

Възможности за съхранение на енергията чрез маховици в хибридни автомобили

Иван Евтимов

Ways of preserving energy by using flywheels in hybrid vehicles. In this paper the different ways of preserving and generating energy during deceleration of vehicles are analysed. This process leads to decrease in fuel consumption and CO₂ emissions. Two main methods of energy preservation are presented, with their advantages and disadvantages. Furthermore, the article explores the future trends of development and evolution in this area.

Key words: flywheel KERS, kinetic energy, continuously variable transmission, moment of inertia rotational velocity, hybrid vehicles.

ВЪВЕДЕНИЕ

Намаляването на количеството вредни емисии от транспортните средства, използващи енергията на течните горива, извежда на преден план разработването и производството на екологични автомобили [1, 2, 4, 5, 11, 16, 18]. На този етап от развитието на техническия прогрес, усилията са насочени към намаляване на разхода на гориво чрез вграждане на различни системи за оптимизиране на режимите на работа на двигателя с вътрешно горене (ДВГ) при различни пътни и атмосферни условия или вграждане в автомобила на втори източник на енергия. Съхраняването и отдаването на кинетичната енергия на автомобила при спиране с помощта на маховик системи, наречени Flywheel KERS (Kinetic Energy Recovery System), обещава по-широко приложение в сравнение с хибридни автомобили, при които енергията се съхранява в акумулаторни батерии [3, 4, 5, 9, 11]. В тази насока е и целта на доклада – да анализира предимствата и недостатъците на двете системи за съхранение на кинетичната енергия на автомобила при спиране и даде определени насоки в тяхното развитие.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Съхранението на енергията в маховици е една технология, позната от хилядолетия. В транспортните средства системата Flywheel KERS намира практическо приложение през 50^{-те} години на миналия век в транспортната мрежа на Цюрих, Швейцария [8]. Маховикът в системата е изработен от стомана с маса 1 500 kg. При 3 000 *tr/min* съхранява в себе си 9,15 kWh енергия, с помощта на която автобусът изминава пробег от 6 km при скорост от 50 до 60 km/h. По време на престой на спирките, маховикът повторно се развърта с енергия от градската електроснабдителна система, с помощта на специални токоснематели.

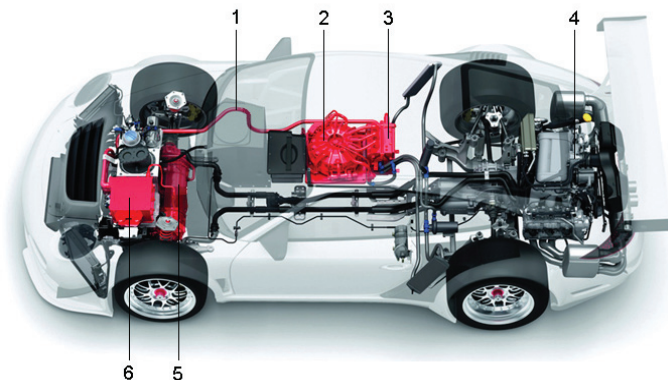
В съвременните хибридни автомобили приложението на маховик системи за регенериране на енергията при спиране е насочено в две насоки. Едната - с използване на маховик (електромеханичен акумулатор), работещ съвместно с един или два тягови електродвигателя [2, 17], а втората – само с маховик (механичен акумулатор) [2, 6, 10, 11, 12, 15]. И при двете системи основният източник на енергия е ДВГ.

1. Flywheel KERS с маховик – електромеханичен акумулатор

При тези системи кинетичната енергия на автомобила при спиране се преобразува от един или два тягови електродвигателя в електрическа, която развърта маховик, с вграден в него спомагателен електродвигател. Така кинетичната енергия от постъпателното движение на автомобила при спиране се преобразува в ротационна кинетична енергия на маховика. В режим на спиране, вграденният в маховика електродвигател работи в режим на генератор, като

преобразува ротационната кинетична енергия на маховика в електрическа за задвижване на тяговите електродвигатели. По този начин тяговите електродвигатели, когато е необходимо подпомагат основният източник на енергия – ДВГ.

