

# HCCI motor kopogásos égése során megjelenő negatív munkaterület szimulációs elemzése

## Simulational study of the neagative work area of an HCCI engine focusing on undesired knocking

TÓTH-NAGY Csaba

Széchenyi István Egyetem Audi Hungaria Járműmérnöki Kar, Belső Égésű Motorok Tanszék,  
H 9026 Győr, Egyetem tér 1.,  
tel.: +36302774030, e-mail: toth-nagy.csaba@ga.sze.hu

### Abstract

*This article presents the negative work area phenomenon that occurs in a homogeneously charged compression ignition internal combustion engine during undesired knocking. The phenomenon was observed during prototype operation and proven with simulation. The present article explains the prototype design, presents the simulational model, and shows the results.*

**Keywords:** negative work, HCCI, knocking

### Kivonat

*Ez a cikk bemutatja a negatív munkaterület jelenségét, amely egy homogén töltésű kompresszió gyújtású belsőégésű motorban jelentkezik a nem kívánt kopogás során. A jelenség prototípus szabaddugattyús belsőégésű motor működése közben nyilvánult meg és szimulációval lett reprodukálva. A jelen cikk ismerteti a prototípus felépítését, bemutatja a szimulációs modellt, és prezentálja az eredményeket.*

**Kulcsszavak:** negatív munka, HCCI, kopogásos égés

## 1. BEVEZETŐ

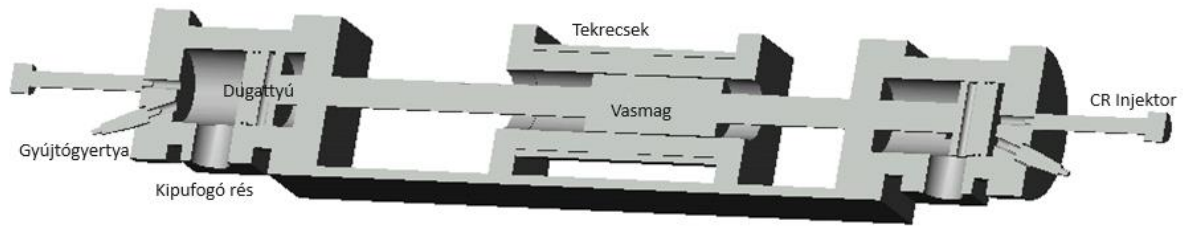
Az utóbbi 20 évben a személygépkocsik hajtása nagymértékben átalakult. A teljesítményelektronika fejlődése magával hozta a villamoshajtások fejlődését, az akkumulátor jelenlegi hiányosságai azonban még nem adnak teljes teret a tisztán villamos hajtásnak. Azonban a károsanyagkibocsátás és fogyasztás csökkentése érdekében a mai járművekben egyre népszerűbb a hibridelektromos hajtáslánc, ami egy közbülső lépés lehet az elektrifikáció folyamatában, hiszen 2023-ban már minden negyedik eladott autó hibrid elektromos jármű volt az Európai Unióban [1].

A hibrid hajtásláncokban alkalmazott architektúrák között ott találjuk a soros hibridet [2]. A soros hibridben egy segédteljesítmény egység villamosenergiát termel, amely energia vagy egy villanymotoron keresztül a kerekeket hajtja, vagy az akkumulátort tölti, és később kerül felhasználásra. A segédteljesítmény egységek sorában a hagyományos belsőégésű motorral hajtott forgógenerátor és a tüzelőanyagcella mellett, megtalálható a szabaddugattyús belsőégésű motorral hajtott lineáris generátor [3]. A szabaddugattyús belsőégésű motor különlegessége, hogy nincs benne forgattyús tengely, minden mozgó alkatrésze egyenes vonalú alternáló mozgást végez. A szabaddugattyús motorból történő energiakivétel egyik lehetséges módja, a hozzákapcsolt lineáris generátoron keresztül történik villamosenergia formájában. Így a szabaddugattyús motorhoz kapcsolt lineáris generátor egység alkalmas jelölt lehet hibrid elektromos járművek segédteljesítmény egységének [4].

A jelen dolgozat egy HCCI (homogeneously charged compression ignition / homogén töltet – kompresszió gyújtás) szabaddugattyús motorban megfigyelt jelenséget tanulmányoz: az adott terheléshez képest túlzott tüzelőanyagbevitelnél megfigyelt felső holtpont körüli negatív munkaterületet.

