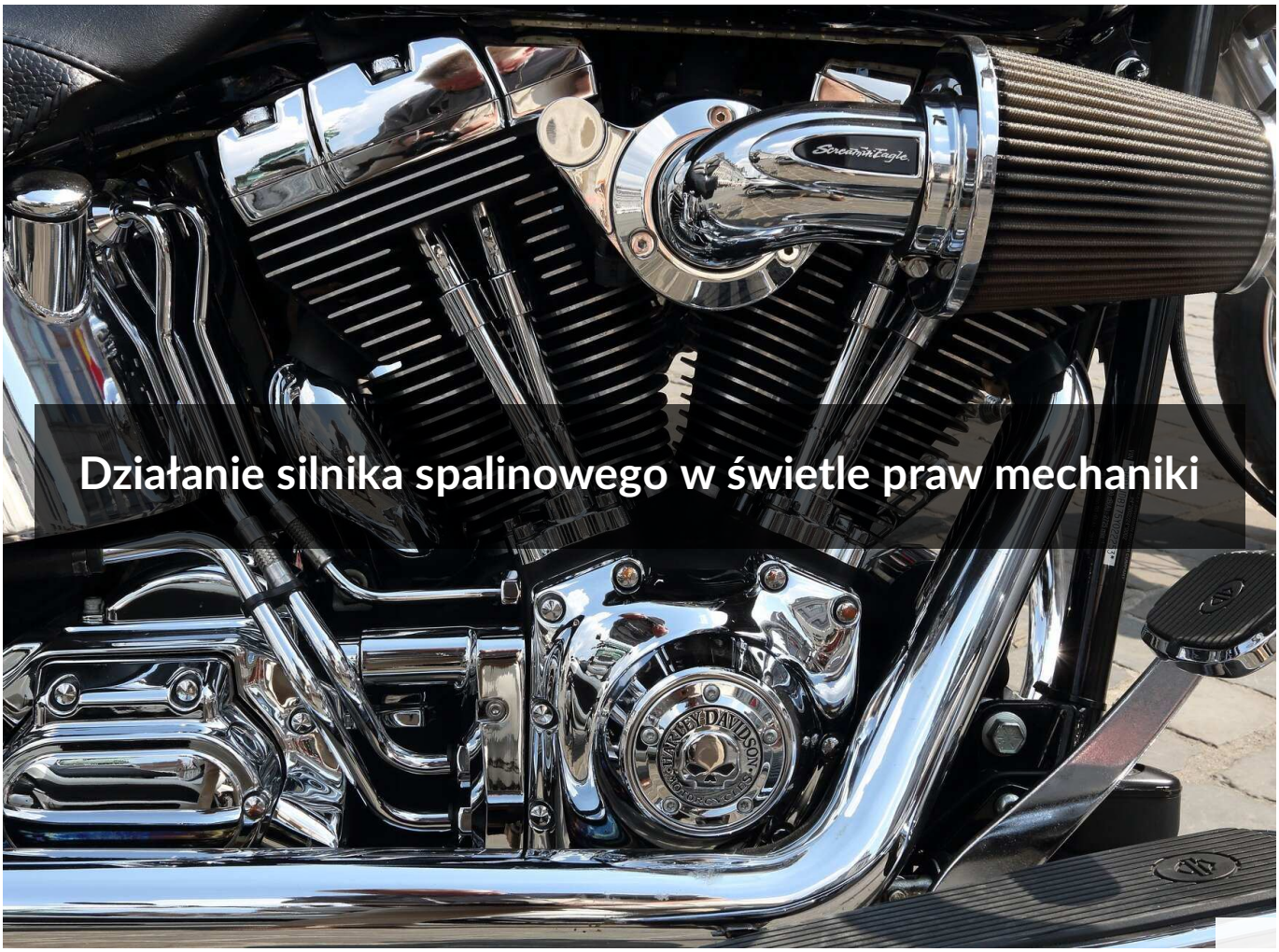


Działanie silnika spalinowego w świetle praw mechaniki

- Wprowadzenie
- Przeczytaj
- Symulacja interaktywna
- Sprawdź się
- Dla nauczyciela



Czy to nie ciekawe?