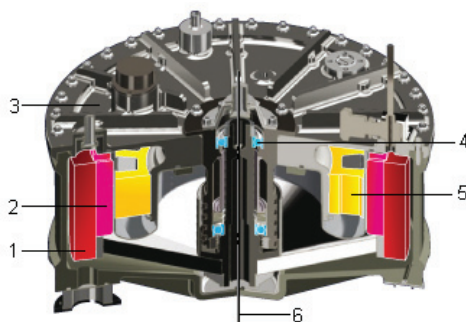
Като пример може да се даде **Flywheel KERS**, вградена в Porsche 911 GT3 R Hybrid [17]. Маховикът достига скорост на въртене $4\,189\text{ rad/s}$ ($40\,000\text{ tr/min}$). При пълно развъртане на този маховик, двата електродвигателя могат да отдадат мощност от 120 kW , за време от 6 до 8 секунди. Маховик системата е показана на фиг. 1.



Фиг.1. Автомобил Porsche 911 GT3 R Hybrid с Flywheel KERS:

1 – силов проводник; 2 – маховик; 3 и 6 – контролери; 4 – ДВГ; 5 – електродвигатели

При спиране тяговите електродвигатели 5 работят в генераторен режим и захранват спомагателен електродвигател, вграден в маховика 2, с помощта на силовия проводник 1. При ускоряване маховикът 2 преобразува ротационната кинетична енергия в електрическа и захранва електродвигателите 5. Устройството на маховика 2 е показано на фиг. 2.



Фиг.2. Устройство на маховик-електромеханичен акумулатор:

1 – въглеродни нишки; 2 – ротор (маховик); 3 – корпус; 4 – лагери; 5 – статор; 6 – ос на въртене

При изработването на маховици се използват композитни материали. С помощта на тези материали могат да се реализират скорости на въртене на маховиците до $6\,283\text{ rad/s}$ ($60\,000\text{ tr/min}$). За да се намалят до минимум съпротивленията, маховиците се окачват на магнитни лагери и се въртят във

вакуумни камери [2, 8, 9, 18], с което съхранената енергия достига 120 Wh. Но съвременните технологии позволяват чрез използване на някои композитни материали (табл. 1)[13] да се постигне и повече.

Процесът на регенериране на енергия протича в две посоки:

- преобразуване на кинетичната енергия на автомобила от линейна в ротационна кинетична енергия на маховика (съхраняване на енергията);

- преобразуване на ротационната кинетична енергия на маховика в постъпателно движение на автомобила (отдаване на енергията).

Процесите във втория етап протичат в обратна посока на първия. Във всеки един от етапите при преобразуване на енергията възникват загуби.

Таблица 1

Характеристики на материали за маховици

Материал	Специфична плътност, kg/m ³	Специфична енергия, kWh/kg
Maraging steel	8 000	0,024
Titanium Alloy	4 500	0,031
E-glass fiber-40% epoxy	1 900	0,014
S-glass fiber/epoxy	1 900	0,020
Kevlar fiber - 40% epoxy	1 400	0,076
Composite carbon fiber - 40% epoxy	1 550	0,052

Преобразуването на енергията през първия етап (съхраняване на енергията), при спиране на автомобила на хоризонтален терен, без отчитане влиянието на съпротивлението от предвижване и съпротивлението на въздуха може, да се представи в следната последователност,

$$E_A = \delta_a \frac{m V^2}{26} \rightarrow E_E = \delta_a \frac{m V^2}{26} \eta_{CB} \rightarrow E_M = \delta_a \frac{m V^2}{26} \eta_{CB} \eta_M = I_M \frac{\omega^2}{2}, \quad (1)$$

където E_A е кинетичната енергия на автомобила, J ;

E_E - преобразуваната кинетична енергия на автомобила в електрическа, J ;

E_M - кинетичната енергия на маховика, J ;

δ_a - коефициентът, отчитащ влиянието на въртящите се маси на автомобила;

m - масата на автомобила, kg ;

V - скоростта на движение на автомобила, km / h ;

η_{CB} - к.п.д. на силовата верига;

η_M - к.п.д. на маховика;

I_M - масовият инерционен момент на маховика, $kg \cdot m^2$.

