

ОБЗОР И КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ МНОГОПОТОЧНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ИХ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Рябев А.В.

Университет машиностроения

(926) 768-36-94, Ryabev-Alexander@yandex.ru

В статье рассмотрены существующие и предлагаемые к внедрению современные автомобильные многопоточные комбинированные энергетические установки, основанные на принципе разделения мощности на электрический и механический потоки. Такие комбинированные энергетические установки благодаря наличию в их структуре бесступенчатой электрической трансмиссии позволяют получить произвольное передаточное число от двигателя к колесам, при этом сохранить достаточно высокий коэффициент полезного действия, присущий механическим трансмиссиям. Это позволяет предположить, что многопоточные комбинированные энергетические установки перспективны для применения на гибридных автомобилях, что подтверждается успешной эксплуатацией автомобиля Toyota Prius. В статье рассмотрены 16 различных схем электромеханических трансмиссий, часть из которых реально применялась на практике, другие же существовали только в виде опытных образцов или теоретических проектов. На основании их кинематического анализа, включающего определение количества режимов работы и степеней свободы, а также построении кинематических планов для различных режимов работы была предложена классификация многопоточных комбинированных энергетических установок по типу дифференциального механизма (механической части трансмиссии). Были выделены однорежимные и многорежимные многопоточные комбинированные энергетические установки, причем последние были разделены на 3 класса в зависимости от способа получения различных режимов: ступенчатые, переменнопоточные и комбинированные. Кроме того, внутри каждого класса были выявлены трансмиссии с дифференциалом на входе, с дифференциалом на выходе и со сложным разделением мощности. Представленный обзор позволяет ознакомиться с возможностями применения многопоточных комбинированных энергетических установок на автомобильном транспорте, понять присущие им достоинства и недостатки, определить перспективные области применения многопоточных электромеханических трансмиссий различных типов.

Ключевые слова: комбинированные энергетические установки, гибридные автомобили, автомобили с комбинированными энергетическими установками, многопоточные передачи, многопоточные комбинированные энергетические установки.

Введение

Сохраняющийся интерес к гибридным автомобилям подталкивает инженеров к поиску новых схем построения комбинированных энергоустановок (КЭУ). Для того чтобы правильно решить задачу выбора оптимальной схемы, сначала нужно разобраться с тем, какие схемы построения КЭУ существуют вообще. Можно предложить следующую классификацию конструктивных схем КЭУ (рис. 1).

Последовательная и параллельная схемы известны достаточно широко, однако им обеим присущи свои недостатки, которые можно устранить, комбинируя эти схемы на одном автомобиле. Этот принцип положен в основу

последовательно-параллельных схем КЭУ, которые можно разделить еще на два класса: схемы на основе простых трансмиссий и схемы на основе многопоточных (в основном, двухпоточных) трансмиссий. Представителем первого класса является, например, схема, запатентованная в МАМИ [1].

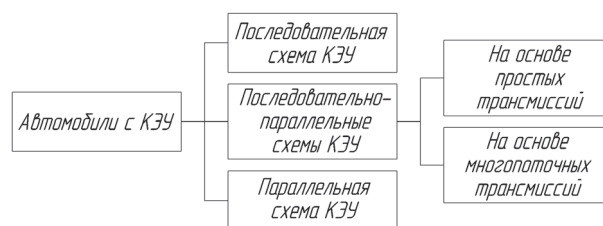


Рис. 1. Классификация автомобилей с КЭУ

Наиболее известный представитель класса многопоточных КЭУ – схема, примененная на автомобиле Toyota Prius (ее часто называют THS – Toyota Hybrid System). Она показана на рис. 2а. Основой этой схемы является планетарный ряд, водило которого соединено с колесчатым валом ДВС, солнечная шестерня – с синхронной электрической машиной $e1$, а эпицикл – с электрической машиной $e2$ и ведомым валом. Если поддерживать частоту ведущего вала постоянной, то можно добиться изменения угловой скорости ведомого вала за счет изменения частоты вращения электрической машины $e1$. Тем самым можно плавно регулировать передаточное число трансмиссии. Это наглядно видно из кинематического плана трансмиссии (рис. 2б). Здесь по горизонтальной оси отложена угловая скорость ведомого вала $\omega_{\text{вм}}$, а по вертикальной – соответствующие угловые скорости всех звеньев трансмиссии. При этом угловая скорость ведущего звена $\omega_{\text{вщ}}$ принимается постоянной и равной 1. Таким образом, на кинематическом плане мы видим не абсолютные, а только относительные значения угловых скоростей.

В зависимости от направления вращения электрическая машина $e1$ может работать как в режиме генератора, так и в режиме электродвигателя. Если машина работает как генератор, то вырабатываемую ей энергию можно

направить либо в аккумуляторы, либо непосредственно к электрической машине $e2$, которая в этом случае сможет увеличить крутящий момент на ведомом валу. Можно в дополнение к этой энергии направить на электрическую машину $e2$ еще и энергию, ранее запасенную в аккумуляторе и кратковременно получить на колесах пиковый крутящий момент. Если же электрическая машина $e1$ работает как электромотор, то необходимую мощность она может получать уже, наоборот, от электрической машины $e2$. Наконец, если поддерживать частоту вращения электрической машины $e1$ равной 0, то она вообще не будет участвовать в передаче мощности, и вся энергия от двигателя будет передаваться к колесам исключительно механическим путем. Такой режим работы часто называют *механической точкой*, он хорош тем, что обеспечивает наибольший КПД трансмиссии. Описанная схема хорошо известна автомобилестроителям и здесь приводилась только в качестве простейшего примера для введения в суть рассматриваемого вопроса. Более подробно ознакомиться с ее работой можно в работе [2, 3].

