

Н. Н. Барбашов, И. В. Леонов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА С МАХОВИЧНЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ЭНЕРГИИ

Рост расхода энергии машин на неустановившихся режимах требует создания энергетических математических моделей и на их основе выработки рекомендаций по повышению экономичности. Разработанная энергетическая модель позволяет провести моделирование экономических характеристик машин и выработать рекомендации по повышению экономичности машин с маховичным накопителем энергии путем выбора оптимального закона изменения передаточного отношения при рекуперации энергии торможения.

E-mail: dm_leonov.mail.ru

Ключевые слова: режим разгон-торможение, рекуперация энергии, математическая модель, передаточный механизм, маховичный накопитель, повышение экономичности.

Значительную часть времени современные машины работают на неустановившихся режимах. Несомненно, что причинами снижения экономичности машин являются колебания скорости и нагрузки, отклонения которых от оптимальных значений и вызывают рост потерь энергии. Другая причина роста потерь энергии — это потеря кинетической энергии в процессе принудительного торможения машин и при их остановке [1–5]. В настоящее время появились машины нового класса с гибридными силовыми установками, которые могут рекуперировать энергию торможения.

Значительные преимущества имеют машины с маховичным аккумулятором энергии с высоким сроком службы. Управление потоком энергии в маховичном аккумуляторе осуществляется изменением передаточного отношения с трансмиссией.

На установившихся режимах в качестве критерия экономичности расхода энергии всегда использовался КПД машины с однозначной связью между потерями энергии и КПД. В таком же направлении выполняются исследования неустановившихся режимов разгон-торможение для оценки экономических качеств машин:

$$\eta_{\text{цикл}} = 1 - \chi_{\text{цикл}},$$

где $\eta_{\text{цикл}} = \frac{(A_{\text{дв}})_{\text{разг}} - |A_{\text{потерь}}|_{\text{цикл}}}{(A_{\text{дв}})_{\text{разг}}}$ — КПД цикла разгон-торможение;

$\chi = |A_{\text{потерь}}|_{\text{цикл}} / (A_{\text{дв}})_{\text{разг}}$ — коэффициент потерь в цикле; $(A_{\text{дв}})_{\text{разг}}$ — затраченная в цикле разгон-торможение работа двигателя при выключении его при торможении; $A_{\text{потерь}}$ — цикловые потери энергии на трение и торможение.

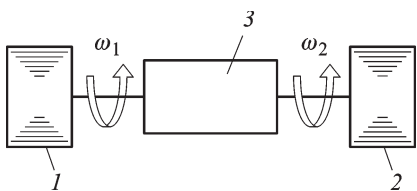


Рис. 1. Структурная схема блока передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии торможения машины

При исследованиях экономичности часто используется динамическая модель механизмов с жесткими звеньями (учитывая свойства, модель следует называть энергетической), так как она наиболее проста и дает достаточно точное решение при оценке влияния конструктивных параметров машины, например мощности двигателя и передаточного отношения передаточного механизма, на экономичность расхода энергии в переходных режимах. Наиболее ценным свойством энергетической модели является то, что она не перегружена несущественными параметрами и есть возможность выбора оптимальных значений параметров машины, например передаточного отношения механизма, по критериям экономичности расхода энергии.

По сравнению с установившимся режимом движения потери в цикле разгон-торможение увеличиваются за счет потерь кинетической энергии при торможении и останове машины. Увеличить КПД цикла разгон-торможение можно, снизив потери кинетической энергии. Теоретически это возможно, если обеспечить принцип постоянства значения кинетической энергии машины. На практике этот принцип реализуется соединением с трансмиссией машины передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии торможения. На рис. 1 приведена структурная схема передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии торможения машины, в которой маховик — аккумулятор 1 (с моментом инерции J_1) постоянно соединен с трансмиссией машины 2 (с приведенным моментом инерции J_2) при помощи вариатора 3.

Маховичный аккумулятор 1 и передаточный механизм 3 с переменным передаточным отношением (вариатором) образуют отдельный блок, который может быть подсоединен к трансмиссии машины в любом месте. На этот универсальный блок не действуют моменты двигателя и сил полезного сопротивления, скорость вращения маховика ω_1 зависит от изменения передаточного отношения вариатора таким образом, что снижение скорости вращения вала трансмиссии ω_2 достигается увеличением передаточного отношения вариатора

$$U_{12} = \omega_1/\omega_2,$$

рост которого и вызывает повышение скорости вращения маховика ω_1 . Наоборот, при увеличении скорости вращения ω_2 вала трансмиссии передаточное отношение снижают, что вызывает уменьшение скорости вращения ω_1 маховика. Выбирая оптимальный закон изменения

передаточного отношения U_{12} , можно обеспечить постоянство значения суммарной кинетической энергии трансмиссии и маховика. При этом работа двигателя не будет затрачиваться на изменение кинетической энергии и пойдет только на совершение полезной работы и на работу сил трения при движении машины. Принцип возможности работы такой машины с постоянным запасом кинетической энергии был выдвинут достаточно давно Н.В. Гулиа и им же были проведены экспериментальные исследования маховичного аккумулятора с ленточным вариатором на автомобиле. Однако метод расчета оптимального закона изменения передаточного отношения при торможении машин с рекуперацией энергии торможения до настоящего времени не был разработан. Этому вопросу и посвящена настоящая статья.

