

---

# Aplikačné možnosti HCCI technológie

---

## Matúš Lavčák, Ing.

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Letná 9, 042 00 Košice, Slovensko.  
E-mail: matus.lavcak@tuke.sk, Tel.: +421 55 602 2355

## Michal Puškár, doc. Ing., PhD. \*

Katedra konštrukčného a dopravného inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Technická univerzita v Košiciach,  
Letná 9, 042 00 Košice, Slovensko.  
E-mail: michal.puskar@tuke.sk, Tel.: + 421 55 602 2360

## Application possibilities of HCCI technology

**Abstract:** This text describes the current state of the art of *HCCI* technology, which is based on combining the characteristics of a petrol and diesel engine. *HCCI* engines offer higher fuel efficiency and lower nitrogen oxide emissions. However, they also have disadvantages such as limited load range, control complexity and cold weather starting problems. The next section of the text discusses hybrid propulsion, which uses a combination of an internal combustion engine and an electric motor. It describes the different types of hybrid powertrains such as soft hybrids, plug-in hybrids and full hybrids. Explains their advantages and possible applications. A solution is then proposed where the *HCCI* engine would serve as a generator in a series hybrid vehicle with an electric motor. Such an arrangement allows optimization of energy use and reduction of emissions. Finally, the relevance of *HCCI* technology for improving the efficiency of fuel engines and hybrid vehicle design is evaluated.

**Keywords:** *HCCI* engine, hybrid, *sHEV*, *PHEV*

---

## ÚVOD

V súčasnosti je vyvíjaný značný tlak na automobilový priemysel, ktorého cieľom je neustále znižovanie emisií vozidiel, efektívnejšie využívanie energie paliva a aplikácia pokročilých technológií. Súčasné ale hlavne plánované emisné normy sú tak prísne, že automobilky musia hľadať alternatívy k súčasným spaľovacím motorom ako sú napr. elektropohony alebo vodíkové palivové články. Zároveň ale prebieha aj výskum a vývoj zameraný na pokročilé technológie spaľovania, ktoré by zachovali účinnosť aktuálnych spaľovacích motorov a výrazne znížili produkciu emisií. Takouto technológiou je *HCCI*, ktorá využíva princíp samovznietenia homogénnej palivovej zmesi pomocou kompresie. Spaľovanie homogénnej zmesi prebieha naraz v celom spaľovacom priestore valca, dochádza teda ku zhoreniu takmer všetkej zmesi. Využitie technológie *HCCI* doteraz bránilo niekoľko zásadných problémov, ako sú vysoké kompresné tlaky a značná miera uvoľňovania tepla. Ďalším vážnym problémom je, že proces samovznietenia zmesi je náročný na riadenie. Výskum a vývoj sa preto neustále zameriava na riešenie výziev spojených s riadením spaľovania, rozsahom záťaže a flexibilitou paliva. Implementácia *HCCI* motorov v hybridných vozidlách je jedným z najvhodnejších spôsobov využitia týchto technológií, čo umožňuje

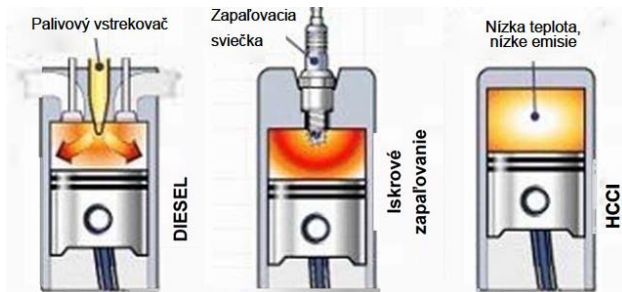
optimalizáciu využitia energie a zníženie emisií pri prevádzke vozidla. Súčasná a budúca vylepšenia týchto technológií budú prispievať k zlepšeniu udržateľnosti dopravy a ochrane životného prostredia.

## 1 AKTUÁLNY STAV RIEŠENIA HCCI TECHNOLOGIE

*HCCI*, čo je skratka pre *Homogeneous Charge Compression Ignition*, je typ spaľovacieho motora, ktorý kombinuje vlastnosti zážihového (*SI*) a naftového motora (obr. 1). V motore *HCCI* sa homogénna zmes vzduchu a paliva stlačí na vysoký tlak a teplotu, čo spôsobí jej samovoľné zapálenie bez iskry alebo plameňa, podobne ako u dieselových motorov. Avšak palivová zmes v *HCCI* motore sa zapáli pri nižšej teplote ako v dieselovom motore, čo znižuje emisie oxidov dusíka ( $NO_x$ ).