Silniki spalinowe spotykamy w wielu pojazdach: samochodach, motorach, kosiarkach, piłach spalinowych, samolotach... Działanie silnika omawiane jest zazwyczaj w kontekście termodynamiki, czyli przemian gazowych, jakie zachodzą w komorze spalania sinika. Ale jak działa silnik z punktu widzenia mechaniki bryły sztywnej?



Rys. a. Samochód osobowy z widocznym silnikiem

Twoje cele

W tym materiale:

- poznasz elementy budowy silnika spalinowego,
- dowiesz się, czym jest ruch tłoczno-zwrotny,
- zrozumiesz, czym jest moment obrotowy silnika,
- zbadasz w symulacji działanie wału korbowego.

Przeczytaj

Warto przeczytać

Najważniejszą częścią silnika spalinowego jest jego komora spalania. Jest to przestrzeń, w której dochodzi kolejno do:

- wtrysku paliwa (ssanie),
- sprężenia gazu w komorze poprzez ruch tłoka pionowo do góry (sprężanie),
- wywołania iskry przez świecę zapłonową, co powoduje eksplozję i odepchnięcie tłoka pionowo w dół (praca),
- po odepchnięciu tłoka spaliny są usuwane i cykl pracy się zamyka (wydech).

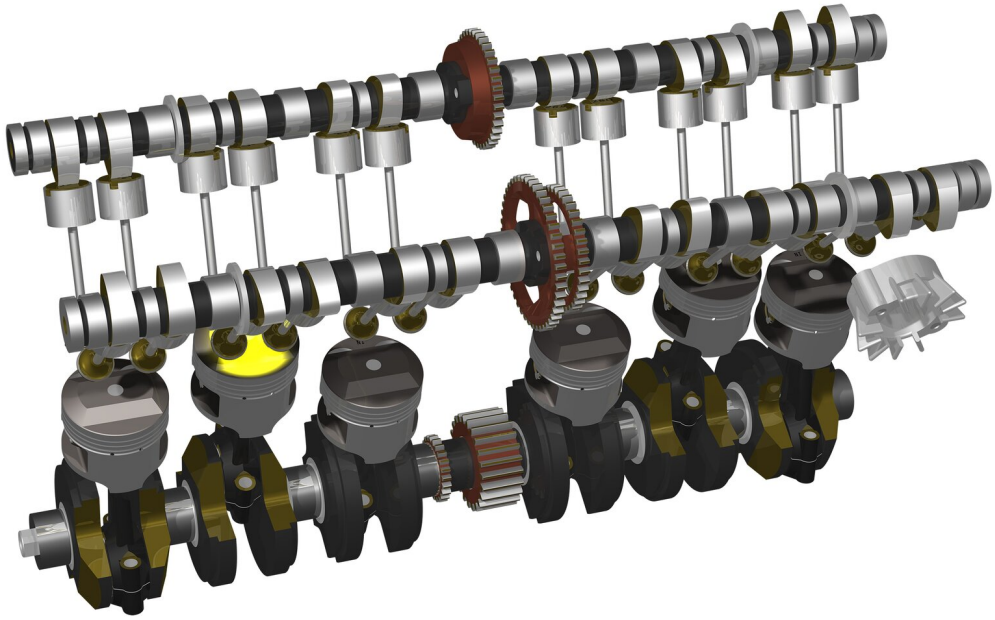
Uwolniona w procesie spalania paliwa energia zamieniana jest na energię kinetyczną pojazdu. Aby zrozumieć, w jaki sposób następuje ta przemiana, musimy przyjrzeć się konstrukcji silnika i układu napędowego. Zacznijmy od przyjrzenia się elementom budowy układu napędowego na Rys. 1.



Rys. 1. Elementy układu napędowego: tłok, tłok z korbowodem, wał korbowy.
Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Piston_2.jpg [dostęp 7.04.2022 r.], dostępny w internecie: https://www.freepik.com/free-vector/realistic-pistons-isolated-white-background-engine-equipment-car-motorbike_3586231.htm [dostęp 7.04.2022 r.], dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crankshaftrendering.png [dostęp 7.04.2022 r.], licencja: CC BY 2.0.