Прежде всего нужно решать вопрос о необходимом соотношении моментов инерции трансмиссии и маховичного аккумулятора. Для этого максимальный запас кинетической энергии транспортной машины перед ее торможением $T_{2\max} = \hat{J}_2 \omega_2^2 / 2$ приравняется к запасу энергии в маховике после торможения машины

$$T_{1\max} = J_1 \omega_{1\max}^2 / 2.$$

Необходимое соотношение моментов инерции трансмиссии и маховика \hat{J}_2 / \hat{J}_1 зависит от выбора максимальных значений скоростей вращения вала 1 маховика ($\omega_{1\max}$) и вала 2 трансмиссии ($\omega_{2\max}$):

$$J_2 / J_1 = \omega_{1\max}^2 / \omega_{2\max}^2,$$

где $\omega_{1\max}$, $\omega_{2\max}$ — максимально допустимые значения угловой скорости вращения маховика и трансмиссии.

Однако приведенное необходимое соотношение моментов инерции J_2 / J_1 маховика и трансмиссии машины не дает возможности найти оптимальный закон изменения передаточного отношения U_{12} для перекачки кинетической энергии в маховик и обратно. Определить его можно, используя закон сохранения кинетической энергии. Если поддерживать постоянным суммарное значение кинетической энергии трансмиссии машины и маховика, то потерь кинетической энергии при торможении не будет:

$$T_{\Sigma} = T_1 + T_2 = \text{const},$$

где $T_1 = J_1 \omega_1^2 / 2$, $T_2 = J_2 \omega_2^2 / 2$ — текущие значения кинетической энергии маховика и трансмиссии машины.

Поэтому можно записать уравнение сохранения кинетической энергии машины в виде

$$J_1 \omega_1^2 + J_2 \omega_2^2 = J_2 \omega_{2\max}^2.$$

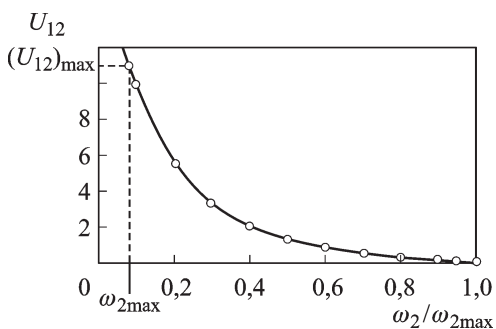


Рис. 2. Оптимальный закон изменения передаточного отношения вариатора при поддержании постоянства значения кинетической энергии

Анализ последнего уравнения позволяет получить расчетную безразмерную зависимость оптимального закона изменения передаточного отношения вариатора $U_{12}(\omega_2)$ в функции текущей скорости вала машины ω_2 , которая приведена на рис. 2.

Остановимся более подробно на выборе схемы системы управления (СУ) машин с маховичным аккумулятором энергии. Напомним, что мы получили желательный алгоритм управления передаточным отношением $U_{12}(\omega_2)$ в функции скорости машины ω_2 . Поэтому при измерении текущей скорости ω_2 вала трансмиссии в процессе работы машины можно построить замкнутую систему программного управления по алгоритму

$$U(\omega_2) = U_{\text{нач}} + k_{yc}\omega_2.$$

Параметрический синтез СУ следует начинать с расчета необходимого коэффициента усиления k_{yc} по начальным и конечным параметрам управления: $\omega_{2\max}$ – максимально допустимая скорость трансмиссии машины, $\omega_{2\min}$ – минимальная скорость трансмиссии, при которой эффективна рекуперация энергии торможения машины. После этого методами теории автоматического управления следует проанализировать ее запас устойчивости. Однако предварительно необходимо провести структурный синтез СУ, который состоит в построении структурной схемы СУ и определении вида ее усилительных элементов. В качестве датчика скорости можно использовать электрический тахогенератор. Создание работоспособной СУ будет зависеть от типа программирующего устройства и исполнительного устройства, трансформирующего управляющий сигнал в передаточное отношение. На первых этапах создания регуляторов разгона судовых дизелей в качестве программирующего устройства были использованы кулачковые механизмы, воздействующие на орган топливоподдачи. В настоящее время распространенным является использование в качестве програм-

