

ALACSONY HŐMÉRSÉKLETŰ γ -STIRLING-MOTOR TESZTELÉSE

Csernovszky Zoltán – Berzsényi Dániel Gimnázium
Horváth Ákos – ELTE TTK, Atomfizika Tanszék

Mi a Stirling-motor és miért érdekes ma is?

A Stirling-motorok külső hőbevezetésű, égéstermék kibocsátása nélkül működő hőerőgépek. A hőbevezetés megoldható megújuló energiaforrásokkal, környezetbarát módon, például napenergiával vagy melegvízzel.

Hosszú út vezet *Robert Stirling* 1816-os szabadalmától napjaink legismertebb Stirling-motorjáiig, amely a beeső napsugarakat parabolatükörrel irányítja a meleg hőtartályra. Egy ilyen Stirling-motor meleg hőtartálya akár 700 °C (973 K) hőmérsékletű is lehet. A 200 bar nyomáson hidrogénnel vagy héliummal működő motor 25 kW teljesítményre és 40% maximális hatásfokra képes [1, 2]. Ez a Stirling-motor elektromos hálózattól távoli helyen is használható elektromos energia generálására.

Ismerkedés egy γ -Stirling-motorral

Az alábbiakban egy másik típusú, úgynevezett alacsony hőmérsékletű Stirling-motort (LTD, Low Tem-

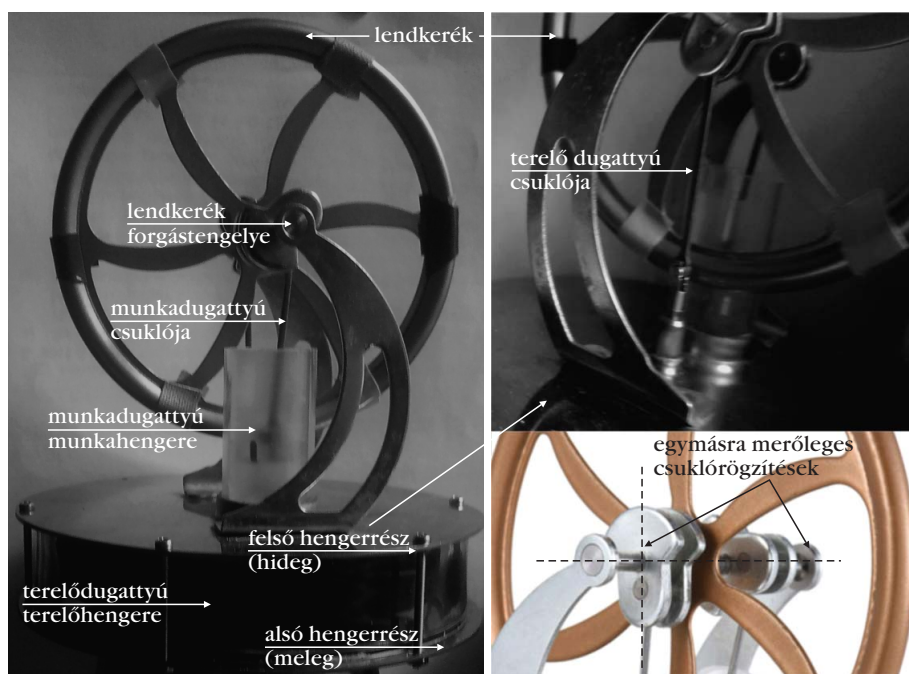
A kutatást a Magyar Tudományos Akadémia Közoktatás-fejlesztési Kutatási Programja (SZKF-7/2022) támogatta.



Csernovszky Zoltán 1990-ben szerzett matematika–fizika tanári diplomát az ELTE-n. 2017 óta a Berzsényi Dániel Gimnázium tanára. *Analógiák a fizikatanításban* című doktori értekezését 2018-ban védte meg. Részt vett az MTA–ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport munkájában. Jelenleg kutatótanárként a Fizikatanítás Digitális Támogatással Kutatócsoport tagja. 2022-ben az MTA Pedagógus Kutatói Pályadíj és az angol Institute of Physics Trusted Peer Reviewer elismerésekben részesült.



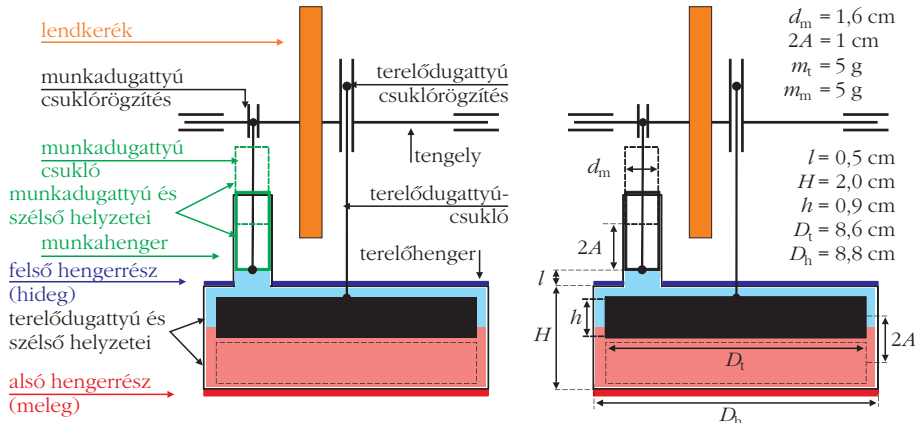
Horváth Ákos 1990-ben szerzett fizikusi diplomát az ELTE-n. Az ELTE Atomfizikai Tanszék egyetemi docense 2003 óta. Kísérleti magfizikával és nukleáris környezetfizikával foglalkozik. Egyetemi és országos szintű tudományos diákköri szervező tevékenységet végez 2003 óta. Az OTDT Fizika–Földtudományok–Matematika Szekció Szakmai Bizottságának elnöke. Többek között elnyerte az ELFT Jánossy Lajos Díját (2003), az OTDT Mestertanár Aranyérmét (2009) és a Prométheusz-érmét (2019).



