

& Co. KG, 2011.

11. Михайлов В.А., Шарипова Н.Н. Инновация в конструкции водоиспарительных охладителей воздуха в тракторных кабинах // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 4.
12. Кокорин О.Я., Дерипасов А.М. Отечественное оборудование для создания систем вентиляции и кондиционирования воздуха: Каталог. – М.: Каталог, 2002.
13. Михайлов В.А., Нодиров Ш.К. Нормализация микроклимата и снижение концентрации пыли в кабинах хлопководческих тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1995. – № 5.

Учёт потерь мощности в дифференциальном механизме при проектировании многопоточных комбинированных энергоустановок

Рябев А.В.

Университет машиностроения,
ryabev-alexander@ya.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос учёта потерь мощности в суммирующих планетарных рядах, используемых в конструкциях многопоточных комбинированных энергетических установок, известных также как Power-Split или PGHP. Предложена методика определения этих потерь.

Ключевые слова: комбинированные энергетические установки, гибридные автомобили, автомобили с КЭУ, суммирующие планетарные ряды, дифференциальные механизмы, многопоточные передачи, Power-Split, PGHP, THS.

Среди гибридных автомобилей особое место занимают автомобили с трансмиссией, называемой в зарубежных источниках Power-Split или PGHP (Planetary Gear Hybrid Powertrain). Классический пример – трансмиссия автомобиля Toyota Prius, известная под аббревиатурой THS (Toyota Hybrid System). Она показана на рисунке 1.

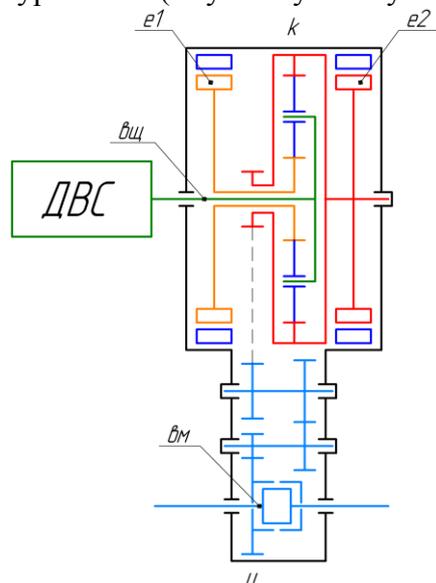


Рисунок 1. Гибридная схема Тойоты

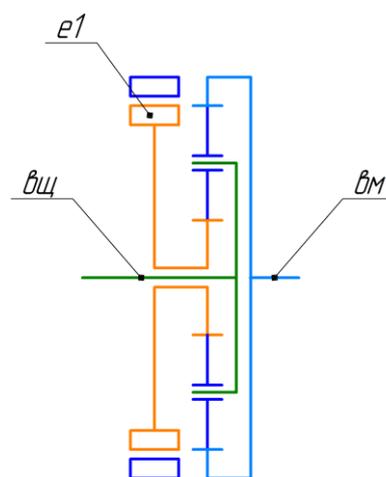


Рисунок 2. Суммирующий ТДМ многопоточной КЭУ

Основой этой схемы является суммирующий планетарный ряд, водило которого соединено с коленчатым валом ДВС (показаны зелёными линиями), солнечная шестерня – с синхронной электрической машиной e1 (оранжевые линии на схеме), а эпициклическая шестерня – со второй электрической машиной e2 (красные линии) и ведомым валом трансмиссии (голубые линии). Если поддерживать частоту ведущего вала постоянной, то можно добиться изменения угловой скорости ведомого вала за счёт изменения частоты вращения электромашин e1. Тем самым можно плавно регулировать передаточное число трансмиссии. В зави-

симости от того, в какую сторону вращается электромашинa e1 она может работать как в режиме генератора, так и в режиме электродвигателя. При этом, если машина работает как генератор, то вырабатываемую ей энергию можно направить либо в аккумуляторы, либо непосредственно к электромашине e2, которая в этом случае сможет увеличить крутящий момент на ведомом валу. Можно в дополнение к ней направить на электромашину e2 ещё и энергию, ранее запасённую в аккумуляторе и кратковременно получить на колёсах пиковый крутящий момент. Если же электромашинa e1 работает как электромотор, то необходимую мощность она может получать уже наоборот от электромашинy e2 или аккумуляторов.

Таким образом, поток мощности от двигателя к колёсам разделяется на две части: механическую и электрическую, что и отражено в названии Power-Split. Мы же условимся называть подобные КЭУ (комбинированные энергетические установки) многопоточными.

Один из вопросов, который встаёт перед разработчиками многопоточных КЭУ – как определить потери мощности, возникающие при преобразованиях энергии. В частности, какова энергия, теряемая в СПР (суммирующем планетарном ряде). Для решения этой задачи обратимся к имеющемуся у отечественных инженеров опыту проектирования планетарных коробок передач.