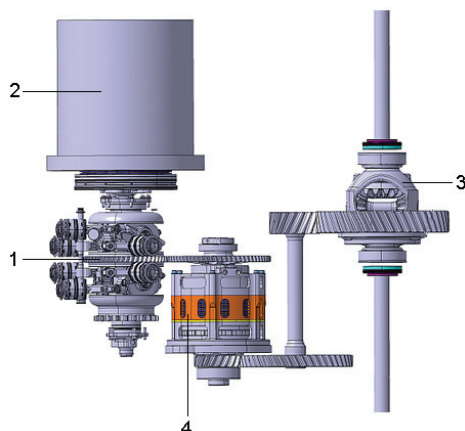
Преобразуването на енергията през втория етап (отдаване на енергията), при приети същите условия на движение, може да се представи в следната последователност

$$E_M = I_M \frac{\omega^2}{2} = \delta_a \frac{m V^2}{26} \eta_{CB} \eta_M \rightarrow E_E = \delta_a \frac{m V^2}{26} \eta_{CB} \eta_M^2 \rightarrow E_A = \frac{m V^2}{26} \eta_{CB}^2 \eta_M^2. \quad (2)$$

От зависимостите (1) и (2) се вижда, че процесът на регенериране на енергия при закъснително движение на автомобила и използването ѝ за неговото предвижване е един доста дълъг и сложен процес, изпълнен с различни видове загуби. Тези загуби се променят в зависимост от условията на движение и режимите на работа на електродвигателите.

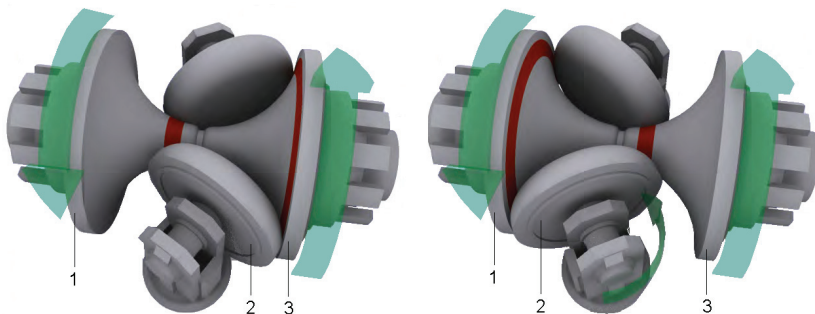
2. Flywheel KERS с маховик – механичен акумулатор

При тези системи кинетичната енергия на автомобила се преобразува с помощта на безстепенна трансмисия (CVT-continuously variable transmission) 1 (фиг. 3) и високоскоростни съединители 4 в ротационна кинетична енергия на



Фиг. 3. Основно елементи на Flywheel KERS с маховик – механичен акумулатор:
1 – CVT; 2 – маховик; 3 – задвижван от системата мост на автомобила;
4 – съединители

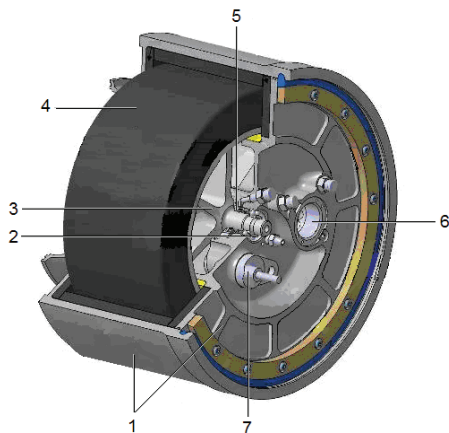
маховика 2 и обратно. За да се постигне по-висока ефективност трансмисията се управлява с софтуер, които в зависимост от условията на движение избира най-подходящото предавателно число, без да се прекъсва мощностния поток. Най-подходящи се оказват тороидалните предавки [18]. Предаването на движението от входящия към изходящия вал на предавката става чрез дисковете 1 и 3 (фиг. 4) с тороидални повърхнини, между които се притиска и завърта ролка 2.