Element po lewej stronie to wspomniany wcześniej tłok. Jest to element, który jest ruchomą częścią komory spalania. Na etapie sprężania porusza się on do góry, a w etapie pracy porusza się do dołu. Wykonuje on zatem tak zwany ruch posuwisto-zwrotny, czyli ruch, w którym ciało porusza się ruchem prostoliniowym w jednym kierunku, ale zmieniając okresowo zwrot. W jaki sposób to możliwe? Przyjrzyjmy się środkowej części Rys. 1. – widoczny jest tu tłok z korbowodem. Korbowód to element łączący tłok z widocznym po prawej stronie wałem korbowym. Przez otwór w tłoku przechodzi trzpień, na którym

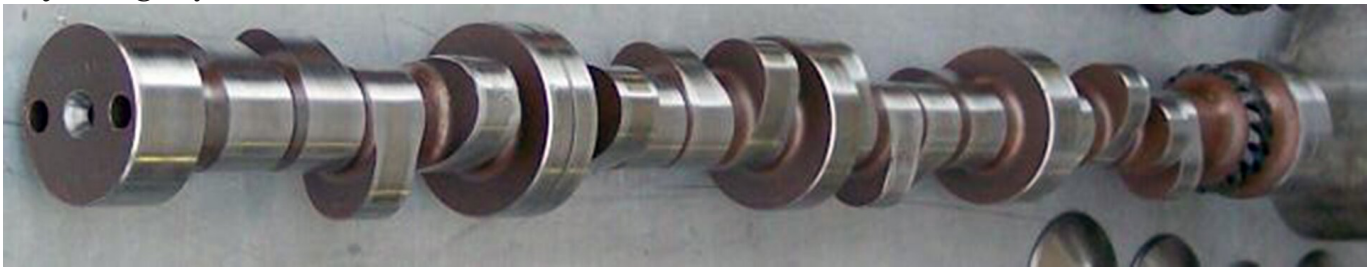
osadzona jest górna część korbowodu, umożliwiając mu ruch na boki. Te trzy elementy połączone razem tworzą mechanizm korbowy. To właśnie konstrukcja mechanizmu korbowego umożliwia zamianę ruchu obrotowego jednego elementu na ruch posuwisto-zwrotny innego elementu. W przypadku silnika to ruch posuwisto-zwrotny tłoka zamieniany jest na ruch obrotowy wału korbowego. Możliwe jest też działanie odwrotne, np. w przypadku maszyny do szycia ruch obrotowy elementów silnika elektrycznego zamieniany jest na ruch posuwisto-zwrotny igły. Na Rys. 2. przedstawiono poglądowo konstrukcję silnika spalinowego z sześcioma tłokami.



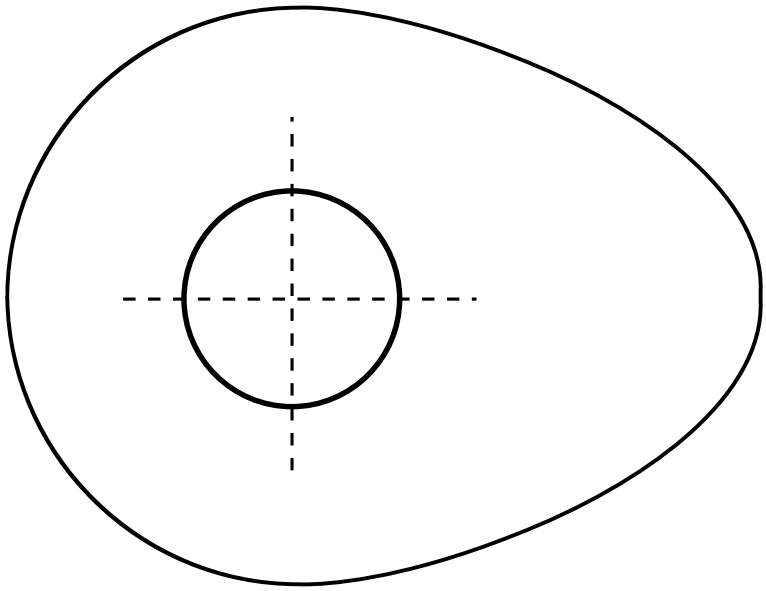
Rys. 2. Wizualizacja elementów mechanicznych silnika spalinowego

Źródło: dostępny w internecie: https://pixabay.com/pl/illustrations/motocykl-silnik-%c5%9bledzenie-promieni-2038870/ [dostęp 7.04.2022 r.], domena publiczna.