Как правило, при разработке планетарных трансмиссий, их КПД вычисляют с помощью метода Крейнса [1 – 5], основанного на определении частных производных от передаточного числа трансмиссии по характеристикам трёхзвенных дифференциальных механизмов (ТДМ), входящих в её состав [1 – 4]. Этот же метод можно использовать и для определения КПД многопоточной передачи [6, 7], если вся мощность передаётся от двигателя к колёсам. Однако в случае с многопоточными КЭУ мощность может передаваться также к накопителю и обратно, поэтому классическое понятие передаточного числа неприменимо.

Это означает, что определение механических потерь в суммирующем ТДМ с помощью традиционных способов невозможно. Обычно их не учитывают вовсе, считая, что они пренебрежимо малы в сравнении с потерями в остальных элементах КЭУ. Такой подход встречается в зарубежной литературе, посвящённой многопоточным КЭУ [8 – 10]. Кроме того, зачастую потери в планетарных рядах не учитывают даже при анализе КПД двухпоточных гидромеханических передач [2]. Однако такой подход несовершенен, и при составлении новых математических моделей трансмиссий следовало бы увеличить их точность за счёт учёта этих потерь, особенно с учётом того, что вычисления производятся на ЭВМ и их трудоёмкость уже не имеет существенного значения.

Рассмотрим ТДМ, который применяется в упомянутой выше КЭУ автомобиля Toyota Prius. Он показан отдельно на рисунке 2.

Здесь водило соединено с ДВС и является ведущим элементом, эпицикл – ведомый, поскольку он соединён с колёсами, а солнечная шестерня соединена с синхронной электрической машиной e1, а потому его можно назвать управляемым элементом. Задача, которая перед нами стоит – определить потери мощности в этом суммирующем ТДМ в зависимости от режима работы КЭУ. Поскольку кинематические связи здесь жёсткие, потери мощности возможны только за счёт силовых потерь в зацеплениях, а значит, задачу по определению потерь можно свести к задаче по определению моментов на ведущем, ведомом и управляемом звеньях ТДМ.

Для идеального ТДМ были бы справедливы следующие уравнения, связывающие моменты на его звеньях:

$$\begin{cases} M_{\text{вщ}} = M_{e1} + M_{\text{вм}}; \\ M_{e1} = \frac{1}{k} \cdot M_{\text{вм}}, \end{cases} \quad (1)$$

где: $M_{\text{вщ}}$ – крутящий момент на ведущем валу (т.е. на водиле); M_{e1} – крутящий момент на электромашине e1 (на солнечной шестерне); $M_{\text{вм}}$ – крутящий момент на ведомом валу (эпициклической шестерне); k – характеристика планетарного ряда.

Первое уравнение отражает условие равновесия механизма. Оно справедливо в любом

случае, независимо от того, присутствуют ли потери мощности. Это значит, что потери могут влиять только на второе уравнение, описывающее соотношение моментов на солнечной и эпициклической шестернях.

Рассмотрим рисунок 3, на котором на ТДМ нанесены действующие моменты и направления вращения звеньев. Поскольку водило – ведущее звено, и мощность на нём положительна, направление его вращения совпадает с крутящим моментом. Для эпицикла всё наоборот: мощность на нём, как на ведомом звене, отрицательна, а значит направление вращения и крутящий момент противоположны друг другу. Солнечная же шестерня, как управляемое звено, может вращаться в разные стороны с разной частотой, а значит, мощность на ней может быть и отрицательной и положительной. В первом случае электромашина e1 будет работать как генератор, а во втором – как электромотор. Поэтому на рисунке показано то направление, которое мы примем за положительное (режим генератора).

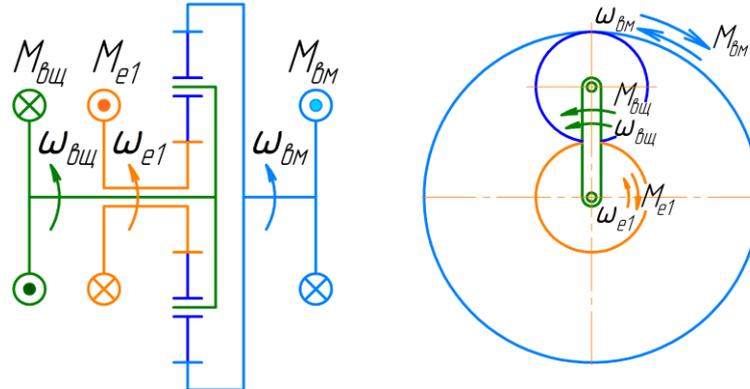


Рисунок 3. Крутящие моменты и угловые скорости элементов суммирующего ТДМ многопоточной КЭУ

Теперь перейдём к определению потерь. Условия работы зубчатого зацепления, а значит и потери в нём, полностью определяются двумя факторами: относительной скоростью звеньев, входящих в зацепление, и возникающей в нём окружной силой. Для определения относительных скоростей звеньев, участвующих в зацеплениях, мысленно придадим всему ТДМ вращение со скоростью водила в обратную сторону.