Фиг. 4. Тороидална CVT
1 – входящ диск; 2 – ролка; 3 – изходящ диск

Двете крайни положения на ролката определят предавателното число на предавката. Този процес е свързан само с механични загуби, което в краен резултат увеличава значително [5, 7] ефективността на тази система, спрямо разгледаната по-горе.

Ефективността и надеждността на системите с маховик зависят от конструкцията на маховика, материалите от които е изработен и балансирането му. Устройството на този възел от системата схематично е показано на фиг. 5, а как изглежда конструктивно маховика и Flywheel KERS е показано на фиг. 6 и 7.

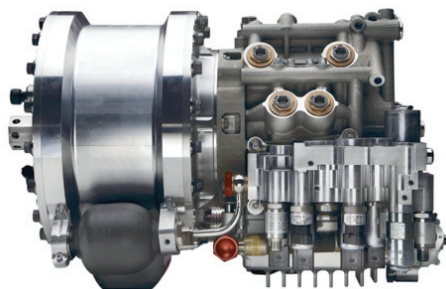


Фиг. 5. Устройство на маховик:

1 - кожух; 2 - лагер; 3 - главина на маховика; 4 - маховик; 5 - вакуумно уплътнение; 6 - вакуумен отвор; 7 - сензор за скоростта на въртене



Фиг. 6. Общ вид на маховика



Фиг. 7. Общ вид на Flywheel KERS

За тази маховик система зависимостите в (1) и (2) приемат вида:

$$E_A = \delta_a \frac{m V^2}{26} \rightarrow E_M = \delta_a \frac{m V^2}{26} \eta_M = I_M \frac{\omega^2}{2}; \quad (3)$$

$$E_M = I_M \frac{\omega^2}{2} = \delta_a \frac{m V^2}{26} \eta_M \rightarrow E_A = \frac{m V^2}{26} \eta_M^2. \quad (4)$$

От зависимостите (3) и (4) показват намалените загуби при съхраняване и отдаване на кинетичната енергия [3, 4, 5, 7, 14]. Това до известна степен определя и нейните предимства, спрямо разгледаната по-горе:

- по-ниска себестойност;
- може да възстанови и съхрани над 70 % от енергията при спиране на автомобила [18];
- притежават отлична управляемост;
- способност да акумулират или освобождават по-голямо количество енергия за кратък период от време;
- дълъг живот.

Към недостатъците на маховика могат да се отнесат допълнителното оборудване, необходимо за нормалната работа – осигуряване вакуумна камера за намаляване загубите от въздушното съпротивление и използването на магнитни лагери [16, 17]. Освен това тази вакуумна камера трябва да изпълнява ролята и на защитен кожух, в случай че настъпи разрушаване на маховика [2, 8, 9]. При маховиците, направени от въглеродни влакна, материалът се разпада под формата на прах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хибридните автомобили, задвижвани от двигател с вътрешно горене и електродвигател, доказаха своите предимства пред класическите автомобили по отношение на по-малкото въздействие върху околната среда. И все пак те не са по-добро решение, отколкото хибридните автомобили с маховик системи, разработени на базата на най-прекият начин за съхраняване на кинетичната енергия – от линейна на автомобила в ротационна на маховика. Това се дължи основно на:

1. Хибридните автомобили с електродвигатели са много скъпи, поради наличието на редки метали;
2. Много големи експлоатационни разходи, особено при смяна на акумулаторната батерия;
3. Маховик системите са изработени от традиционни материали, които са значително по евтини;
4. Идеята, че хибридните автомобили с електродвигатели ще дадат значителен принос в опазване на околната среда, е подвеждаща (при изработването и по време на експлоатацията на тези хибриди се отделя много повече CO_2 , отколкото за един класически автомобил);
5. Системите с маховик са по-ефективни.