## 2. A PROTOTÍPUS HCCI SZABADDUGATTYÚS MOTOR

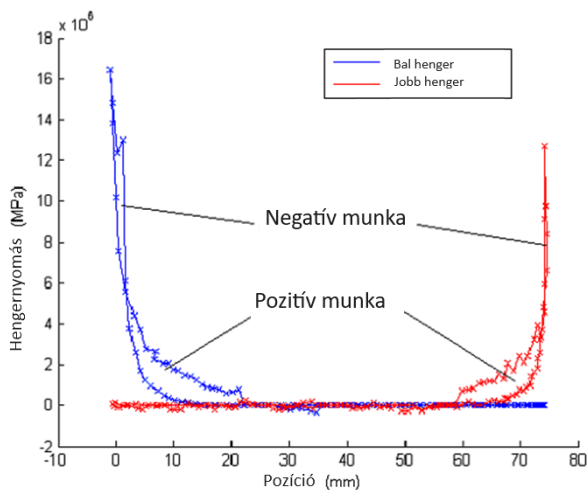
A szabaddugattyús belsőégésű motort bemutatja Tóth-Nagy [4] és beszámol a negatív munkaterület jeleségéről, anélkül, hogy fejtegetné vagy magyarázatot keresne rá. A kéthengeres szabaddugattyús belsőégésű motor elvi elrendezését az 1. ábra mutatja.



1. ábra

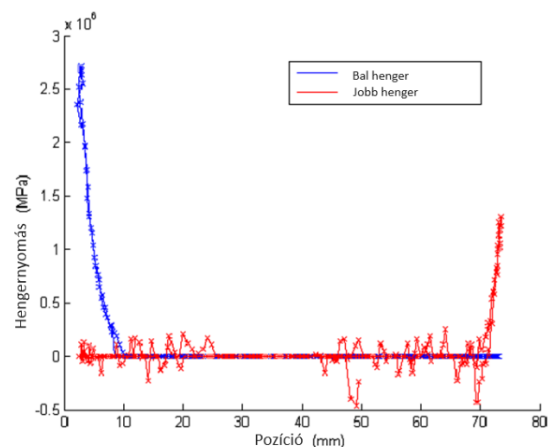
*A prototípus HCCI szabaddugattyús belsőégésű motor elvi elrendezési ábrája [4]*

Ahol lehetett, a motor alkatrészei kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészekből lettek beszerezve. Ilyenek a kétütemű hengerek, hengerfejek, gyújtógyertyák, dugattyúk, dugattyúgyűrűk, és csapszegek, továbbá egy közös nyomócsöves diesel befecskendező rendszer elemei. A gyújtógyertyára a motor indításakor van szükség. A mérő-adatgyűjtő rendszer a kutatás során lett a motorhoz kifejlesztve. A mért mennyiségek között volt a hengernyomás mindkét hengerben és az alternáló tömeg pozíciója. Ezen adatok felhasználásával p-V diagram készült a motor hengereiben lejátszódó jelenségek tanulmányozására. A p-V diagramot mutatja a 2. ábra. Szembetűnő az a hurok, ami a felső holtpont körüli viselkedést írja le. A jelenség első látásra mérési problémának tűnt, ami a nyomás és pozíció adatok időbeni összehangolásával orvosolható, ami meg is történt. Az hengernyomás és pozíció összehangolás utáni adatait mutatja a 3. ábra. Az hengernyomás és pozíció adatok időbeni összehangolása olyan adathalmazon történt, ahol már nem volt égés, egy leállítási során. Egy ilyen leállítást mutat az 5. ábra.



2. ábra

*A szabaddugattyús motor p-V diagramja [4]*



3. ábra

*A szinkronizált p-V értékekből kirajzolt diagram befecskendezés nélküli állapotban (Leállításkor) [4]*

A 2. ábra már olyan adatokat mutat, ahol a hengernyomás és a pozícióadatok időben össze vannak hangolva.

## 3. SZIMULÁCIÓS MODELL

A jelenség vizsgálatára időalapú szimulációs modell készült Matlab programban, ami dinamikai mozgásegyenleteket használ. A modell alapjául szolgáló szabadtest ábrát mutatja a 4. ábra. A dinamikai modell az alternáló tömeg gyorsulását, majd abból a sebességét és pozícióját az erőegyensúlyból számítja:

Gyorsulási erő = Gázerő – Terhelő erő – Súrlódási erő.



