значения скорости маховика рекуперация энергии торможения прекращается. Таким образом часть энергии торможения теряется и некоторую часть кинетической энергии торможения нельзя использовать, что вызывает появление потерь энергии с коэффициентом потерь

$$d_{\text{п}} = \left[ \frac{(\omega_2)_{\text{min}}}{(\omega_2)_{\text{max}}} \right]^2$$

Следовательно, это вызывает и снижение КПД процесса рекуперации энергии на некоторую величину в зависимости от ограничений передаточного отношения вариатора

$$\begin{aligned} \eta_{\text{рек}} &= 1 - \chi_{\text{цикла}} = \\ &= \frac{[(\omega_2)_{\text{max}}^2 + (\omega_2)_{\text{min}}^2][(\omega_2)_{\text{max}}^2 - (\omega_2)_{\text{min}}^2]}{(\omega_2)_{\text{max}}^2} = \\ &= \frac{2(\omega_2)_{\text{cp}} D_{\text{max}}}{(\omega_2)_{\text{max}}^2}, \end{aligned}$$

где  $D_{\text{max}} = (\omega_2)_{\text{max}} - (\omega_2)_{\text{min}}$  — диапазон изменения скорости машины при рекуперации;  $(\omega_2)_{\text{cp}} = \frac{(\omega_2)_{\text{max}} + (\omega_2)_{\text{min}}}{2}$  — средняя скорость в диапазоне рекуперации.

### Выводы

1. Оптимальный закон изменения передаточного отношения  $U_{\text{опт}}$  не зависит от действующих сил (моментов сил), а определяется только изменением скорости машины  $\omega_{\text{тр}}$ . Поэтому вариатор может быть подключен к системе автоматического регулирования скорости машины без использования импульса по нагрузке [2] (рис. 3).

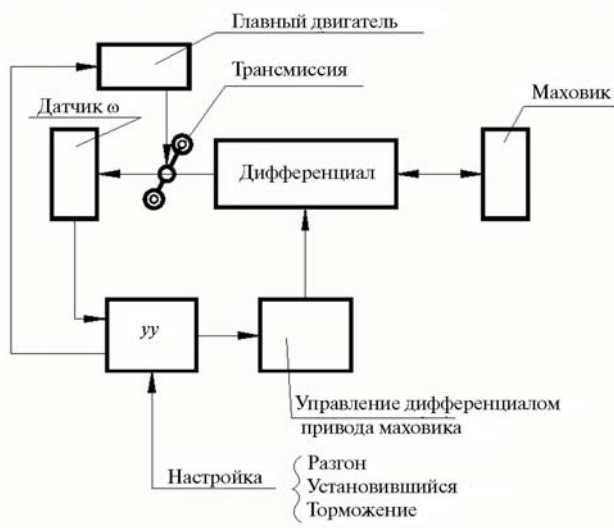


Рис. 3. Система регулирования скорости транспортной машины

2. В виду простоты включения маховичного аккумулятора в систему автоматического регулирования скорости машины и по причине его надежности применение его становится пред-

почтительнее электрического аккумулятора энергии.

3. Оптимальное передаточное отношение может обеспечить только постоянство запаса кинетической энергии машины. Отклонение от оптимального закона изменения передаточного отношения вариатора вызывает снижение коэффициента рекуперации и повышения расхода энергии [3].

### Литература

1. Гулиа Н.В., Давыдов В.В., Бабин В.А., Лаврентьев А.И. Механическая гибридная силовая установка как кардинальное решение экономических и экологических проблем коммерческого транспорта в мегаполисе. Наука и техника, 2007.
2. Барбашов Н.Н., Леонов И.В. Выбор оптимальной мощности ДВС машины с гибридными двигателями.
3. Положительное решение на выдачу патента: «Устройство рекуперации энергии торможения машины». 12.03.2010, № 1010109031/11 (012639).

Статья поступила в редакцию 26.10.2011 г.