Motory *HCCI* ponúkajú vyššiu palivovú účinnosť a nižšie emisie ako tradičné zážihové motory, pretože môžu pracovať s chudobnejšími zmesami vzduchu a paliva a majú nižšie čerpacie straty v dôsledku vyššieho kompresného pomeru. Avšak *HCCI* motory majú aj niektoré nevýhody, ako je obmedzený rozsah záťaže, komplexita riadenia, problémy so štartovaním v chladnom počasí, nestabilita spaľovania a obmedzená flexibilita paliva.

Hlavnou výhodou *HCCI* motora je, že vo vnútri spaľovacej komory nie je žiadny bod vznietenia, ako je vstrekač alebo zapaľovacia sviečka. Spaľovanie v *HCCI* motore prebieha pomocou samovznietenia celej zmesi vzduchu/paliva pri použití iba kompresie. To eliminuje vysoké teploty vo valci a takmer úplne redukuje emisie tepelných  $NO_x$ . Riadenie času spaľovania a rýchlosti spaľovania môže vyžadovať ďalšie technológie, ako je variabilné



Obr. 1. Schéma činnosti *CI*, *SI* a *HCCI* motora

časovanie ventilov a priame vstrekovanie.

Výskumy ukázali, že kombinácia pokročilých technológií ventilového rozvodu, ako je variabilné časovanie ventilov a variabilný zdvih ventilov, spolu s recirkuláciou výfukových plynov (*EGR*), umožňuje lepšiu reguláciu teploty vo valcoch a kontrolovanie spaľovania v *HCCI* motore. Výskumy tiež ukázali, že zvýšenie koncentrácie palivového oleja v palive vedie k zvýšeniu výkonu motora. Maximálny krútiaci moment motora *HCCI* bol pozorovaný pri otáčkach motora medzi  $1200 \text{ min}^{-1}$  a  $1300 \text{ min}^{-1}$  a pomeru prebytočného vzduchu medzi 1,8 a 2.

Tepelná účinnosť motora *HCCI*, definovaná ako pomer výkonu k množstvu tepelného príkonu paliva, sa zvyšuje s nárastom otáčok motora a pomeru prebytočného vzduchu. Výskumy taktiež ukázali, že zvýšenie oktánového čísla palivovej zmesi umožňuje kontrolovanie a pomalšie spaľovanie v *HCCI* motore.

Celkovo je *HCCI* technológia sľubnou voľbou pre zlepšenie účinnosti palivových motorov a zníženie emisií, ale stále existujú výzvy, ako je riadenie a stabilizácia spaľovania, a obmedzenia týkajúce sa rozsahu záťaže a flexibility paliva [1-4].

## 2 HYBRIDNÝ POHON

Hybridné vozidlo je automobil, ktorý využíva dva alebo viacero zdrojov energie, napríklad kombináciu bežného spaľovacieho motora a elektromotora. Tieto zdroje energie spolupracujú a umožňujú vozidlu dosahovať mimoriadne nízku spotrebu paliva a redukcii emisií, pričom poskytujú hladkú a tichú jazdu [3, 6].

### 2.1 Mild hybrid electric vehicle

Mäkké hybridné vozidlá predstavujú jednu z kategórií hybridných vozidiel, ktoré využívajú elektromotor ako dodatočný zdroj energie s cieľom znížiť spotrebu

paliva a emisie škodlivých látok. Na rozdiel od plnohodnotných hybridných systémov, mäkký hybridný systém zvyčajne neumožňuje pohyb vozidla výhradne na elektrickú energiu. Jeho hlavnou funkciou je poskytnúť dodatočný výkon benzínovému motoru vozidla, najmä pri zrýchlení z mŕtveho bodu, a zároveň pomáha zmierniť zaťaženie energeticky náročných systémov benzínového motora, ako je napríklad klimatizácia. Mäkké hybridy sú často vybavené 48-voltovými elektrickými systémami a nepotrebuje sa pripájať k elektrickej sieti. Ich batérie sa nabíjajú kombináciou energie z benzínového motora a energie získanej pri brzdení vozidla, čo sa nazýva rekuperatívne brzdenie. V porovnaní s plnohodnotnými hybridmi majú mäkké hybridy zvyčajne menšie batérie a elektromotory. Úspora paliva pomocou systému *MHEV* môže byť približne 0,4 litra na 100 kilometrov, pričom to umožňuje znížiť emisie *OEM* o 7 % až 15 %, čo predstavuje pokles o približne  $20 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$  na kompaktnom vozidle.