4. ábra

A szabaddugattyús motor alternáló tömegének szabadtest ábrája.  
 Gyorsulási erő = Gázerő – Terhelő erő – Súrlódási erő

A gázerőt a hengernyomásból számítja, amit a dugattyúpozíció és a hőfelszabadulás határoz meg (1. egyenlet). A modell a Shoukry [5] által javasolt hőfelszabadulási egyenletet használja (2. egyenlet). A modell a gázerő kiszámításakor számol termodinamikai hővesztésekkel és a dugattyúgyűrű melletti átfúvással is, ez teszi lehetővé a negatív munkaterület hurok megjelenését a p-V diagramon.

1. egyenlet.

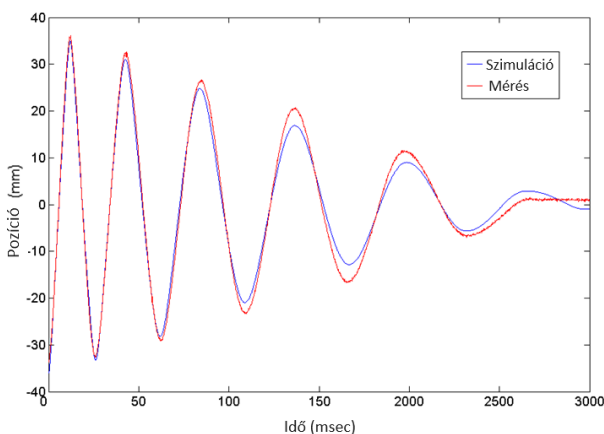
$$\frac{dp}{dt} = -\gamma \frac{p}{V} \frac{dV}{dt} + (\gamma - 1) \frac{1}{V} \frac{dQ}{dt}$$

2. egyenlet

$$\frac{dQ}{dt} = a \frac{Q_p}{t_p} (M_p + 1) \left(\frac{t}{t_p}\right)^{M_p} \exp\left(-a \left(\frac{t}{t_p}\right)^{M_p+1}\right) + a \frac{Q_d}{t_d} (M_d + 1) \left(\frac{t}{t_d}\right)^{M_d} \exp\left(-a \left(\frac{t}{t_d}\right)^{M_d+1}\right)$$

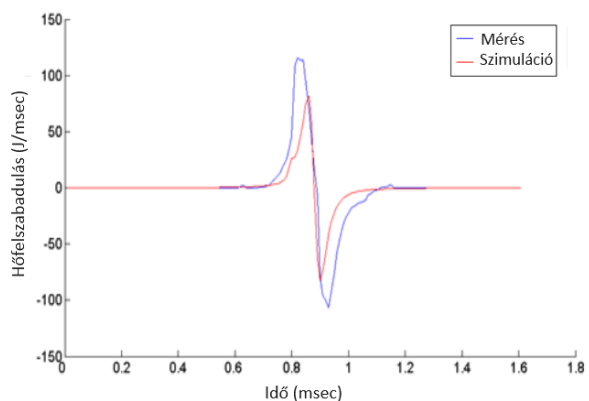
## 4. VALIDÁCIÓ

A szimulációs modell validációja a prototípus szabaddugattyús motoron végrehajtott mérések alapján történt. A 5. ábra a motor alternáló tömeg pozíciójának összehasonlítását mutatja szimulált és mért értékekkel. A 6. ábra a hőfelszabadulás mérésből számított és szimulált értékeit mutatja. A validációk alapján szimulációs modell alkalmasnak bizonyult a p-V diagramon megjelenő negatív munkaterület tanulmányozására.



5. ábra.

A motor alternáló tömegének pozíciója  
 leállítás során

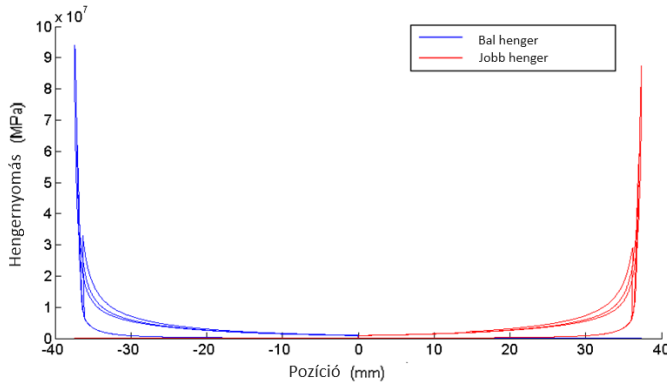


6. ábra.