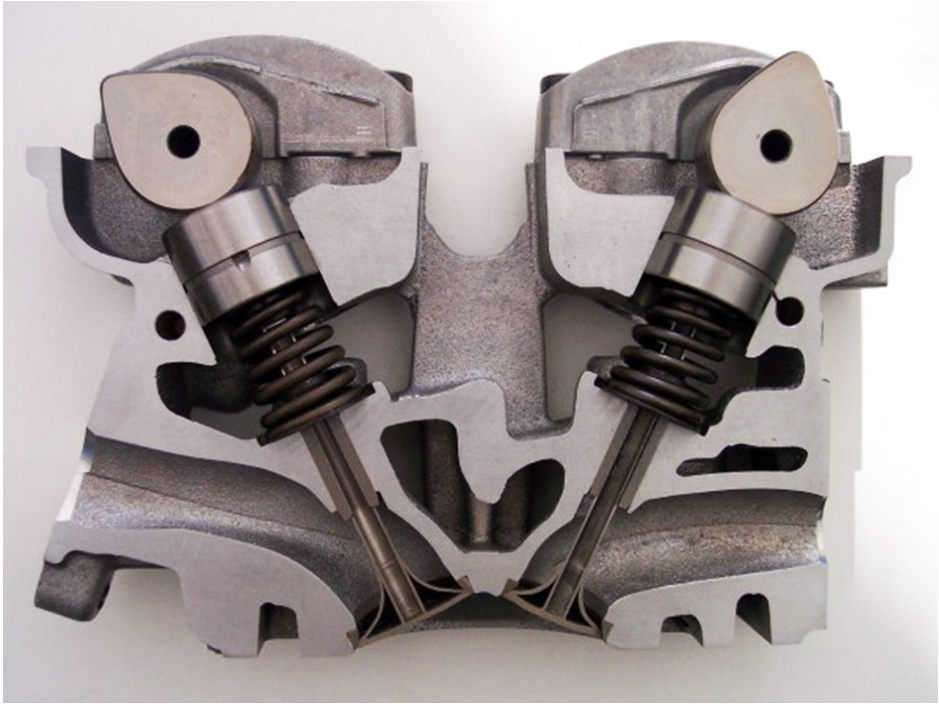
Na Rys. 2. widzimy na dole wał korbowy oraz korbowód łączący go z tłokami. Pusta przestrzeń nad tłokiem to komora spalania (dla czytelności obrazu usunięto z rysunku blok silnika, czyli metalową konstrukcję, w środku której znajdują się widoczne na rysunku elementy). Elementy na górze to zawory, które otwierają się sekwencyjnie – wpuszczając do komory spalania paliwo lub wypuszczając z niej spaliny. W jaki sposób zapewnić sekwencyjne, mechaniczne otwieranie tych zaworów? Służy temu wałek rozrządu. Jest to podłużny walec, na którym osadzone są krzywki. Schematyczną konstrukcję krzywki zaprezentowano w środkowej części Rys. 3., a zdjęcie wałka rozrządu znajduje się w górnej części tego rysunku.



Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nockenwelle_2005.jpg [dostęp 7.04.2022 r.], licencja: CC BY-SA 3.0.



Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.



Rys. 3. Góra: wałek rozrządu - z widocznymi krzywkami. Środek: schemat krzywki. Dół: widok zaworów i krzywek.

Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DOHC-Zylinderkopf-Schnitt.jpg [dostęp 7.04.2022 r.], licencja: CC BY-SA 3.0.