1. ábra. A vizsgált alacsony hőmérsékletű LTD γ -Stirling-motor és főbb részei.

perature Differential) fogunk tesztelni, amely levegőt használ munkagázként. Az, hogy a motor alacsony hőmérsékletűt azt jelzi, hogy a terelőhenger két vége között kicsi a hőmérséklet-különbség (1. ábra). Ez a viszonylag olcsó, könnyű és halk hőerőgép már egy bögre forró vízre helyezve egy teljes órán át megforogat egy kisebb lendkereket, feldobja a fizikaórát, szórakoztatja az otthoniakat [3].

A *Physics Education* folyóirat Open Access ingyenes cikkében bemutatott, a kereskedelmi forgalomban kapható γ -Stirling-motor vizsgálatát végeztük el [4].



2. ábra. A vizsgált alacsony hőmérsékletű LTD γ -Stirling-motor főbb részei és méretei az előnézeti vázlaton.

Esetünkben a felső hengerrész hőmérséklete 13–29 °C, az alsóé 42–81 °C között változott a tesztelesek során, a hőmérséklet-különbség maximális értéke 68 °C, a minimálisé 12 °C volt.

A motor elnevezésében a γ arra a mérnöki konfiguráció utal, hogy mindkét dugattyúcsukló ugyanahhoz a tengelyhez csatlakozik, a csuklórögzítések egymással 90°-ot zárnak be és ugyanerre a vízszintes

tengelyre erősített a lendkerék is. Célunk egyrészt az LTD γ -Stirling-motor felépítésének és működésének megismerése, másrészt a lendkerék forgási frekvenciája és a hengerrészek hőmérsékletkülönbsége közötti kapcsolat feltárása és elemzése volt (1. és 2. ábra).

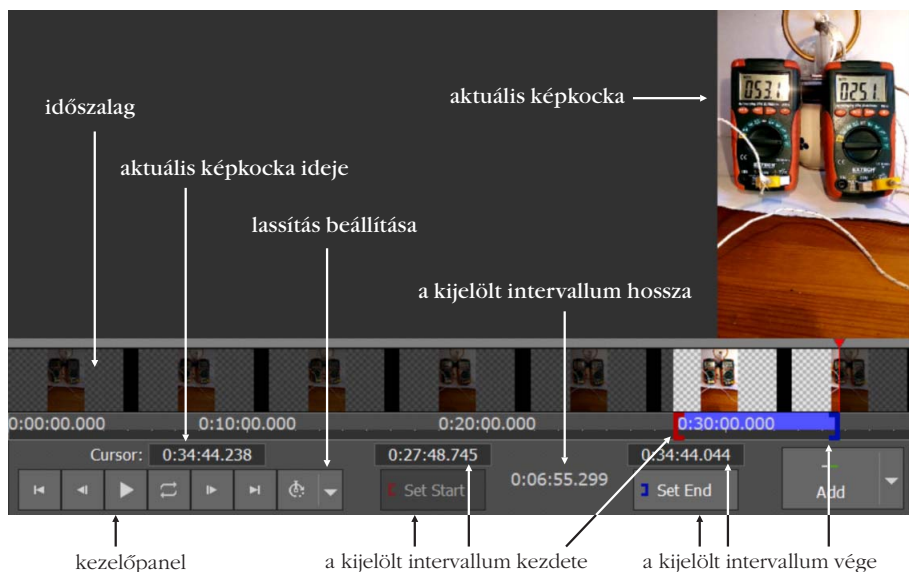
A 2. ábráról a bemutatott LTD γ -Stirling-motor több jellemzője is leolvasható. Szembeötlő, hogy a terelődugattyú átmérője lényegesen nagyobb a munkadugattyú átmérőjénél, annak 5,375-szorososa. Ez és a csuklók geometriai elrendezése eredményezi, hogy a terelődugattyú a munkadugattyúénál jóval nagyobb térfogatot jár be egy ciklus alatt.

A terelődugattyú szerepe a munkagáz „terelése” az alsó meleg és a felső hideg hengerrészek között, a dugattyúmozgásnak megfelelően. A levegővel érintkező mindkét felülete nagy, fekete színű, jó hőszigetelő anyagból készült. Méréseinkben a lendkerék maximális frekvenciája 5,5 s⁻¹ volt, ez a forgás a többi típusú Stirling-motor mozgásához képest lassú. A munkadugattyú légmentesen zárta a munkahengert, kvázi-sűrűlódásmentesen mozgott abban.

3. ábra. A vizsgált LTD γ -Stirling-motor működés közben, szétszerelt állapotban és előkészítve.



4. ábra. A VideoPad Video Editor szoftver kezelőfelületének részlete és használt funkciói.



Mérési elrendezés, mért és számított mennyiségek

A motor alsó hengerrészét egy forró vizet tartalmazó edényre helyeztük, a felső hengerrészt jéggel hűtöttük. A jeget – a stabil működés érdekében – egy lezárt zacskóban helyeztük a felső hengerrészre (3. ábra). A kísérlet során a hengerrészek hőmérsékletét ± 1 °C pontosságú Extech Min16A digitális multiméterekkel mértük. Az így üzemeltetett LTD γ -Stirling-motor 60-80 percig működött.

A lendkerék forgási frekvenciájának meghatározásához a 30 képkocka/másodperces videóra vett mozgást VideoPad Video Editor szoftverrel az ere-

deti érték tizedére lassítottuk. A szoftver demonstrációs verziója ingyen letölthető, leírása a Wikipédián elérhető [5]. A hengerrészek hőmérsékletei képkockánként visszanezhetők, a hőmérséklet-különbség meghatározható: $\Delta T = T_{\text{meleg}} - T_{\text{hideg}}$.