Hőfelszabadulás, mérésből számított és szimulált

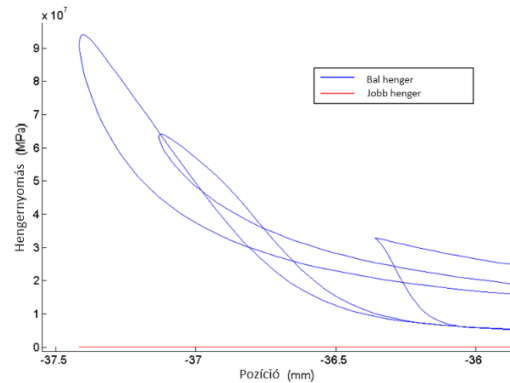
## 5. EREDMÉNYEK

A szimuláció eredményeit a 7. ábra mutatja. A szimulációs eredményekből rajzolt p-V diagramon is megjelenik a felső holtpont körül tapasztalható negatív munkaterület. A 8. ábra ráközelít a kritikus területre, jól mutatja a negatív munkaterületet. A negatív munkaterület növekedése és a felső holtpont eltolódása a növekvő befecskendezett tüzelőanyagmennyiség eredménye. Hasonló hatása van a növekvő átfűvésnek és a növekvő hengerfal felé történő hőleadásnak, valamint a csökkenő terhelésnek ugyanúgy, mint a növekvő sebességű hőleadásnak.



7. ábra

A szimuláció eredménye: Hengernyomás – pozíció



8. ábra

Hengernyomás – pozíció. A negatív munkaterület kinagyítva. Adatok ugyanazok, mint a 7 ábrán

## 6. KÖVETKEZTETÉSEK

A prototípus motorral végzett kísérletek során a p-V diagramon tapasztalt negatív munkaterület bizonyítottan nem tévedés. Szimulációs modell virtuálisan reprodukálta, így bizonyította, hogy a negatív munkaterület valós jelenség. A szimulációs modell megmutatta, hogy a negatív munkaterület nő, ha nő az adott körülmények között befecskendezett tüzelőanyag mennyiség, gyorsul a hőfelszabadulás, nagyobb a hengerfal felé történő hőátadás, vagy nagyobb az átfűvés.

A negatív munkaterület három tényező miatt lett nyilvánvaló: kétütemű hengerek, szabaddugattyús motor, HCCI üzemmód. Egyrészt, a kétütemű motor hengerfala és dugattyúgyűrűi között nagyobb az átfűvés, ami növeli a negatív munkaterületet, ez elősegítette a negatív munkaterület kialakulását és megfigyelését. Másrészt, mivel a motor egy szabaddugattyús motor, a dugattyú nem visszafordul a forgattyús mechanizmus kényszerítő hatására egy meghatározott holtpontra, hiszen nincs forgattyús mechanizmus és nincs kényszerítő hatás, hanem továbbmegy a hengerfejet megközelítve, tovább komprimálva a töltetet. Az egyetlen kényszerítő hatás a hengerben a sűrítés hatására növekvő nyomás, ami légrugóként visszatéríti a dugattyút. Harmadrészt a HCCI üzemmód nagyban segítette a jelenség felerősödésében, ezzel lehetővé téve a megfigyelését. A lassabb, hagyományos égésnek nincs ideje elégni a felső holtpont előtt, mert időben hosszabban elnyúlik, és a hőfelszabadulás és a nyomásnövekedés nagy része már felső holtpont után történik meg, ezzel a pozitív munkaterületet növelve.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-13-9-in-2023-battery-electric-14-6-market-share/#:~:text=Increases>
- [2] Conley, J.; Taylor, S.; Atkinson, C.; Tóth-Nagy, C.; Smith, J.; Waters, R.; and Clay, B.; "Development of a Fourth Generation Hybrid Electric Vehicle at West Virginia University", SAE 2001-01-0682, 2001
- [3] Tóth-Nagy, C.; Clark, N.; "The linear engine in 2004", Society of Automotive Engineers scientific paper, SAE 2005-01-2140, 2005
- [4] Tóth-Nagy, C.; "Application of Linear Engines in Series Hybrid Vehicles", Ph.D. Dissertation at West Virginia University, 2004
- [5] Shoukry, E. F.; "Numerical simulation for parametric study of a two-stroke compression ignition direct injection linear engine" Ph.D. dissertation at West Virginia University, Mechanical and Aerospace Engineering Department, Morgantown, WV, 2003