Возможны два варианта.

- первый – если скорость солнечной шестерни больше, чем скорость водила (рисунок 4).

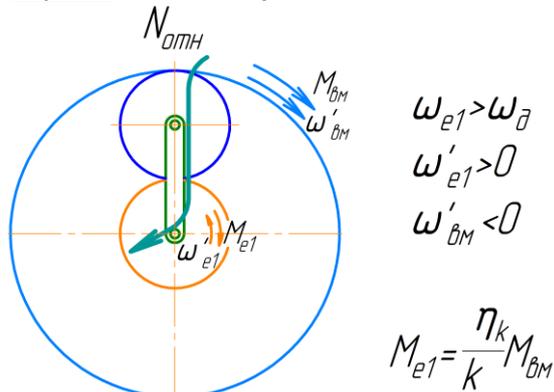


Рисунок 4. Случай, когда скорость солнечной шестерни больше скорости водила

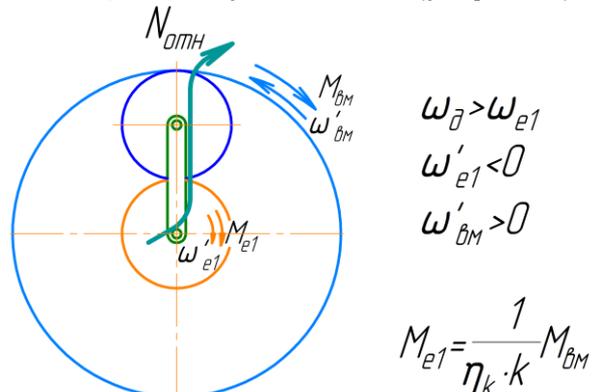


Рисунок 5. Случай, когда скорость солнечной шестерни меньше скорости водила

Тогда в относительном движении мы получим, что скорость солнечной шестерни при остановленном водиле больше 0. Определим, чему будет равна при этом скорость эпицикла. Из уравнения кинематики ТДМ известно, что:

$$\omega_{\text{аи}} = \frac{1+k}{k} \cdot \omega_{\text{ау}} - \frac{1}{k} \cdot \omega_{\text{а1}}, \quad (2)$$

где: $\omega_{вм}$ – угловая скорость ведомого вала (эпициклической шестерни); $\omega_{вщ}$ – угловая скорость ведущего вала (водила); ω_{e1} – угловая скорость электромшины e1 (солнечной шестерни).

Тогда угловая скорость ведомого звена при остановленном водиле:

$$\omega'_{\dot{a}i} = \omega_{\dot{a}i} - \omega_{\dot{a}i} = \left(\frac{1+k}{k} - 1 \right) \cdot \omega_{\dot{a}i} - \frac{1}{k} \cdot \omega_{\dot{a}i} = \frac{1}{k} \cdot (\omega_{\dot{a}i} - \omega_{\dot{a}i}). \quad (3)$$

Значит, в рассматриваемом случае скорость эпицикла при остановленном водиле будет меньше 0. Тогда, как видно из рисунка 3, относительная скорость эпицикла (ведомого звена) направлена туда же, куда и крутящий момент, а относительная скорость солнечной шестерни – против крутящего момента. То есть зацепления в ТДМ работают точно так же, как если бы в обычной зубчатой передаче с неподвижными осями шестерён мощность передавалась от эпицикла к солнечной шестерне. На рисунке это изображено стрелкой условной мощности $N_{отн}$. Тогда, считая КПД передачи от эпицикла к солнечной шестерне при остановленном водиле равным η_k , получим следующее соотношение:

$$M_{e1} = \frac{\eta_k}{k} \cdot M_{\dot{a}i}. \quad (4)$$

- второй – скорость солнечной шестерни меньше, чем скорость водила. Этот случай показан на рисунке 5.

При этом относительная скорость солнечной шестерни при остановленном водиле будет меньше 0, а эпициклической – больше 0. Это соответствует условной передаче относительной мощности от солнечной шестерни к эпициклу, а значит соотношение между моментами в этом случае примет вид:

$$M_{e1} = \frac{1}{\eta_k \cdot k} \cdot M_{\dot{a}i} \quad (5)$$

Поскольку скорость ведущего звена (двигателя) также может быть переменной, различные режимы работы суммирующего ТДМ в КЭУ удобнее представить на диаграмме (рисунок 6).