Можно предположить, что на подобном принципе разделения мощности можно построить огромное множество конструктивных схем гибридных трансмиссий. Это подтверждается обзором, выполненным в работе [4, 5]. Проведем систематизацию различных кинема-

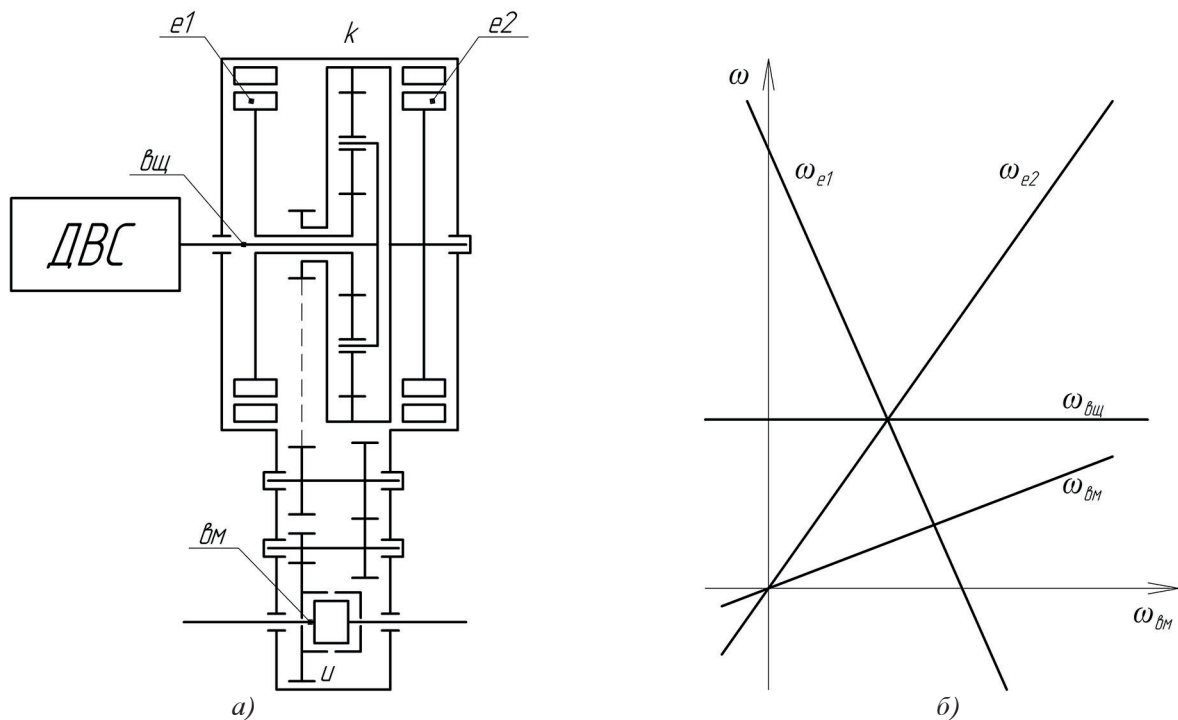


Рис. 2. Многопоточная КЭУ автомобиля Toyota Prius:

а – кинематическая схема; б – план скоростей

тических схем КЭУ, сосредоточившись исключительно на многопоточных КЭУ. Для начала рассмотрим обобщенную схему многопоточной электрической КЭУ (рис. 3).

Она включает в себя две части: механическую, которую назовем «дифференциальный механизм», и электрическую, включающую в себя по меньшей мере две электромашины $\mathcal{E}M_1$ и $\mathcal{E}M_2$, электрические преобразователи Π_1 и Π_2 , управляющие ими, а также зарядно-разрядное устройство для управления накопителем электроэнергии и сам накопитель, которым может быть электрохимическая аккумуляторная батарея (АКБ) или блок конденсаторов (БК).

Рассмотрим механическую часть трансмиссии и варианты возможного ее исполнения. На основе рассмотрения 16 различных схем многопоточных электромеханических трансмиссий предлагается классификация многопоточных КЭУ (рис. 4) в зависимости от типа используемого дифференциального механизма.

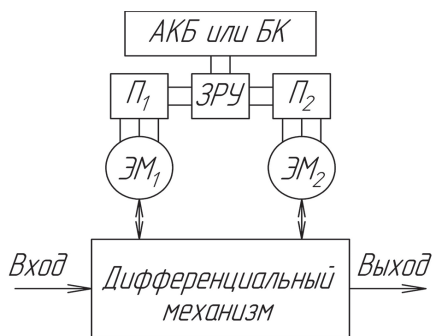


Рис. 3. Обобщенная схема многопоточной КЭУ

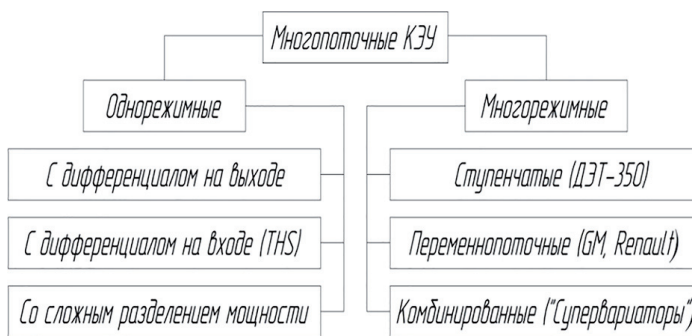


Рис. 4. Классификация многопоточных КЭУ

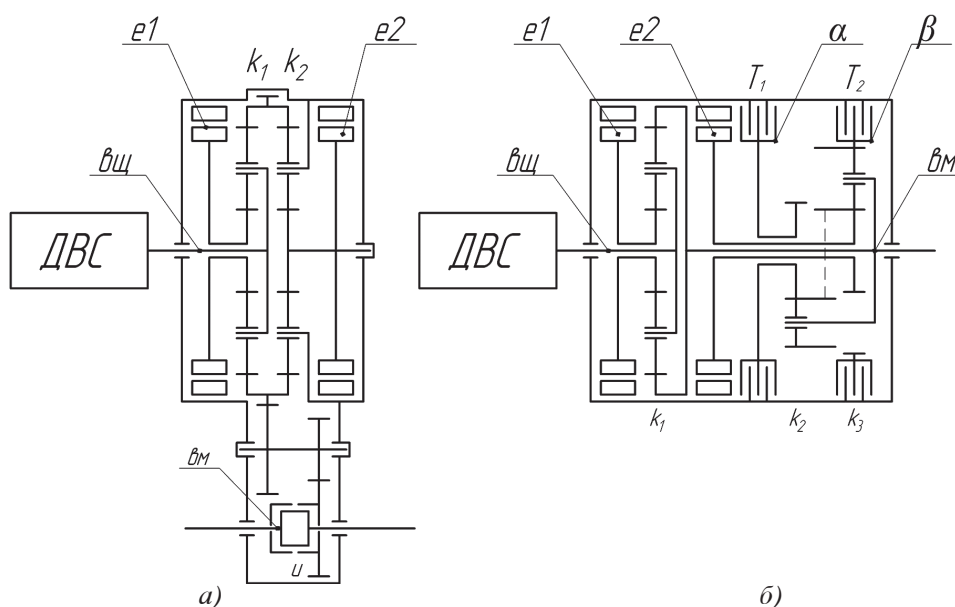


Рис. 5. Вариации схемы THS:

α – для автомобилей Toyota Highlander, Toyota Camry и Lexus RX400; β – для автомобиля Lexus GS450

На автомобиле Lexus GS450 используется еще более сложный вариант трансмиссии, включающий двухступенчатую планетарную коробку передач между электромашинной $e2$ и ведомым валом (рис. 5б). Формально ее уже нельзя отнести к однорежимным МПКЭУ, поскольку она имеет два разных режима работы электромашинной $e2$, однако здесь переключение передач никак не влияет на передаточное число, мощность, передаваемую от $e1$ к $e2$, и на положение механической точки. Поэтому ее отнесем к однорежимным КЭУ.