A frekvencia meghatározásához egy olyan időintervallumot jelölünk ki, amikor nem változik a hengerrészek hőmérséklete. Ezután törekedtünk – a kijelölt intervallumon belül – a lehető legtöbb, n egész számú vagy ahhoz közeli kerékfordulat-időtartam képkocka-pontosságú meghatározására. Ezen intervallum végpontjai t_1 , t_2 és a fordulatok időtartama $\Delta t = t_2 - t_1$ volt (4. ábra). A ΔT hőmérséklet-különbséghez tartozó kerékfrekvencia így már (1) szerint meghatározható.

$$f = \frac{n}{\Delta t} = \frac{\text{fordulatok száma}}{\text{fordulatok időtartama}}. \quad (1)$$

Így egy összetartozó, elemzésre kész

$$\left(\Delta T; t_1; t_1 + \frac{\Delta t}{2}; f \right) \quad (2)$$

adatnégyeshez jutunk. Egy mérésorozatban a működés elemzéséhez 100-130 adatnégyest vettünk fel videofelvétel alapján. Ezek eloszlása időben nem egyenletes, az adatnégyesek felvételének sűrűsége a motor működéséhez igazodott.

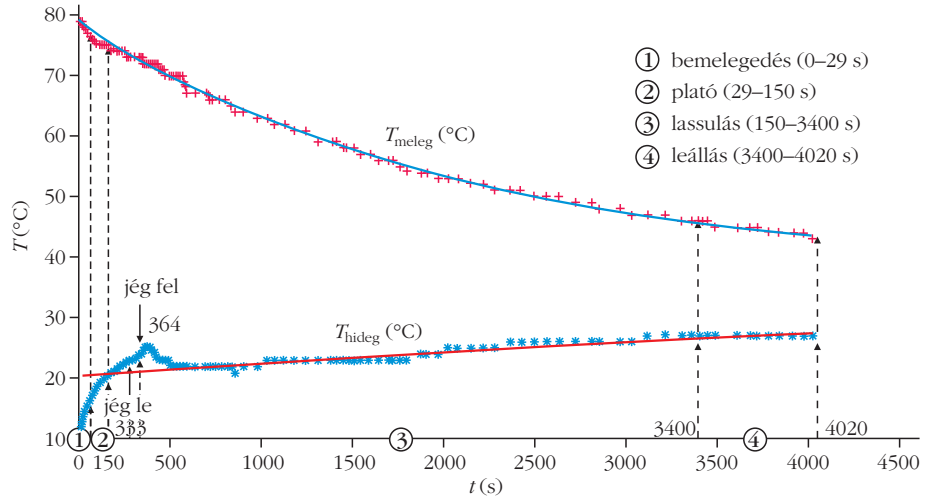
Az LTD γ -Stirling-motor hengerrészeinek hőmérséklete

Az elvégzett esetelemzések közül egy tipikusnak mondhatót mutatunk be az alábbiakban. A választott esetben a motor felső és alsó hengerrészeinek hőmérsékletét az idő függvényében az 5. ábra mutatja: $T_{\text{hideg}}(t)$ és $T_{\text{meleg}}(t)$. A pontok koordinátái a diagramokon:

$$\left(t_1 + \frac{\Delta t}{2}; T \right).$$

Az 5. ábrán feltüntettük a működés négy szakaszát: a bemelegedést, a platót, a lassulást és a leállást. A szakaszolásról bővebben a működési frekvencia elemzésénél lesz szó.

Az ábrán megjelöltük azokat az időpontokat is amikor a felső hengerrészről levettük, majd visszatet-



5. ábra. A vizsgált γ -Stirling-motor működésének szakaszai, a hengerrészek hőmérséklete az idő függvényében és a mérési értékekre illesztett $T_{\text{hideg}}(t)$, $T_{\text{meleg}}(t)$ exponenciális függvények.

tük a jeget. Ezzel az $f(\Delta T)$ frekvencia hőmérséklet-különbség függvény alaposabb vizsgálatára lesz majd lehetőség.

Az alsó, meleg hengerrész hőmérséklet-idő mérési adataira csökkenő exponenciális függvényt illesztettünk, amelynek egyenlete:

$$T_{\text{meleg}}(t) = 41,21 \cdot e^{-0,000456 \cdot t} + 37.$$

A jég levétele és visszarakása utáni szakaszon, körülbelül 700 másodperccel a motor indulása után a felső, hideg hengerrész hőmérséklet-idő mérési adataira a

$$T_{\text{hideg}}(t) = -16,56 \cdot e^{-0,000139 \cdot t} + 37$$

egyenletű exponenciális függvényt illesztettük. A hengerrész-hőmérsékletek csökkenésének, illetve emelkedésének a motor leállása vetett véget.

A termodinamika 2. főtétele értelmében a $T_{\text{hideg}}(t)$, $T_{\text{meleg}}(t)$ hőmérsékletek hosszú távon közös, az egyensúlyi hőmérséklet felé tartanak. A mérési eredményekre illesztett függvények határértéke

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} T_2(t) = 37 \text{ } ^\circ\text{C},$$

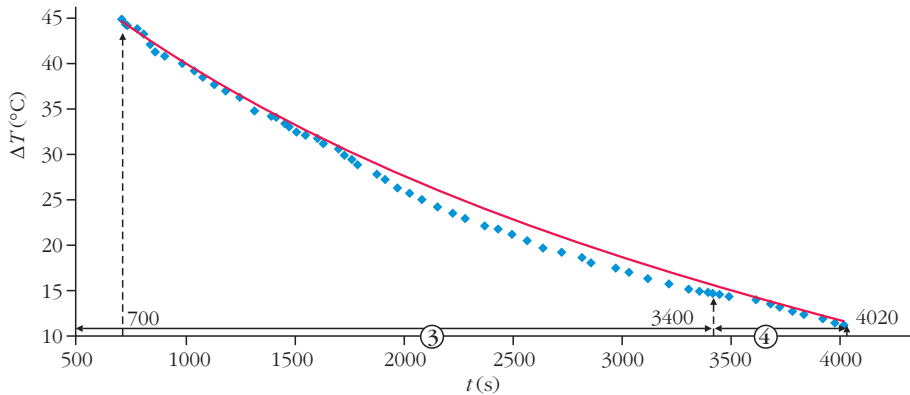
amivel a rendszer egyensúlyi hőmérséklete $37 \text{ } ^\circ\text{C}$ (5. ábra).

A 6. ábra a jég visszatétele utáni működési szakasz hőmérséklet-különbség függvényét mutatja a működés megkezdése utáni 700 másodperctől. A pontok koordinátái: $(t_1 + \Delta t/2; \Delta T)$.