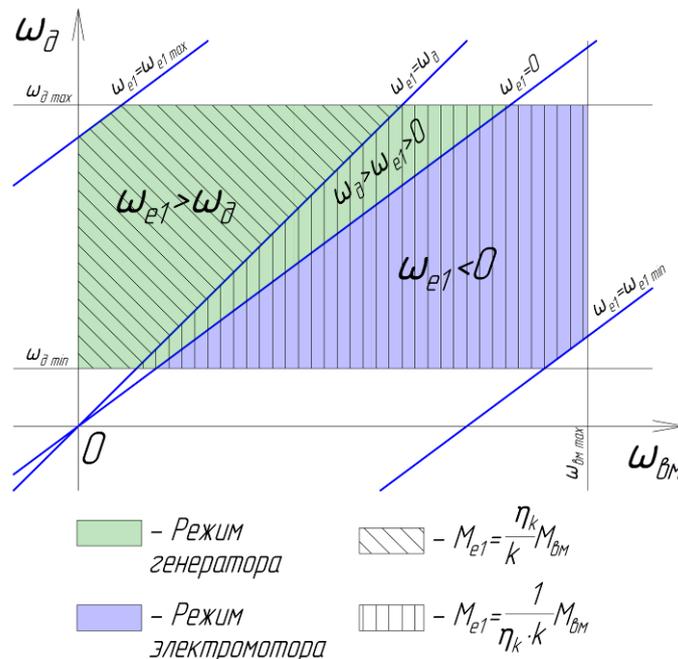


Рисунок 6. Диаграмма режимов работы суммирующего ТДМ в многопоточной КЭУ

Область возможных режимов работы ТДМ ограничена шестью линиями: минимальной и максимальной угловыми скоростями двигателя, ведомого вала и электромшины e1. Здесь следует отметить, что угловая скорость электромшины на диаграмме представлена в виде функции от угловых скоростей двигателя и ведомого вала. Если она положительна, то элек-

тромашина работает в режиме генератора (зелёная зона на диаграмме), если отрицательна – в режиме электродвигателя (синяя зона). Кроме этого, если угловая скорость электромашин $e1$ больше скорости ДВС, то соотношение моментов будет определяться по формуле (4), а если меньше – то по формуле (5). Таким образом, суммирующий ТДМ может работать в 3 различных режимах, не считая случаев его блокировки.

Это означает, что при анализе потерь в многопоточной КЭУ следует сначала определить, в каком режиме работает суммирующий ТДМ, а затем, в зависимости от этого, определить моменты на его элементах по указанным формулам. После этого, умножив моменты на звеньях на их угловые скорости, можно получить мощности, а определив их, найти потери. Очевидно, что они будут равны разности мощностей подводимых к ТДМ и отводимых от него.

Выводы

Таким образом, нами получена методика определения потерь в суммирующем ТДМ многопоточной КЭУ, основанная на уточнённом определении крутящих моментов на его звеньях. Предложены формулы, связывающие величину моментов на солнечной и эпициклической шестернях в зависимости от режима работы суммирующего ТДМ. Полученный результат может быть использован при проектировании и анализе многопоточных комбинированных энергетических установок.

Литература

1. Красеньков В.И., Вашец А.Д. Проектирование планетарных механизмов транспортных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
2. Шарипов В.М. Конструирование и расчёт тракторов. – М.: Машиностроение, 2009. 752 с.
3. Шарипов В.М., Крумбольдт Л.Н., Маринкин А.П. Планетарные коробки передач. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 149 с.
4. Шарипов В.М. Проектирование механических, гидромеханических и гидрообъемных передач тракторов. – М.: МГТУ «МАМИ», 2002. – 300 с.
5. Крейнс М.А., Розовский М.С. Зубчатые механизмы. Выбор оптимальных схем. – М.: Наука, 1972. – 428 с.
6. Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод расчёта динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией THS // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – №5.
7. Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод расчёта динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией, построенной по схеме GM // Журнал автомобильных инженеров. – 2011. – №4.
8. Liu J., Peng H., Filipi Z. Modeling and Control Analysis of Toyota Hybrid System, International Conference on AIM, Monterey, CA. Jul. 24–28, 2005.
9. Kukhyun Ahn, Sungtae Cho, Wonsik Lim, Yeong-il Park, Jang Moo Lee. Performance analysis and parametric design of the dual-mode planetary gear hybrid powertrain. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 2006, 220(11), 1601–1614.
10. Sungtae Cho, Kukhyun Ahn, Jang Moo Lee. Efficiency of the planetary gear hybrid powertrain. Proc. IMechE, Part D: J. Automobile Engineering, 2006, 220(10), 1445–1454.