### 2.2 Plug-in hybridné vozidlá

*Plug-in hybridné vozidlá (PHEV)* sú automobily, ktoré kombinujú spaľovací motor a elektromotor a majú schopnosť byť externým nabíjaním z elektrickej siete. Tieto vozidlá poskytujú flexibilitu a využívajú výhody elektrického aj spaľovacieho pohonu. *Plug-in hybridy* majú väčšiu batériu než bežné hybridné vozidlá a umožňujú dlhšie jazdy na elektrický pohon. Hlavnou výhodou *plug-in hybridných vozidiel* je ich nízka spotreba paliva a emisie. Vďaka väčšej batérii majú dlhší elektrický dojazd, čo umožňuje jazdu bez emisií na určitú vzdialenosť. To je veľmi výhodné pre mestské jazdy a krátke výlety, kde je možné využiť elektrický režim. Pri dlhších cestách, kedy je potrebná väčšia energia, sa zapína spaľovací motor, ktorý poskytuje pohon vozidla a batéria sa môže dobíjať pomocou rekuperácie brzdného energetického systému alebo prostredníctvom externého nabíjania [5, 6]. Flexibilita je ďalšou výhodou *plug-in hybridov*. Vodiči majú možnosť vybrať si medzi elektrickým režimom jazdy, hybridným režimom alebo režimom využívania iba spaľovacieho motora. Táto flexibilita umožňuje prispôbiť vozidlo rôznym jazdným podmienkam a potrebám vodiča (obr. 2a) [5-7].

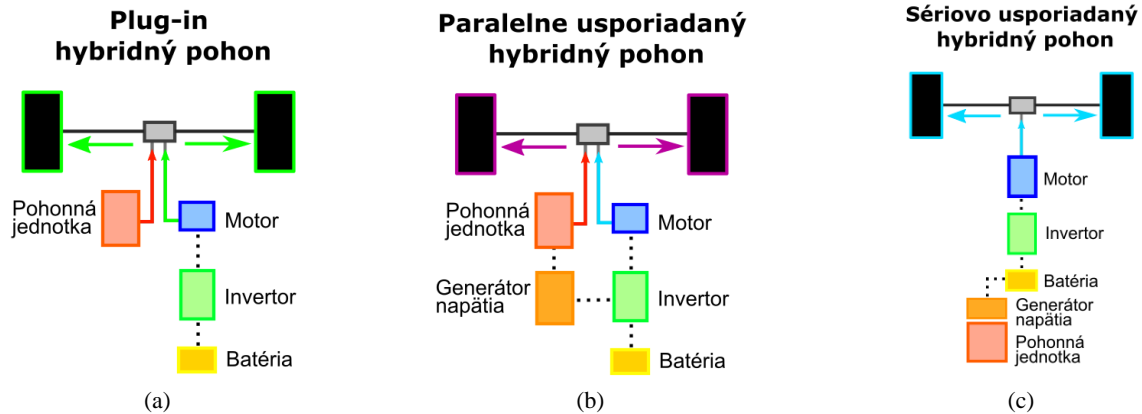
### 2.3 Plne hybridné vozidlá

*Plne hybridné vozidlá* predstavujú ďalšiu formu hybridných vozidiel, ktoré kombinujú benzínový motor s elektrickým komponentom. V porovnaní s mäkkými hybridmi má elektrický komponent v plných hybridoch schopnosť zvládať vyššie pracovné zaťaženie. *Plne hybridné vozidlá (FHEV)* disponujú elektrickým režimom, ktorý je aktívny iba pri nízkych rýchlostiach do 30 míľ za hodinu a s dojazdom 10-15 míľ. Spaľovací motor je zapojený pri vyšších rýchlostiach a zároveň slúži ako generátor pre

dobíjanie akumulátorov. Väčšina *plne hybridných vozidiel* dokáže prejsť určitú vzdialenosť výhradne na elektrinu. Toto sa zvyčajne dosahuje pri nižších rýchlostiach v mestských oblastiach. Jedným z dôvodov, prečo môžeme vidieť, že *plne hybridné vozidlá* majú vyššie hodnoty spotreby paliva v meste ako na diaľnici (v porovnaní so štandardnými

## 2.5 Sériovo usporiadaný hybridný pohon

*Sériovo zapojené hybridné pohony* predstavujú jednu z konfigurácií hybridných pohonových systémov. V tomto type systému je spaľovací motor pripojený k generátoru, ktorý slúži ako primárny zdroj elektrickej energie pre pohonný elektromotor vozidla. Tento



Obr. 2. Schéma *Plug-in hybridného pohonu* (a), Schéma *paralelne usporiadaného hybridného pohonu* (b), Schéma *sériovo usporiadaného hybridného pohonu* (c)

benzínovými vozidlami), je práve kvôli tomuto elektrickému režimu, ktorý využíva nízke rýchlosti a rekuperáciu energie [3, 5, 6].