Хибридните автомобили, разработени на базата на маховик системи (механични акумулатори) ще бъдат един междинен етап в развитието на екологични автомобили, особено ефективни в градски условия на движение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Евтимов И., Р. Иванов., Б. Ангелов. Акумулаторни батерии за електромобили и хибридни автомобили. Русе, РУ"А.Кънчев", Сборник доклади на научна конференция, 2009, ISSN 1311-3321, 82-88 с.
- [2] Евтимов И., Р. Иванов. Електромобили. Русе, Издателски комплекс при РУ"А.Кънчев", ISBN: 978-954-712-521-6, 2011, 176 С.
- [3] Евтимов И., Р. Иванов. Предимства и недостатъци на съвременните технологии за съхраняване на електрическа енергия, произведена от възобновяеми енергийни източници. Русе, РУ"А.Кънчев", Сборник доклади на научна конференция, 2012, том 51, серия 4, 107-115 с.
- [4] Кинетичен маховик сваля разхода на Volvo. <http://automedia.investor.bg/a/0-nachalo/20219-kinetichen-mahovih-svalia-razhoda-na-volvo/>

- [5]. Новият KERS с маховик. <http://f1racing.bg/2011/02/07/kers-fly-wheel/>
- [6]. Технологии за съхранение на енергия. Списание "Енергия", брой 6, 2011.
- [7]. Трамваите икономисват енергия чрез запазването ѝ с маховици, Цвикау-Германия. <http://www.eltis.org>
- [8]. Чакмаков Г., В. Живков, Н. Николов, Г. Тодоров. Високоскоростни навити маховици с предварително напрегната структура за оптимално напрегнато състояние процес на експлоатация, Българско списание за инженерно проектиране, април 2012 г. бр. №11, 39-45 с.
- [9]. Andrew Kearns, RJ Liu. Flywheel based kinetic energy recovery system for autos. Mechanical Engineering, March 1, 2012, pp. 1-5
- [10]. Bent Soresen. Renewable energy. Conversion. Transmission and Storage, 2007, pp. 327.
- [11]. Driving Volvo's KERS Flywheel Hybrid Prototype: What It's Like. http://www.motorauthority.com/news/1084237_driving-volvos-kers-flywheel-hybrid-prototype-what-its-like
- [12]. J. I. San Martín, I. Zamora, J. J. San Martín, V. Aperribay, P. Eguía. Energy Storage Technologies for Electric Applications. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento/almacenamiento.html>
- [13]. Kinetic energy and moment of inertia of a flywheel. http://www.engineeringtoolbox.com/flywheel-energy-d_945.html
- [14]. Marcelo Gustavo Molina. Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications. ISBN: 978-953-7619-68-8.
- [15]. Schwungrad und Schwungradspeicher, Energie im Nahverkehr. <http://www.energyprofi.com/jo/Speicher-fuer-mechanische-Energie-im-Nahverkehr.html>
- [16]. Volvo testet innovative Schwungrad-Speichertechnik. <http://auto-clever.de/22383-volvo-testet-innovative-schwungrad-speichertechnik>
- [17]. Porsche 911 GT3 R Hybrid Using Williams Flywheel KERS. <http://www.greencarcongress.com/2010/02/gt3r-20100211.html>
- [18]. Thomas M., D. Nishanth. flywheel based kinetic energy recovery systems (kers) integrated in vehicles. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). ISSN : 0975-5462, Vol. 5 No.09 Sep 2013, pp. 1 694-1 699.

За контакти:

Доц. д-р Иван Евтимов, катедра „Двигатели и транспортна техника“, Русенски университет „Ангел Кънчев“, тел.: 082-888 527, e-mail: ievtimov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.