Все рассмотренные выше схемы используют способ разделения мощности с дифференциалом на входе. Однако теоретически ничто не мешает создать схемы с дифференциалом на выходе и со сложным разделением мощности.

2. Ступенчатые многопоточные КЭУ

Увеличить количество режимов можно, добавив к однорежимной МПКЭУ обычную коробку передач. Тогда мы получим трансмиссию уже с 3 степенями свободы: одна из них будет исключаться заданием частоты вращения одной из электромашин, а вторая – включением какой-либо передачи в КП. При этом кинематические планы на различных передачах будут отличаться только масштабом вдоль горизонтальной оси.

Подобных схем, применяемых на гибридных автомобилях обнаружить не удалось. Однако для примера можно привести электро-механическую трансмиссию трактора ДЭТ-350 (рис. 6а) [6], которая вполне подходит для использования в составе многопоточной КЭУ.

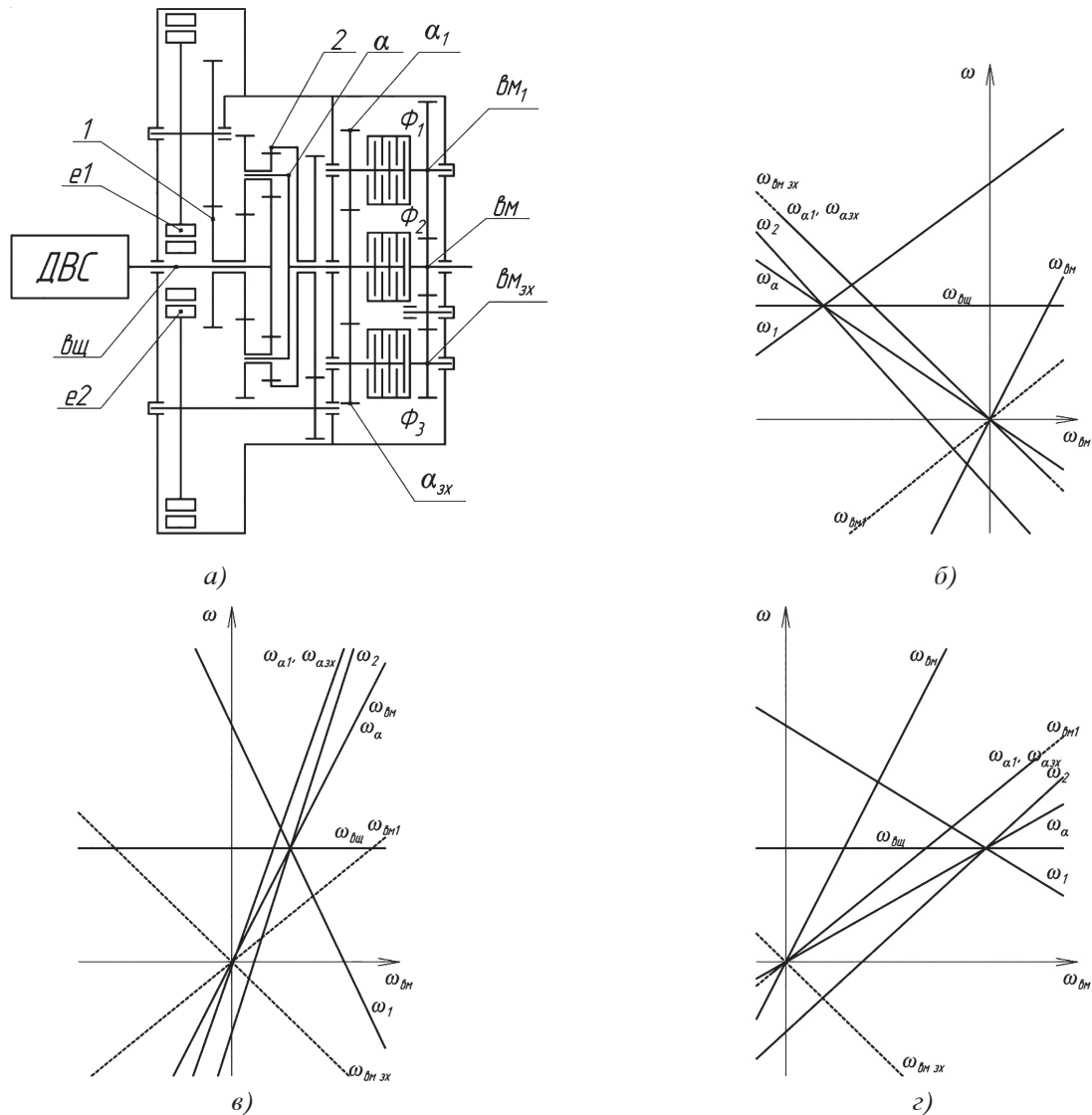


Рис. 6. Трансмиссия трактора ДЭТ-350:

- а – кинематическая схема; б – кинематический план при включении муфты Φ_3 (задний ход);
- в – кинематический план при включении муфты Φ_2 (первая (прямая) передача);
- г – кинематический план при включении муфты Φ_1 (вторая повышенная передача)

Основой трансмиссии является дифференциальный механизм, реализующий способ сложного разделения мощности: обе электромашины не имеют жестких кинематических связей ни с ведомым, ни с ведущим звеном. На кинематическом плане это отображается наличием двух механических точек, ни одна из которых не совпадает с началом координат. В зависимости от того, какой фрикцион включен, трансмиссия может реализовывать два режима переднего и один режим заднего хода. Кинематические планы всех этих режимов показаны на рис. 6б, 6в и 6г.