## 2.4 Paralelne usporiadaný hybridný pohon

*Paralelné zapojenie hybridných pohonov* predstavuje jednu z najpoužívanejších konfigurácií hybridných vozidiel. V tomto type systému sú spaľovací motor a elektromotor pripojené paralelne a sú schopné spoločne poháňať vozidlo.

V *paralelnom hybridnom pohone* spaľovací motor a elektromotor majú možnosť nezávisle prispievať k pohybu vozidla. Spaľovací motor poskytuje pohon cez prevodovku kolesám vozidla, zatiaľ čo elektromotor je napájaný z batérie a dodáva dodatočný výkon pri potrebe väčšieho zrýchlenia alebo pri vyšších rýchlostiach.

Táto konfigurácia umožňuje optimalizáciu využitia spaľovacieho motora a elektromotora, čím sa dosahuje lepšia účinnosť a zníženie spotreby paliva. Pri nižších rýchlostiach alebo pri potrebe menšej sily na pohon vozidla môže elektromotor prevziať väčšiu časť zaťaženia, čo vedie k zníženiu spotreby paliva a emisií. Naopak, pri vyšších rýchlostiach alebo pri potrebe väčšieho výkonu sa zapája spaľovací motor a elektromotor pracuje súčasne, čo poskytuje dostatočný výkon pre pohon vozidla.

Vozidlá s *paralelnými hybridnými pohonmi* majú väčšiu flexibilitu vzhľadom na prevádzkové podmienky. Môžu prevádzkovať elektromotor, spaľovací motor alebo oboje súčasne podľa potreby. To umožňuje optimalizovať využitie energie a zároveň poskytuje jazdu s nižšími emisiami a lepšou účinnosťou (obr. 2b) [5, 7].

elektromotor je potom zodpovedný za pohyb vozidla a prenáša výkon na kolesá.

Pri *sériovo zapojených hybridných pohonoch* spaľovací motor funguje ako generátor a je poháňaný palivom. Jeho úlohou je generovať elektrickú energiu, ktorá je potom ukladaná do batérií. Táto elektrická energia je neskôr použitá na napájanie elektromotora vozidla. Spaľovací motor pracuje pri optimálnych podmienkach, kde môže dosiahnuť najvyššiu účinnosť paliva, pretože jeho hlavnou úlohou je generovanie elektrickej energie, a nie priame poháňanie kolies.

Výhodou *sériového hybridného systému* je, že spaľovací motor môže pracovať v optimálnom pracovnom bode a zároveň poskytovať energiu pre elektromotor, čo vedie k efektívnejšiemu využitiu paliva a nižším emisiám. *Sériové hybridné motory* sú obzvlášť vhodné pre jazdu v mestských oblastiach a pri nízkych rýchlostiach, kde elektromotor môže byť využitý na plno.

*Sériovo zapojené hybridné motory* majú svoje výhody, ale aj obmedzenia. Napríklad, pri dlhších jazdách na vyšších rýchlostiach môže spaľovací motor pracovať neefektívne, keďže nemá priamy mechanický vplyv na pohon kolies. Okrem toho, pri vyšších rýchlostiach elektromotor nemusí poskytovať dostatočný výkon na udržanie požadovanej rýchlosti.

V súčasnosti prebieha ďalší vývoj *sériovo zapojených hybridných motorov* s cieľom zlepšiť ich účinnosť a výkon. Tieto technológie zohrávajú dôležitú úlohu v snahe o zníženie spotreby paliva a emisií škodlivých látok v doprave a poskytujú užívateľom možnosť jazdy s nižšími nákladmi na palivo a s menším vplyvom na životné prostredie [4-7].

### 3 NÁVRH RIEŠENIA

Po zhodnotení všetkých výhod a nevýhod tohto typu motora možno konštatovať, že najvhodnejším spôsobom jeho využitia je v hybridných vozidlách, kde by *HCCI* motor pracoval v kombinácii s elektromotorom. V tomto prípade bude motor *HCCI* slúžiť ako generátor a bude slúžiť na nabíjanie batérie hybridného vozidla, zatiaľ čo elektromotor bude zabezpečovať pohon. Tento princíp je známy ako "sériový hybrid" alebo hybridný pohon so sériovým usporiadaním pohonnej jednotky. Táto konfigurácia umožňuje motoru *HCCI* pracovať v optimálnom rozsahu otáčok a pri konštantnej záťaži. S pomocou generátora, ktorý je spojený so motorom *HCCI* cez spojku, je zabezpečený stabilný prúd pre dobíjanie batérií. Vďaka tejto konfigurácii nie je potrebné mať príliš veľké batérie, keďže generátor je hlavným zdrojom energie a batérie slúžia iba na akumuláciu menšieho množstva energie. Tento hybridný pohon s kombináciou *HCCI* motora ako generátora a elektromotoru je výhodný pre prevádzku vo meste aj mimo neho.