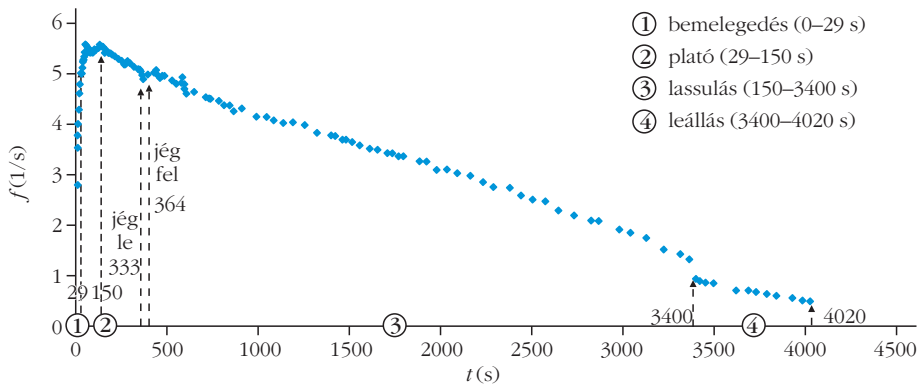
Eredményeink szerint a $\Delta T(t)$ függvény is szigorúan monoton csökken, exponenciális függvényt illesztve a mérési eredményekre kapjuk, hogy

$$\Delta T(t) = 54,73 \cdot e^{-0,0004 \cdot t},$$

valamint $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta T(t) = 0$.



6. ábra. A vizsgált γ -Stirling motor hengerrészeinek hőmérséklet-különbsége az idő függvényében $t \in [700 \text{ s}; 4000 \text{ s}]$.



7. ábra. A vizsgált LTD γ -Stirling-motor működésének szakaszai és forgási frekvenciája az idő függvényében.

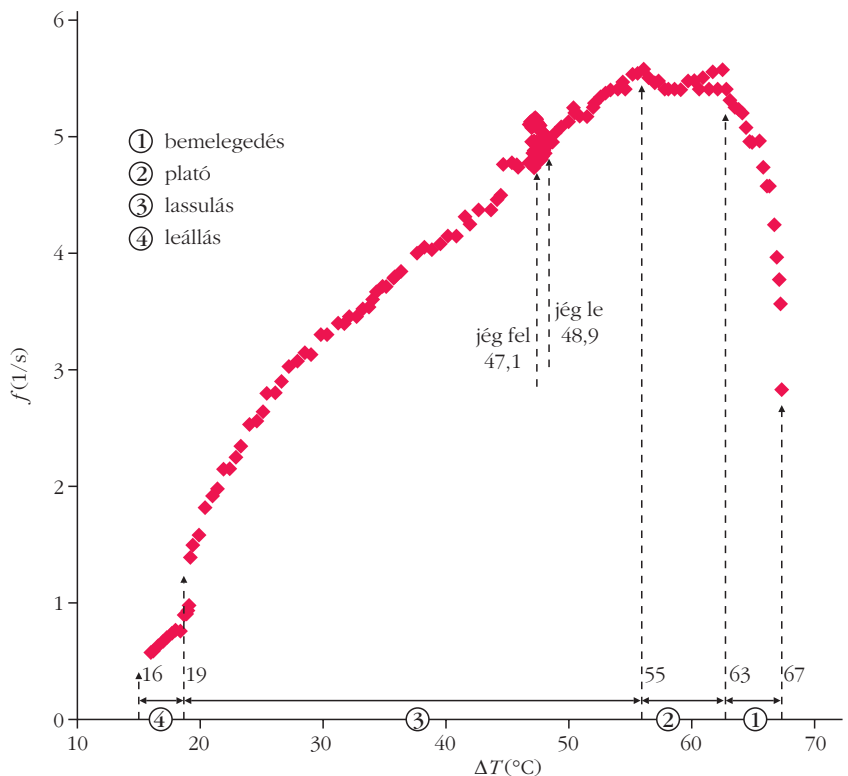
Az LTD γ -Stirling-motor működési frekvenciájának vizsgálata

Először a kerék frekvenciájának időbeli változását vizsgáltuk. A 7. ábra vízszintes tengelyén a motor indításától eltelt idő, a függőlegesen a kerék frekvenciája látható. A pontok koordinátái: $(t_1 + \Delta t/2; f)$.

A grafiknról leolvashatjuk, hogy a motor indulása után a kerék frekvenciája gyorsan (29 s) felszökik egy maximális működési frekvenciára, amelyen rövid ideig működik (29–150 s), majd egyenletesen csökken igen hosszú ideig (150–3400 s), végül a leállási szakaszban szintén egyenletesen, de lassabban csökken a kerék forgási frekvenciája (3400–4020 s).

A fentebb említett szakaszolás jogosságát a 8. ábra is alátámasztja, amelynek függőleges tengelyén a motor lendkerékének f frekvenciáját, a vízszintesen a felső és alsó

8. ábra. A vizsgált LTD γ -Stirling-motor frekvenciája a hengerrészek hőmérséklet-különbségének függvényében.

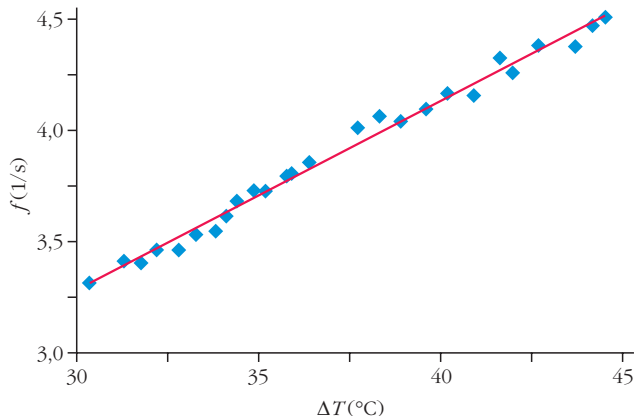
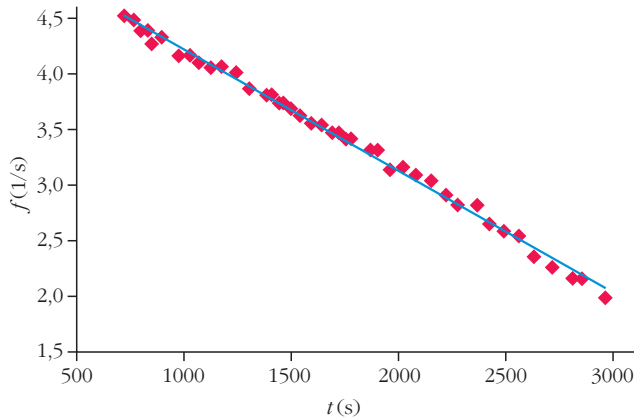


hengerrész ΔT hőmérséklet-különbséget ábrázoltuk. A 8. ábrán az időrendi sorrend jobbról balra található.