3. Многорежимные многопоточные КЭУ с переменными способами разделения мощности (переменнопоточные)

В отличие от рассмотренных выше ступенчатых МПКЭУ, в переменнопоточных переключение режимов достигается не за счет

пропорционального изменения скоростей всех звеньев, а за счет изменения кинематической структуры дифференциального механизма и, соответственно, способа разделения мощности.

Самый простой пример переменнопоточной МПКЭУ – схема AHS-2, разработанная фирмой GM (рис. 7а) [7].

Первый режим движения получается при включении тормоза T . Тогда мы получаем двухпоточную электромеханическую трансмиссию с дифференциалом на входе. Кинематический план трансмиссии, соответствующий этому режиму показан на рис. 7б. Если включить фрикцион Φ , то мы получим режим сложного разделения мощности. Кинематический план для этого случая показан на рис. 7в. Если же одновременно включить тормоз и фрикцион, то мы получим некую фиксированную передачу, обеспечивающую жесткую кинематическую связь между ведущим и ведомым валами.

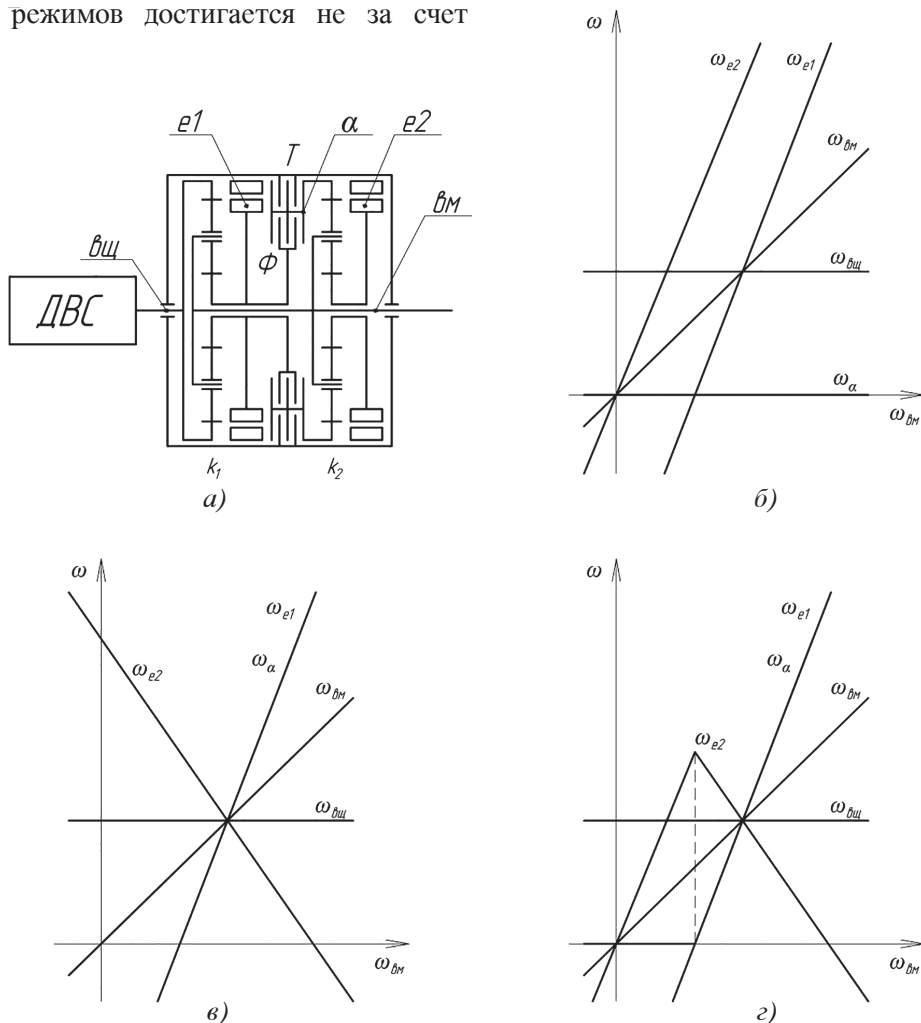


Рис. 7. Трансмиссия GM AHS-2:

- а – кинематическая схема; б – кинематический план при включении тормоза T (первый режим);
- в – кинематический план при включении фрикциона Φ (второй режим);
- г – кинематический план при совмещении режимов работы трансмиссии

Из возможности одновременного включения тормоза и фрикциона следует то, что переключение между режимами можно осуществлять без разрыва потока мощности. Для этого на первом режиме нужно достичь такого передаточного числа, при котором скорости звеньев $e1$ и α выравниваются, в этот момент включить между ними фрикцион Φ , получив фиксированную передачу, после чего отключить тормоз T и продолжить движение уже на втором режиме. Чтобы наглядно показать этот переход, совместим кинематические планы первого и второго режимов (рис. 7з).

Можно привести и другие примеры двухпоточных трансмиссий, работающих аналогичным образом (рис. 8). Среди них, например, схема GM VOLTEC DRIVE SYSTEM (рис. 8а), а также еще две незначительно различающиеся между собой схемы от General Motors (рис. 8в и 8г) [8] и схема на рис. 8б [4].

Эти схемы были подробно рассмотрены в работах [4, 5]. Кроме того, известна по-

добная схема от фирмы Renault (рис. 9а), которая предлагалась к применению на автомобиле RENAULT LAGUNA II Estate [9], а также схема, разработанная для трактора Т-4 (рис. 9б) [10].

Отдельно стоит отметить схему от компании Timken Company (рис. 10а) [4, 5].

Ее особенностью является то, что она имеет 4 степени свободы и для того, чтобы включить один из двухпоточных режимов, нужно включить одновременно 2 элемента управления. В табл. 1 показаны все возможные режимы работы этой КЭУ. Из них три соответствуют работе трансмиссии с разделением мощности.