Obrázok 2c znázorňuje sériový hybrid založený na *HCCI* motore. Generátor v tomto prípade zabezpečuje "studený štart" motora a plní tak aj úlohu štartéra. To znamená, že časť energie z batérie sa používa na naštartovanie spaľovacieho motora. Štartér pomáha prekonať "mŕtvu bod" motora a poskytuje impulz pre jeho ďalšiu prevádzku. Pôvodná konštrukcia motora totiž neobsahovala zariadenie na štartovanie pracovného procesu.

Pokiaľ ide o palivo, konštrukcia motora umožňuje používanie rôznych druhov paliva vrátane najnovších uhlíkovo neutrálnych palív, ako je napríklad *eFuel*, vodík a ďalšie. Princíp fungovania motora sa nemodifikuje, no výbuchový tlak jednotlivých palív sa môže líšiť. Pre predhrievanie zmesi možno využiť elektronické ohrievače zmesi, podobne ako je to v niektorých dieselových motoroch.

### 4 ZHODNOTENIE A ZÁVER

V závere možno konštatovať, že motor *HCCI* prináša viaceré výhody oproti bežným motorom. Jeho hlavnou silnou stránkou je nízka úroveň emisií škodlivých látok, čo je jedným z hlavných cieľov *Európskej únie*. Motor *HCCI* má tiež vysokú účinnosť v porovnaní s inými typmi motorov predstavenými v tejto práci, pričom sa môže pohybovať až na úrovni 55 %. Napriek tomu však existujú aj niektoré slabé stránky tohto typu motora. Napríklad jeho najvyššia účinnosť sa dosahuje v obmedzenom rozsahu otáčok medzi 1200 min<sup>-1</sup> a 1300 min<sup>-1</sup>, čo znamená, že nie je vhodný ako priama náhrada za konvenčné spaľovacie motory. Najúspešnejšie uplatnenie motora *HCCI* je v konštrukcii hybridných vozidiel. Výber správneho hybridného pohonu umožňuje dosiahnuť maximálnu

účinnosť celej sústavy s motorom *HCCI* na čele. Konštrukcia motora *HCCI* umožňuje použitie rôznych druhov paliva, vrátane nafty a benzínu. Taktiež je možné využiť aj netradičné palivá, ako napríklad syntetické palivá alebo vodík, čo umožňuje dosiahnuť nulové emisie z motora.

### Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0328.

Príspevok vznikol s podporou projektov: VEGA 1/0318/21 „Výskum a vývoj inovácií pre efektívnejšie využitie obnoviteľných zdrojov energie a znižovanie uhlíkovej stopy vozidiel.“ a KEGA 007TUKE-4/2023 „Transfer inovácií a pokročilých technológií pre ekologickejšie a efektívnejšie pohonné systémy vozidiel do edukačného procesu“.

### LITERATÚRA

[1] RAC (2023): *Euro 1 to Euro 6 guide—findout your vehicle's emissions norm*. Dostupné na internete: <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/>

[2] DIESELNET (2022): *Emission Standards*. [online]. Dostupné na internete: <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

[3] EUROPEAN COMMISSION (2023): *Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality* [online]. Dostupné na internete: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_22\\_6495](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6495).

[4] ENGINELABS (2023): *Is HCCI The Future Of The Internal Combustion Engine?* Dostupné na internete: <https://www.engine-labs.com/news/video-hcci-future-internal-combustion-engine/>

[5] SAXENA, S. - VUILLEUMIER, D. - KOZARAC, D. - KRIECK, M. - DIBBLE, R. - ACEVES, S. (2014): *Optimal operating conditions for wet ethanol in a HCCI engine using exhaust gas heat recovery*. In: *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 269-277.

[6] X-ENGINEER (2023): *Types of Hybrid Electric Vehicles (HEV)*. Dostupné na internete: <https://x-engineer.org/hybrid-electric-vehicle-hev/>

[7] DIFFERENCE BETWEEN (2023): *Difference Between Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. [online]. Dostupné na internete: <http://www.differencebetween.net/technology/difference-between-hybrid-and-plug-in-hybrid-electric-vehicles/>