Оптимальный закон изменения передаточного отношения находим из предыдущего уравнения путем его деления на ω_2 :

$$U_{12} = \omega_1/\omega_2 = \{[\omega_{2\max}^2/\omega_2^2 - 1]J_2/J_1\}^{1/2}$$

или, учитывая необходимое соотношение J_2/J_1 , запишем

$$U_{12} = \{ \omega_{2\max}^2/\omega_2^2 - 1 \}^{1/2} \frac{\omega_{1\max}}{\omega_{2\max}}.$$

мирующего устройства ЭВМ, на которую можно возложить и многочисленные вспомогательные функции. Необходимость этого диктуется тем, что начальные и конечные параметры разгона и торможения при эксплуатации являются случайными функциями, связанными с конкретными условиями движения транспортной машины. Поэтому в качестве управляющих сигналов, передаваемых в САР от элемента к элементу, целесообразно использовать электрические сигналы. Вот почему и в исполнительном устройстве целесообразно использовать электрический управляющий сигнал.

Таким образом, основная проблема при создании СУ — это выбор и конструирование исполнительного устройства — вариатора скоростей. Критерием при проектировании такого исполнительного устройства должен быть минимум затрат энергии на управление изменением передаточного отношения вариатора между маховиком и трансмиссией машины. Испытания ленточного вариатора доказали принципиальную работоспособность системы поддержания постоянства кинетической энергии системы, но выявили множество принципиальных и конструктивных недостатков, в первую очередь невозможность автоматизации его работы из-за невозможности управления передаточным отношением. В разработанных к настоящему времени гибридных силовых установках с маховичными аккумулирующими устройствами в качестве вариатора часто используются дифференциальные планетарные механизмы с гидравлическим или электрическим приводом управляющего устройства.

Поскольку практически все известные вариаторы скоростей имеют ограничение по максимальному и минимальному передаточным отношениям, то это будет сказываться на экономических характеристиках передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии. При ограниченном максимальном передаточном отношении $U_{12\max}$ (см. рис. 2) будет прекращаться дальнейшая перекачка кинетической энергии в маховик при торможении машины ниже скорости трансмиссии машины

$$\omega_{2\min} = \omega_{1\max} / U_{12\max}.$$

При этом полная остановка машины должна обеспечиваться обычной тормозной системой с некоторыми потерями кинетической энергии, что не является существенным недостатком, так как на практике часто возникает необходимость управления скоростью трансмиссии машины не только изменением мощности двигателя, но и мощностью сил сопротивления движению. При ограниченном минимальном передаточном отношении $U_{12\min}$ маховик не будет полностью останавливаться и перестанет отдавать свою энергию при разгоне машины.

Таким образом, определенную часть низкопотенциальной кинетической энергии торможения нельзя будет использовать, что вызовет

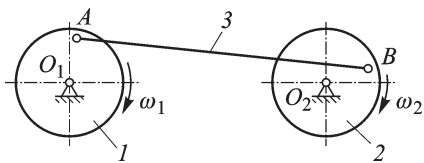


Рис. 3. Схема четырехшарнирного механизма с рекуперацией энергии:
1, 2 — маховики; 3 — шатун

потери энергии с коэффициентом

$$\chi_{\text{цикл}} = \{\omega_{2\text{min}}/\omega_{2\text{max}}\}^2$$

и ограничение КПД процесса рекуперации энергии достаточно высоким значением в зависимости от ограничений передаточного отношения вариатора

$$\eta_{\text{цикл}} = \{[\omega_{2\text{max}} - \omega_{2\text{min}}]/\omega_{2\text{max}}\}^2.$$

Разработанная теория находит подтверждение в исследовании рекуперации энергии в четырехшарнирном механизме (рис. 3) с переменным передаточным отношением, который состоит из двух маховиков 1 и 2, соединенных шатуном 3. Эффект перетекания энергии из одного маховика четырехшарнирного механизма в другой наблюдается при соотношении длин звеньев

$$L_{OB} = L_{OA};$$

$$L_{AB} = L_{OA} + \{L_{O_1O_2}^2 - L_{OA}^2\}^{1/2},$$

определяющих периодическое изменение текущего передаточного отношения четырехшарнирного механизма

$$U_{12} = \omega_1/\omega_2$$

по закону, полученному при исследовании (рис. 4). В отличие от предыдущего такой закон изменения передаточного отношения не имеет ограничений, но в остальном он аналогичен ранее выведенному оптимальному передаточному отношению для обеспечения постоянства кинетической энергии.