Интересно, что это единственная из рассмотренных трансмиссий, позволяющая получать достаточно редко применяемый режим с дифференциалом на выходе (при включении тормоза T_1 и фрикциона Φ_2). Кинематический план, соответствующий этому режиму, показан на рис. 10б. Видно, что электромашина $e1$ вращается с постоянной скоростью, пропорци-

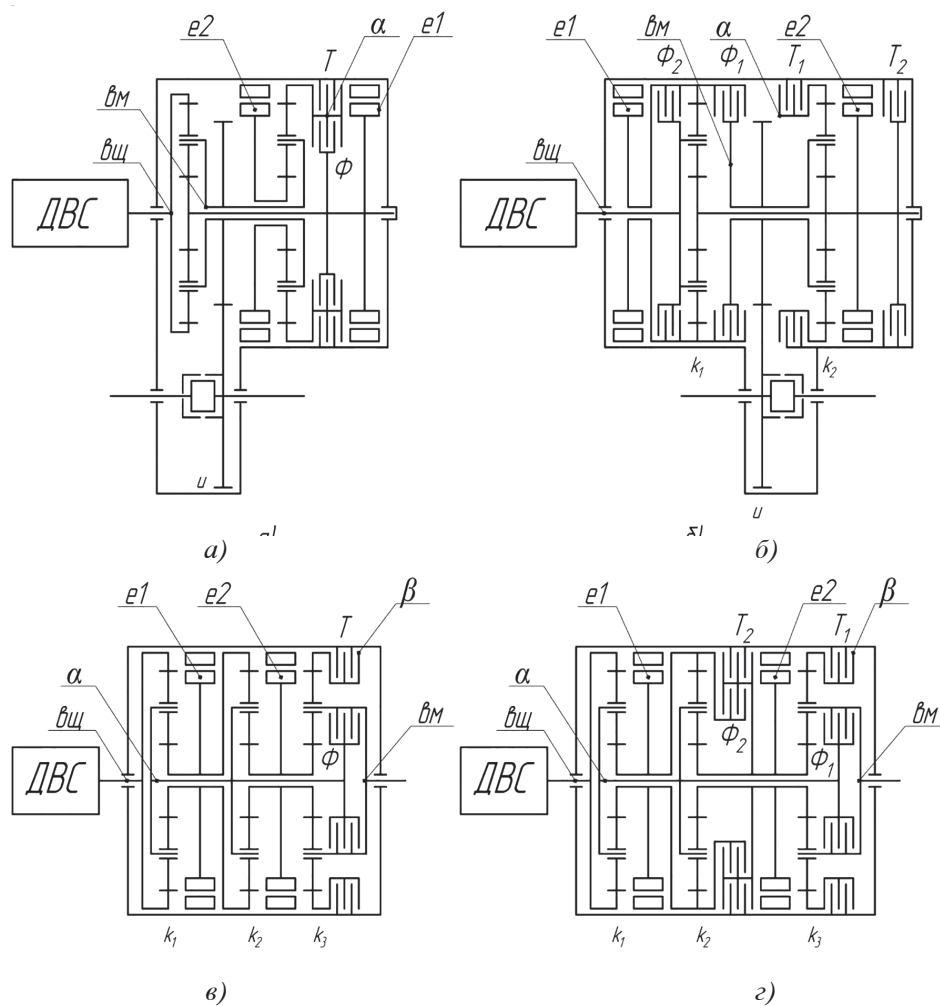


Рис. 8. Примеры двухпоточных трансмиссий

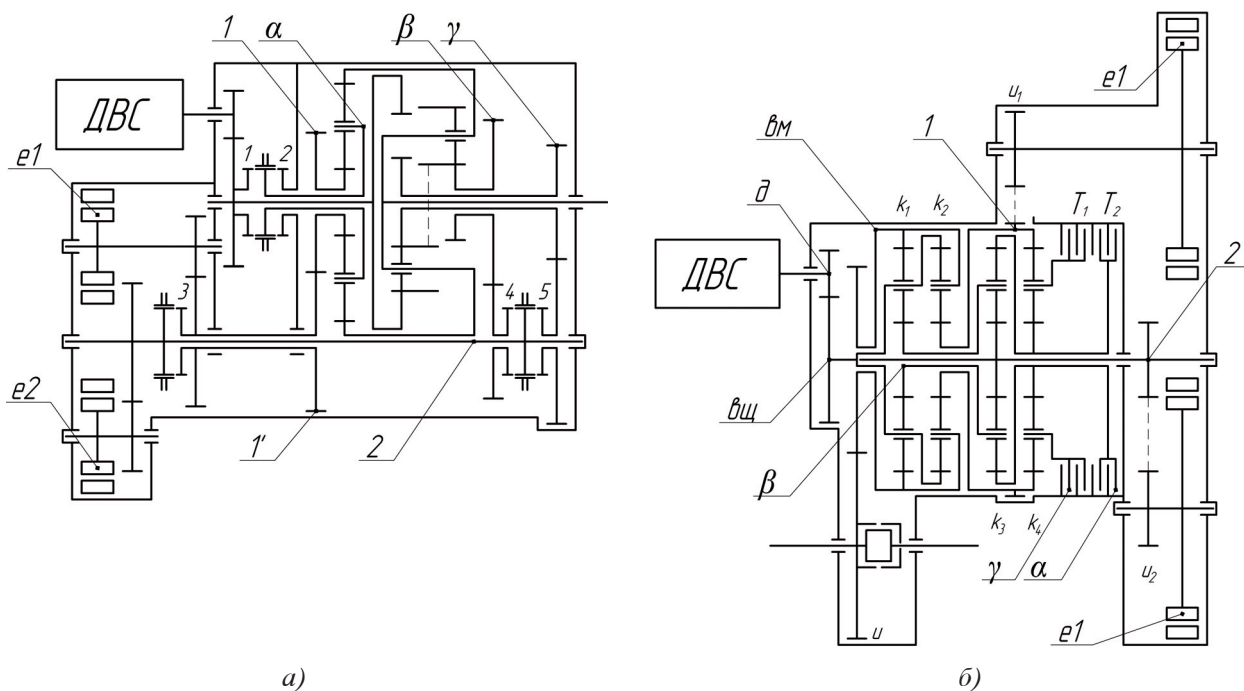


Рис. 9. Кинематические схемы трансмиссий Renault (а) и экспериментальной версии трактора Т-4 (б)