Tanórai feldolgozásra a 3. szakasz egy részlete, például a 30–45 °C hőmérséklet-különbség, a motor indulása utáni 700–3000 másodpercig tartó intervallum javasolt (9. ábra). Ezen a szakaszon a függvénykapcsolatok lineárisan jól közelíthetők, az illesztett egyenesek egyenletei: $f(t) = -0,0011 \cdot t + 5,2982$ és $f(\Delta T) = 0,0085 \cdot \Delta T + 0,731$.

Frontális feldolgozáshoz előzetes videofelvétel készítése és a vizsgálandó idő- és hőmérsékletkülönbség-intervallumok kitűzése ajánlható, ugyanis a mérési adatokra, például a $\Delta T \in [19,3 \text{ °C}; 38,9 \text{ °C}]$ intervallumon, hatványfüggvény illesztése a lineárisnál jobb egyezést mutat (10. ábra).

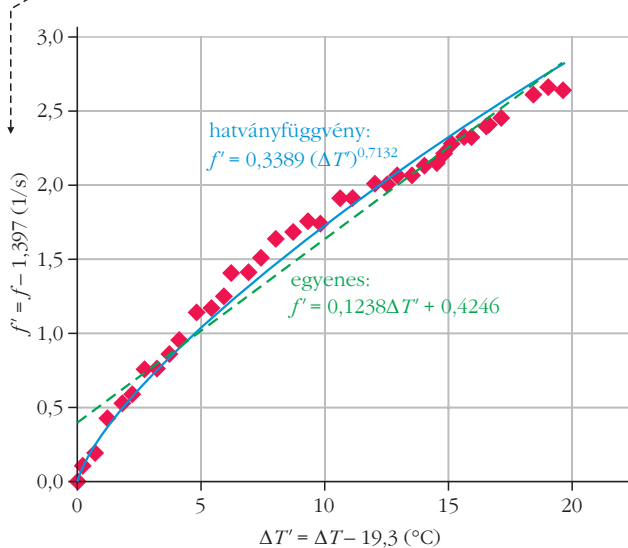
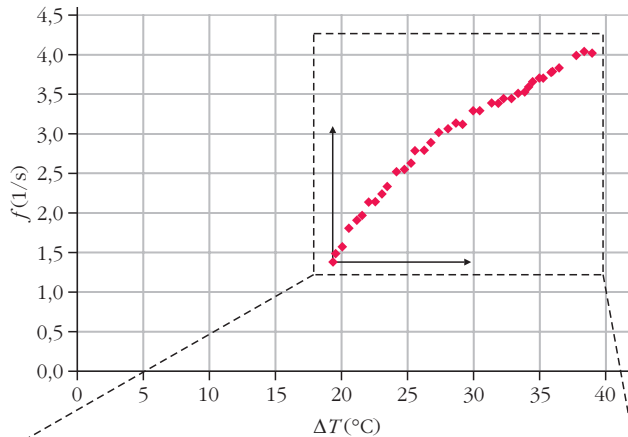
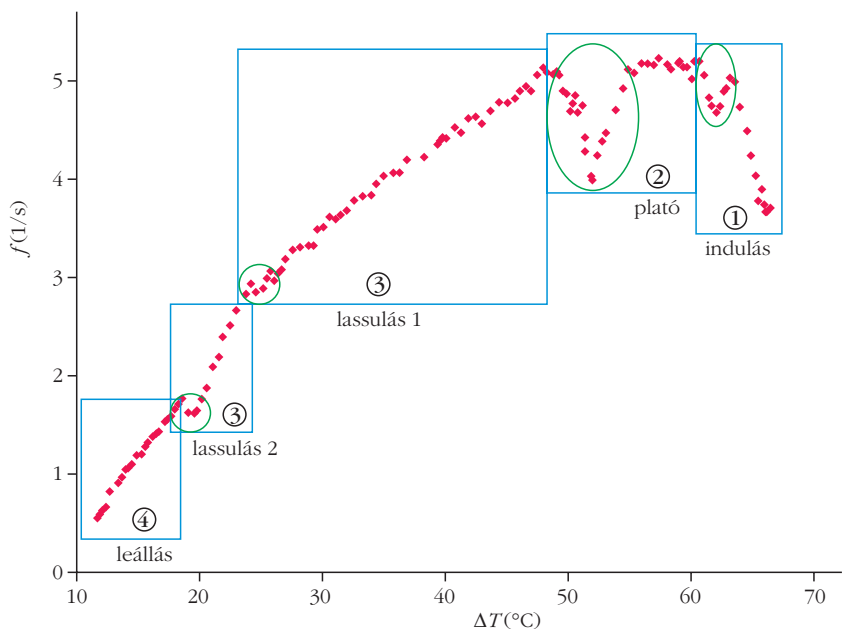
A motor forgási frekvenciájának ugrásszerű lassulását $\Delta T = 19 \text{ °C}$ -nál a forgásten-



9. ábra. A vizsgált LTD γ Stirling-motor feldolgozásra ajánlott, lineárisan jól közelíthető intervalluma a 3. szakaszon.

gely megszorulása okozhatta. Minél többet használtuk a motort, a tengely megszorulását annál többször tapasztaltuk egy mérésorozaton belül. A 11. ábra egy ilyen, 2. sorozatnak nevezett mérés $f(\Delta T)$ diagramját mutatja.