Работа четырехшарнирного передаточного механизма с маховичными аккумуляторами энергии (см. рис. 3) происходит следующим образом: если подтолкнуть один из маховиков, то при своем движении он начинает передавать энергию другому и заставляет его двигаться. Достигнув мертвой точки, он остановится и затем начнет обратное движение, становясь на время ведомым. Таким образом, маховики по очереди тормозятся, останавливаются и начинают ускоренное движение после остановки. Поскольку полученный закон изменения передаточного отношения четырехшарнирного механизма (см. рис. 4) не имеет ни верхнего ни нижнего ограничений, то оба маховика имеют возможность останавливаться и поэтому нет кинетических потерь. Когда один из маховиков останавливается, скорость другого достигает максимального значения. Перекачка кинетической энергии из одного маховика в другой происходит длительное время и ограничивается

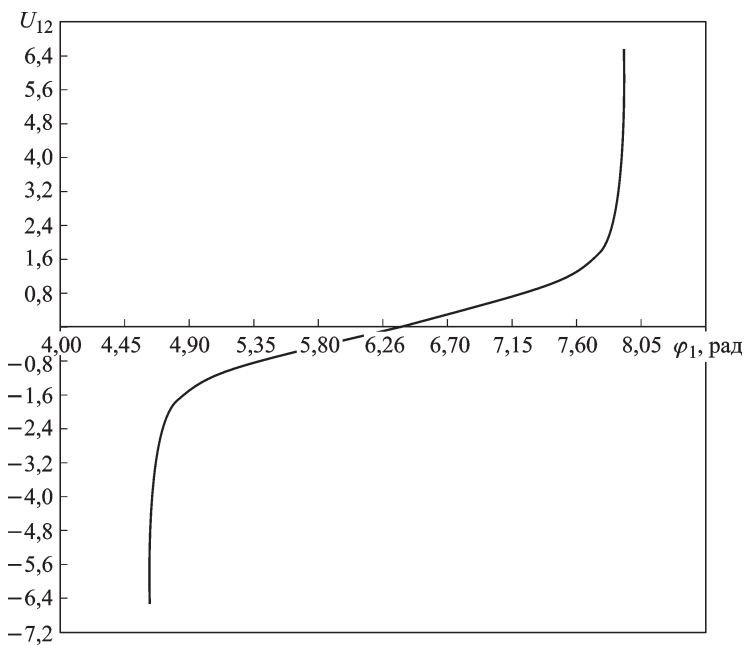


Рис. 4. Изменение передаточного отношения четырехшарнирного механизма

только внутренними потерями на трение в кинематических парах механизма.

Выводы. 1. Наиболее ценным свойством разработанной энергетической модели передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии является возможность выбора оптимальных значений параметров, например передаточного отношения вариатора, момента инерции и максимальной скорости вращения маховика.

2. Моделирование передаточного механизма с маховичным аккумулятором энергии позволило определить оптимальный безразмерный закон изменения передаточного отношения вариатора при торможениях и разгонах. Исследование характеристик реального четырехшарнирного механизма с рекуперацией энергии позволило выявить совпадающий с ним закон изменения передаточного отношения.

3. Критерием при проектировании вариатора скоростей должен быть минимум затрат энергии на управление изменением передаточного отношения в кинематической цепи обмена энергии между маховиком и трансмиссией машины.

4. Оптимальный закон изменения передаточного отношения вариатора не зависит от действующих в процессе передачи энергии моментов сил, а определяется скоростью движения машины. Поэтому для управления вариатором может быть использована система управления скоростью машины. В качестве управляющих сигналов, передаваемых в СУ от элемента к элементу, целесообразно использовать электрические.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гу л и а Н. В. Инерция. – М.: Наука, 1982. – 152 с.
2. Ле в и т с к и й Н. И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979. – 420 с.
3. Ле о н о в И. В. Теория механизмов и машин. – М.: Высшее образование, 2009. – 239 с.
4. Ле о н о в О. Б., Ле о н о в И. В. Комбинированная система регулирования судового ДВС // Изв. вузов. Машиностроение. – 1966. – № 11.
5. А.с. № 896247. Регулятор дизеля.

Статья поступила в редакцию 30.12.2009

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” с периодичностью 12 номеров в год.

Подписку на журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” можно оформить через агентство “Роспечать”.

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	Машиностроение	2	250	500
72783	Приборостроение	2	250	500
79982	Естественные науки	2	250	500

Адрес редакции журнала “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана”:
105005, Москва,

2-я Бауманская ул., д.5.

Тел.: (499) 263-62-60; (499) 263-67-98.

Факс: (495) 261-45-97.

E-mail: press@bmstu.ru