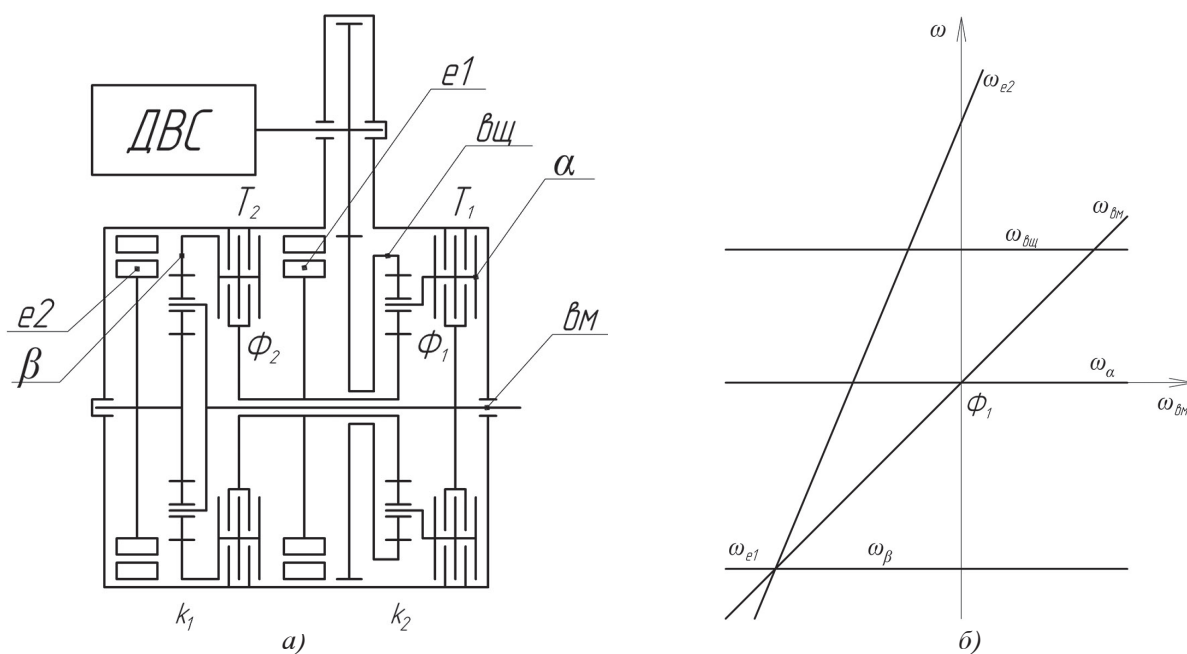


Рис. 10. Кинематическая схема (а) и кинематический план режима с дифференциалом на выходе (б) трансмиссии Timken Company

ональной скорости ведущего вала, – это и является признаком схемы с дифференциалом на выходе.

4. Многорежимные многопоточные КЭУ с комбинированным способом переключения режимов

В трансмиссиях таких КЭУ переключение между режимами разделения мощности может

осуществляться как за счет изменения способа разделения мощности, так и за счет изменения переключения ступеней в КП.

Один из представителей этого класса – трансмиссия COMET Drivetrain от компании Robert Bosh Company (рис. 11а) [11]. Включая различные передачи на правом и левом валах, можно получить различные способы разделения мощности. При этом соответствующие им

кинематические планы (рис. 11б) могут различаться как качественно (что характерно для переменноточных МПКЭУ), так и количественно (т.е. масштабом вдоль осей координат, что характерно для ступенчатых МПКЭУ). Здесь можно получить 12 различных режимов работы.

Другой подход к созданию комбинированных многопоточных МПКЭУ показала российская фирма Combarco. Они представили несколько различных конструкций многопоточных электромеханических трансмиссий, названных ими «супервариаторами» [12]. Один из вариантов «супервариатора» представлен на рис. 12а.

Эта трансмиссия позволяет получить два различных способа разделения мощности, причем каждому из этих способов соответствуют две ступени. Итого получается 4 различных режима и три фиксированные передачи.

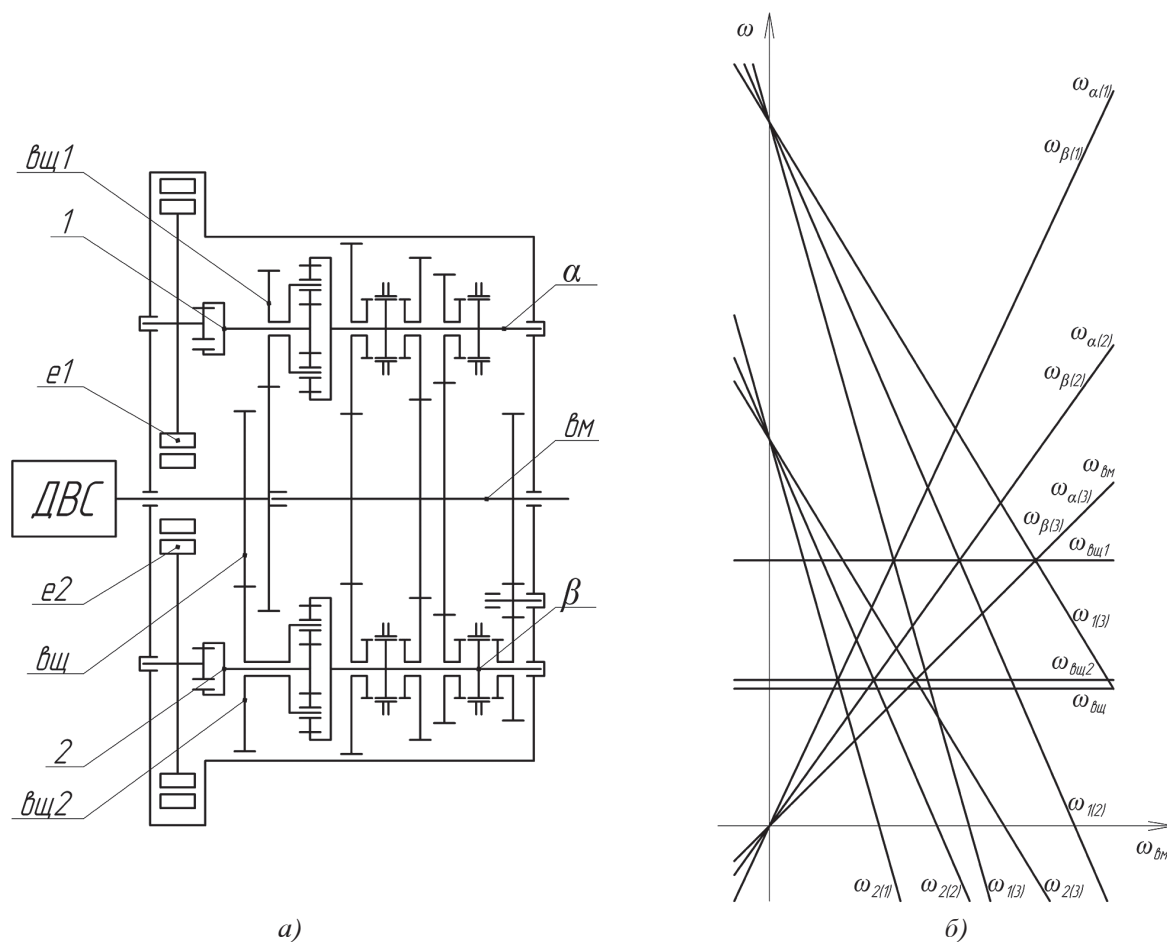
Если все кинематические планы совместить на одном графике, то можно рассмотреть, как будут изменяться скорости всех звеньев

при своевременном переключении режимов (рис. 12б).