11. ábra. A frekvenciasökkenések a 2. sorozat $f(\Delta T)$ diagramján (bekarikázott tartományok).

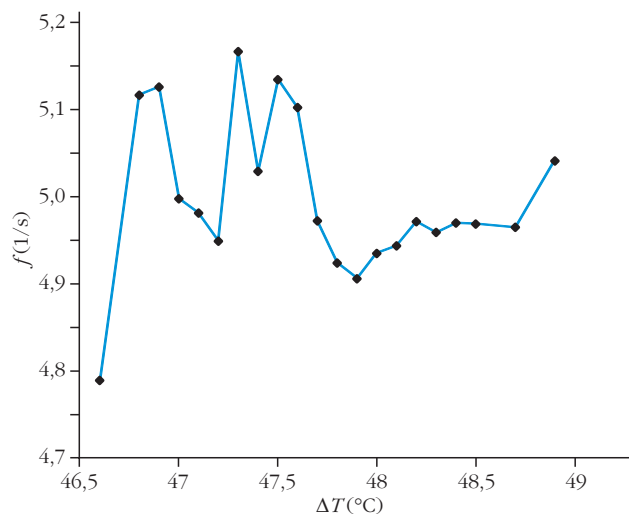
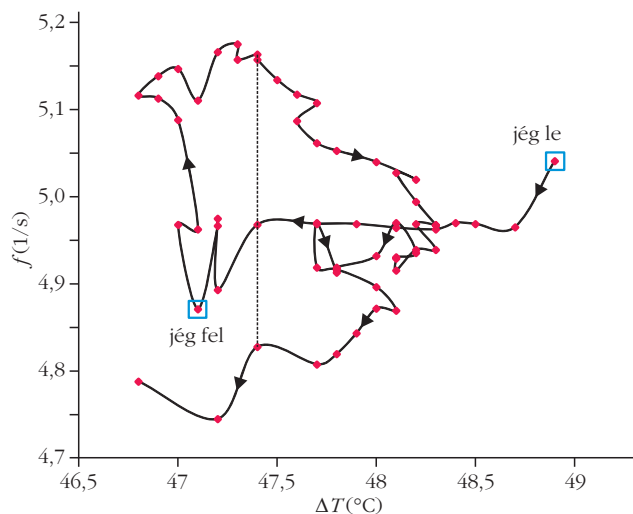


10. ábra. Egyenes és hatványfüggvény illesztése a mérési adatokra $\Delta T \in [19,3 \text{ } ^\circ\text{C}; 38,9 \text{ } ^\circ\text{C}]$ esetén.

A hengerrészek hőmérséklet-különbsége egyértelműen meghatározza-e a forgási frekvenciát?

Azzal, hogy a jeget levettük a felső hengerrészről, majd visszatettük rá ugyanazt a hőmérséklet-különbséget többször is előidézttük a mérésorozaton belül. A 12. ábra bal panelje az $f(\Delta T)$ függvényrészletét mutatja, a mérési pontokat összekötő görbén az időbeliség irányát nyilakkal jelöltük. Például a $\Delta T = 47,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ hőmérséklet-különbséget a rendszer négy-szer is felveszi a kísérletben. Ezeket a frekvenciaértékeket függőleges szaggatott szakasz köti össze a 12. ábra bal paneljén.

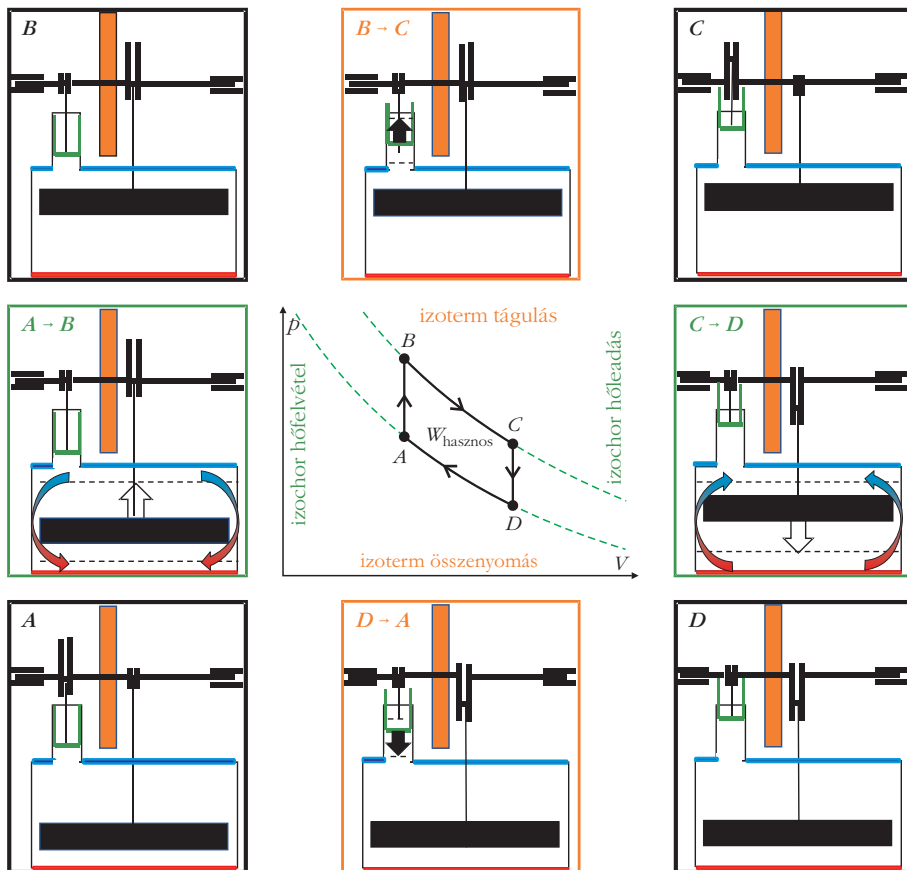
A 12. ábra jobb paneljén az azonos hőmérséklet-különbségtételekhez tartozó frekvenciák átlagait tün-



12. ábra. Bal panel: a vizsgált LTD γ -Stirling-motor frekvenciája hengerrészek hőmérséklet-különbségének függvényében a jég levétele és visszatevése közötti és utáni időszakban. A nyilak az időbeliség irányát jelzik. Jobb panel: a bal panel értékeivel számolt átlagfrekvenciák a hőmérséklet-különbség függvényében.

tették fel. Ezeket az értékeket használtuk fel az 5., a 6., a 7., a 8. és a 9. ábrák készítésénél. Méréseink szerint a vizsgált LTD γ -Stirling-motor „emlékezik” a működés előzményeire. A kerék forgási frekvenciája attól is függ, hogy a motor milyen előzetes állapotból érkezik a vizsgált hőmérséklet-különbségű állapotba. Ezt fejezi ki a 12. ábra bal paneljén látható hurok, a hiszterézis.