Два других варианта «супервариатора» показаны на рис. 13. Вариант, представленный на рис. 13б интересен тем, что переключение режимов осуществляется в нем последовательным перемещением блока шестерен вдоль оси «супервариатора». Всего он имеет 10 фиксированных позиций, которые позволяют получить режим заднего хода, нейтраль, 4 режима и 4 фиксированные передачи переднего хода.

Выводы

Представленный обзор показывает, что многопоточные схемы КЭУ могут значительно отличаться друг от друга по уровню сложности. Наиболее простые однорежимные КЭУ, конечно, уступают в характеристиках (прежде всего, в КПД) наиболее совершенным комбинированным схемам, однако последние достаточно громоздки и дороги. Поэтому встает вопрос о том, применение каких из этих схем окажется экономически наиболее оправданным.



а) б)
Рис.11. Кинематическая схема (а) и кинематический план (б) трансмиссии Comet Drivetrain от Robert Bosh Company

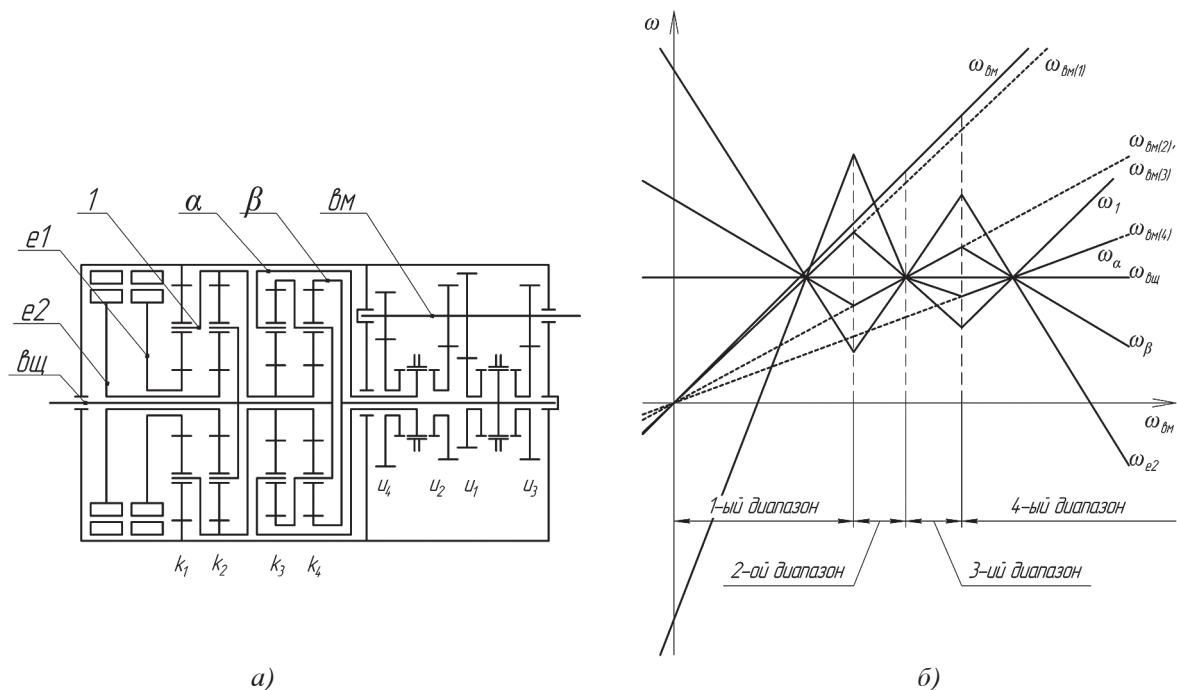


Рис. 12. Кинематическая схема (а) и совмещенный кинематический план (б) «супервариатора» от компании Combarco

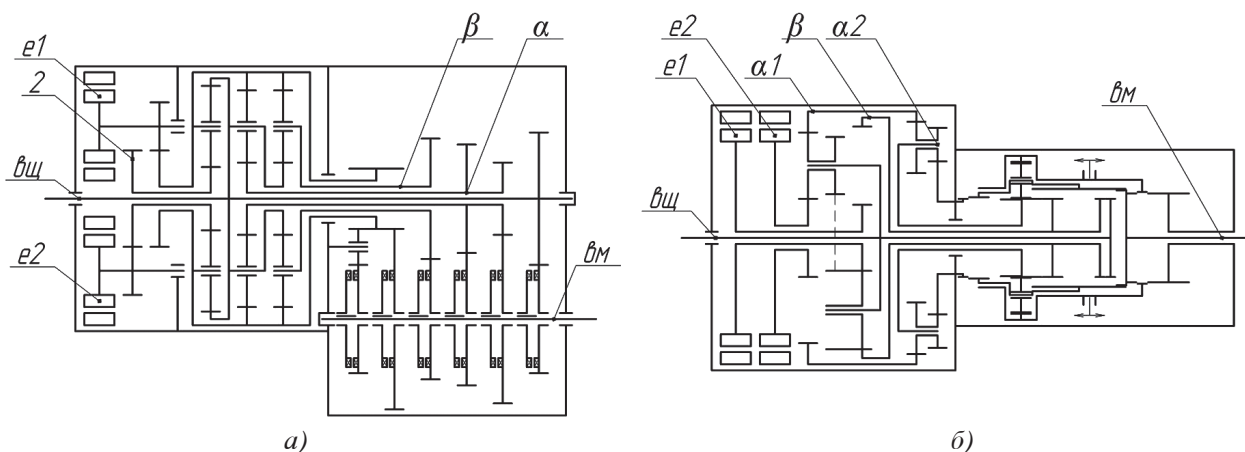


Рис. 13. Кинематические схемы других вариантов «супервариатора»

Поскольку гибридные трансмиссии стоит применять, в основном, на городском транспорте, который эксплуатируется в условиях малых дорожных сопротивлений, неразрывность потока мощности в трансмиссии не является критическим требованием к многопоточной КЭУ. Это означает, что от сложных и дорогих переменнопоточных и комбинированных схем, вероятно, можно отказаться в пользу более простых ступенчатых МПКЭУ, которые могут обеспечить и высокий КПД, и получение произвольного передаточного числа в трансмиссии.