13. ábra. Stirling-ciklus a pV állapotsíkon és a vizsgált LTD γ -Stirling-motor előnézeti rajzai az A , B , C , D állapotokban és az $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow D$, $D \rightarrow A$ folyamatok során. A nyilak a dugattyúk és a munkagáz mozgásirányait jelölik.



A Stirling-ciklus

A Stirling-motor idealizált körfolyamata a Stirling-ciklus, amely a munkagáz két izoterm és két izochor állapotváltozásából áll. A vizsgált LTD γ -Stirling-motor működése ennél összetettebb, mégis a pV állapotsíkon ábrázolt Stirling-ciklus sokat segíthet a motor működésének

követésében, energetikai vizsgálatában. A ciklus négy állapotában a vizsgált γ -Stirling-motor dugattyúhelyzeteit és a speciális állapotváltozásokat a 13. ábra mutatja.

A Stirling-ciklus A állapotában mindkét dugattyú az alsó szélső helyzetben van. Az $A \rightarrow B$ izochor hőfelvétel során a terelődugattyú a felső szélső helyzetbe megy, a meleg és hideg levegő aránya megnő. A folyamat során munkavégzés nem történik, a gáz belső energiája megnő.

A B állapotban a terelődugattyú a felső, a munkadugattyú az alsó szélső helyzetben van. A $B \rightarrow C$ izoterm tágulás során a munkadugattyú a felső szélső helyzetbe kerül, a kitáguló munkagáz a környezetben munkát végez. A folyamat során hőfelvétel történik, a gáz belső energiája nem változik.

A C állapotban mindkét dugattyú a felső szélső helyzetben van. A $C \rightarrow D$ izochor hőleadás során a terelődugattyú

a felső szélső helyzetből az alsóba kerül, ezzel a meleg és a hideg levegő aránya lecsökken. Munkavégzés nem történik, a gáz belső energiája csökken a folyamat során.

A D állapotban a terelődugattyú az alsó, a munkadugattyú a felső szélső helyzetben van. A $D \rightarrow A$ izoterm összenyomás során a környezet munkát végez a gázon, a munkadugattyút az alsó szélső helyzetbe juttatja. A folyamat során a gáz hőt ad le a környezetnek, belső energiája nem változik. A ciklus ismétlődik.

A Stirling-ciklus elemzését a (3) termodinamika 1. főtételével az 1. táblázat mutatja. Itt ΔU a belsőenergia-változás, Q a hőmennyiség, W a munkavégzés, n a mólszám, R az egyetemes gázállandó, f a szabadsági fokok száma. Felhasználtuk az ideális gázok állapotegyenletét:

$$pV = nRT, \quad (4)$$

valamint

$$W_{BC} = - \int_{V_B}^{V_C} p dV = -nRT_{\text{meleg}} \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right) \text{ és} \quad (5)$$

$$W_{DA} = \int_{V_A}^{V_D} p dV = nRT_{\text{hideg}} \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right).$$

A vizsgált LTD g - γ -Stirling-motor dugattyúmozgásainak követését adja meg a 14. ábra. Itt a függőleges

1. táblázat				
A 13. ábra Stirling-ciklusának speciális állapotváltozásai a termodinamika 1. főtétele szerint				
$\Delta U = Q + W$ (3)		ΔU	Q	W
$A \rightarrow B$	izochor hőfelvétel	$+\frac{f}{2} nR\Delta T$	$+\frac{f}{2} nR\Delta T$	0
$B \rightarrow C$	izoterm tágulás	0	$+nRT_{\text{meleg}} \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$	$-nRT_{\text{meleg}} \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$
$C \rightarrow D$	izochor hőleadás	$-\frac{f}{2} nR\Delta T$	$-\frac{f}{2} nR\Delta T$	0
$D \rightarrow A$	izoterm összenyomás	0	$-nRT_{\text{hideg}} \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)$	$+nRT_{\text{hideg}} \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)$