Литература

1. Баулина Е.Е., Круташов А.В., Серебряков В.В., Филонов А.И., Бахмутов С.В. Разработка комбинированной энергетической установки последовательно-параллельного типа для легких коммерческих автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 1. С. 10–14.
2. Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод расчета динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией, построенной по схеме GM // Журнал автомобильных инженеров. 2011. № 4. С. 14–19.
3. Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод расчета динамических характеристик

- транспортного средства с гибридной трансмиссией THS // Журнал автомобильных инженеров. 2010. № 5. С. 26–30.
4. Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Метод расчета динамических характеристик транспортного средства с гибридной трансмиссией THS // Журнал автомобильных инженеров. 2010. № 6. С. 20–25.
 5. Котиев Г.О., Харитонов С.А., Нагайцев М.В. Обзор кинематических схем построения гибридных трансмиссий // Журнал автомобильных инженеров. 2010. № 4. С. 8–13.
 6. Исаков П.П., Иванченко П.Н., Егоров А.Д. Электромеханические трансмиссии гусеничных тракторов: Теория и расчет. Л.: Машиностроение, 1981. 302 с.
 7. 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), pp. 1601–1614.
 8. Tim M., Grewe, Brendan M., Conlon, Alan G. Holmes. Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission, SAE 2007-01-0273.
 9. Villeneuve A. Dual mode electric infinitely variable transmission. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2004, pp. 895–922.
 10. Антонов А.С., Магидович Е.И., Новохатько И.С. Гидромеханические и электромеханические передачи транспортных и тяговых машин. Л.: Машгиз, 1963. 352 с.
 11. Schulz M. Circulating mechanical power in a power-split hybrid electric vehicle transmission, Proc. Instrum. Mech. Eng.-Part D J. Automob. Eng., vol. 218, no. 12, pp. 1419–1425, Dec. 2004.
 12. Давыдов В.В. Многодиапазонная бесступенчатая трансмиссия со сложным разделением потока мощности - супервариатор // Машиностроение: новости, статьи, каталог машиностроительных заводов, 22 сентября 2011. www.i-Mash.ru
- References**
1. Baulina E.E., Krutashov A.V., Serebryakov V.V., Filonov A.I., Bakhmutov S.V. Development of combined energy transmission of consistent-parallel type for light commercial vehicles. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2012. No 1, pp. 10–14 (in Russ.).
 2. Kotiev G.O., Kharitonov S.A., Nagaytsev M.V. The method of calculation of dynamic characteristics of a vehicle with a hybrid powertrain, built on GM scheme. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2011. No 4, pp. 14–19 (in Russ.).
 3. Kotiev G.O., Kharitonov S.A., Nagaytsev M.V. The method of calculation of dynamic characteristics of a vehicle with THS hybrid powertrain. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2010. No 5, pp. 26–30 (in Russ.).
 4. Kotiev G.O., Kharitonov S.A., Nagaytsev M.V. The method of calculation of dynamic characteristics of a vehicle with THS hybrid powertrain. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [...]. 2010. No 6, pp. 20–25 (in Russ.).
 5. Kotiev G.O., Kharitonov S.A., Nagaytsev M.V. Overview of kinematic schemes of hybrid transmissions construction. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov*. 2010. No 4, pp. 8–13 (in Russ.).
 6. Isakov P.P., Ivanchenko P.N., Egorov A.D. *Elektromekhanicheskie transmissii gusenichnykh traktorov: Teoriya i raschet* [Electromechanical transmissions of caterpillar tractors: theory and calculation]. Leningrad. Mashinostroenie Publ. 1981. 302 p.
 7. 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), pp. 1601–1614.
 8. Tim M., Grewe, Brendan M., Conlon, Alan G. Holmes. Defining the General Motors 2-Mode Hybrid Transmission, SAE 2007-01-0273.
 9. Villeneuve A. Dual mode electric infinitely variable transmission. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, 2004, pp. 895–922.
 10. Antonov A.S., Magidovich E.I., Novokhat'ko I.S. *Gidromekhanicheskie i elektromekhanicheskie peredachi transportnykh i tyagovykh mashin* [Hydromechanical and electromechanical transmissions of transport and traction machines]. Leningrad, Mashgiz Publ., 1963. 352 p.
 11. Schulz M. Circulating mechanical power in a power-split hybrid electric vehicle transmission, Proc. Instrum. Mech. Eng.-Part D J. Automob. Eng., vol. 218, no. 12, pp. 1419–1425, Dec. 2004.
 12. Davydov V.V. Multirange continuously variable transmission with a complex division of power flow – supervariator. *Mashinostroenie: novosti, stat'i, katalog mashinostroitel'nykh zavodov*. 22 sentyabrya 2011. www.i-Mash.ru

OVERVIEW AND CLASSIFICATION OF ADVANCED SCHEMES OF MULTITHREADED COMBINED ENERGY TRANSMISSIONS BASED ON THEIR KINEMATIC ANALYSIS

A.V. Ryabev

Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)

+7 926 768-36-94, Ryabev-Alexander@yandex.ru

The article deals with the existing and promising modern automotive multithreaded combined energy transmissions, based on the principle of separation of power for the electrical and mechanical streams. These combined energy transmissions due to the presence in their design of continuously variable electric transmission allow obtaining an arbitrary gear ratio from the engine to the wheels, while maintaining high efficiency inherent to manual transmission. It allows to assume that multithreaded combined energy transmissions are promising for use in hybrid vehicles as evidenced by the successful operation of Toyota Prius automobile. The article describes 16 different schemes of electromechanical transmissions. Some of them are actually applied in practice, while others exist only as prototypes or theoretical projects. On the basis of the kinematic analysis, including determination of number of operating modes and degrees of freedom as well as the construction of kinematic plans for different of operating modes the classification of multithreaded combined energy transmissions by type of differential mechanism (mechanical part of transmission) was proposed. There were allocated single-mode and multi-mode multithreaded combined energy transmissions. The last ones were divided into three classes, depending on the method of obtaining different modes: stepped, variable and combined. Moreover, within each class transmissions with differential at input, differential at output with complex power division were identified. This review allows to get acquainted with possibilities of application of multithreaded combined energy transmissions in road transport, to understand its strengths and weaknesses, identify promising areas of application of multithreaded electromechanical transmissions of various types.

Keywords: combined energy transmissions, hybrid vehicles, vehicles with combined energy transmissions, multithreaded combined energy transmissions.