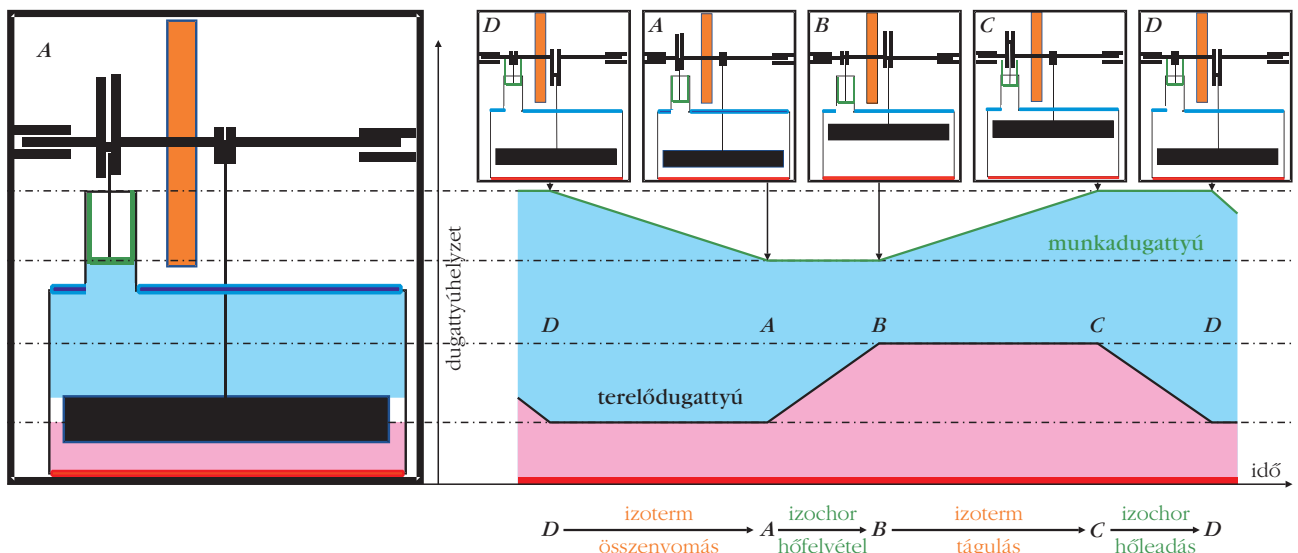
tengely a munkadugattyú és a terelődugattyú terelőhenger aljától mért távolságát, a vízszintes tengely az eltelt időt mutatja. Az ábrán érzékeltettük, hogy az izoterm folyamatok hosszabb ideig tartanak, mint az izochor folyamatok. A működés során a folyamatok hossza, azok időtartamának aránya is változni fog ΔT értékétől függően. Feltüntettük az A, B, C és D állapotokban a vizsgált LTD γ -Stirling-motor vázlatos rajzát és a speciális állapotváltozások elnevezését.

A Stirling-ciklus hatásfoka

Egy hőerőgépet a termodinamikai hatásfoka jellemez, amely a felvett és a leadott hőmennyiséggel, illetve az egy ciklus során nyerhető hasznos munkával kifejezve:

$$\eta = \frac{Q_{\text{fel}} - Q_{\text{le}}}{Q_{\text{fel}}} = \frac{W_{\text{h}}}{Q_{\text{fel}}}. \quad (6)$$

14. ábra. A vizsgált LTD γ -Stirling-motor dugattyúinak helyzete az idő függvényében. Lásd még a 13. ábrát.



A Stirling-ciklus termodinamikai hatásfokát is meghatározhatjuk, ha figyelembe vesszük, hogy:

$$W_h = \int_{V_B}^{V_C} p dV - \int_{V_A}^{V_D} p dV =$$

$$= nR(T_{\text{meleg}} - T_{\text{hideg}}) \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right) = nR\Delta T \ln v. \quad (7)$$

Itt V_{max} , V_{min} a maximális és a minimális gáztérfogat a ciklus során, $v = V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$. Ezzel:

$$\eta_{\text{Stirling}} = \frac{\Delta T \ln v}{\frac{f}{2} \Delta T + T_{\text{meleg}} \ln v}. \quad (8)$$

A Stirling-ciklusnak inkább didaktikai, mint gyakorlati jelentősége van a Stirling-motorok leírásában. A nehézséget a működés során változó mólszámú és különböző hőmérsékletű térrészek követése jelenti. A termodinamikai leírás történhet egyszerűsítő modellek alkalmazásával, vagy a kinetikai gázmodellt használó molekuladinamikai szimulációval [6–8]. Ezekkel a későbbiekben foglalkozunk.

Összegzés

A cikk a Berzsenyi Dániel Gimnázium fizikatáborára készült LTD γ -Stirling-motor-projekt alapján egy működő hőerőgéppel szemlélteti egyrészt a termodinamika 2. főtétele (hőmérsékletek kiegyenlítését), másrészt videoelemzéssel nyomon követi a motor kerékének forgási frekvenciáját az idő és a hengerrészek hőmérséklet-különbségének függvényében.

A mérési eredmények alapján tanórai feldolgozásra a frekvencia-idő függvény jól linearizálható lassulási szakasza ajánlott. Mérési feladatként, szakköri feldolgozásra a frekvencia hőmérséklet-különbség diagram felvétele és annak elemzése javasolt. A motor működésének elemzéséhez és a vizsgálati intervallum kijelöléséhez érdemes előzetesen rögzített videofelvételt használni.

A Stirling-ciklus pV állapotsíkbeli ábrázolásával nemcsak a hasznos munka szemléltetésére és a termodinamikai hatásfok fogalmának bevezetésére nyílik lehetőség, hanem izochor és izoterm állapotváltozások részletes elemzésére is az 1. főtétel alkalmazásával. Ez az elemzés Stirling-motorok vizsgálatának, modellezésének, tervezésének, működésük szimulációjának lehet az alapja.

Irodalom

1. Banha Kongtragool, Somchai Wongwises: *A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines*. Volume 7/2, April 2003, 131–154, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/author/7003383482/somchai-wongwises>
2. Low Temperature Stirling Engine Motor Model Heat Steam Education Toy Diy Kit. https://www.fruugo.hu/low-temperature-stirling-engine-motor-model-heat-steam-education-toy-diy-kit/p-93699197-196513372?language=en&ac=KelkooCSS&asc=pmax&gclid=CjwKCAjw6raYBhB7EiwABge5KmpF6ILYKXpKZW4Vmg6oMN2gUiDyq_OvugLp6tEK0zluYp2FYIYAZxoCqpUQAvD_BwE
3. M. H. Briggs: *Improving Free-Piston Stirling Engine Power Density*. 2016, NASA Glenn Research Center
4. W. Yeadon, M. Quinn: Thermodynamics education for energy transformation: a Stirling Engine experiment. *Phys. Educ.* 56 (2021) 055033.
5. Wikipedia: VideoPad Video Editor, https://en.wikipedia.org/wiki/VideoPad_Video_Editor
6. Simon Dávid Szabolcs: *Stirling-motor modellezése*. ELTE TTK OTDK dolgozat (2014) <https://atomfizika.elte.hu/akos/tezisek/tdk/stirling.pdf>
7. Török Mátyás: *Alfa-Stirling-motor molekuladinamikai modellezése*. OTDK FiFöMa, Középiskolai Szekció, 2021.
8. Zheng Cheng Dávid: *Béta-Stirling-motor modellezése Unityvel*. OTDK FiFöMa, Középiskolai Szekció, 2021.