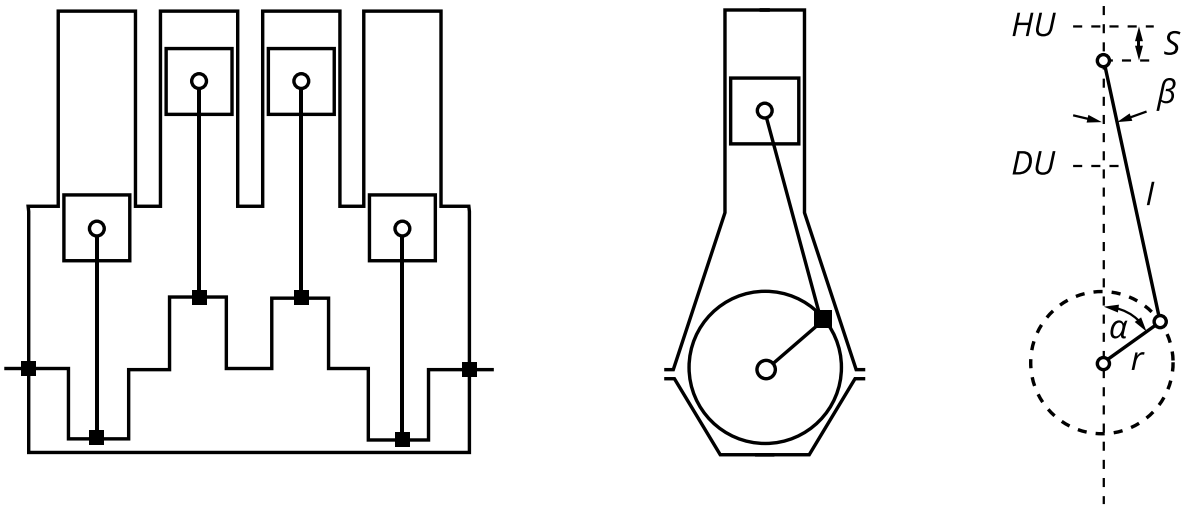
Co wynika z zastosowania krzywki? Wyobraźmy sobie, że krzywka osadzona jest na wale, obracającym się ze stałą prędkością kątową. Dłuższy koniec krzywki będzie regularnie powracał do wyjściowej pozycji, z częstotliwością

$$f = \frac{\omega}{2\pi},$$

gdzie ω to prędkość kątowa wału, na którym osadzona jest krzywka. Jak widać w dolnej części Rys. 3., kąt, pod jakim krzywka jest osadzona względem wałka, może być różna,

krzywka z lewej strony jest widocznie obrócona bardziej w lewą stronę niż krzywka z prawej – znaczy to, że przy równomiernym ruchu wałka, najpierw jedna, a potem druga krzywka dotknie zaworu. W ten sposób, regulując kąt, pod jakim ustawione są krzywki, możemy regulować odstęp w czasie, w jakim otworzą się kolejne zawory.

Wróćmy do mechanizmu korbowego – na Rys. 4. zaprezentowano schematyczną konstrukcję czterocylindrowego silnika. Po lewej stronie zaprezentowano widok w przekroju bocznym, a pośrodku widok od przodu. W prawej części wprowadzono oznaczenia opisujące geometrię poszczególnych elementów: długości korbowodu – l, promień wału korbowego – r, kąt, o jaki obrócił się wał korbowy – α, kąt, jaki tworzy korbowód z osią ruchu tłoka – β, odległość, o jaką przemieszcza się tłok – S.



Rys. 4. Schemat konstrukcji sinika oraz mechanizmu korbowego
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Przeanalizujemy cykl pracy silnika zgodnie z tymi oznaczeniami: w momencie, gdy następuje eksplozja mieszanki paliwowej, ciśnienie rozprężającego się gazu sprawia, że tłok jest odpychany w dół. Przesuwa się on o S, pionowo w dół. To powoduje przyłożenie siły do połączonego z tłokiem korbowodu o długości l. Tłok i korbowód tworzą kąt β, zatem siła działająca na koniec korbowodu wyniesie: $F_k = F_0 \cos \beta$. Siła ta przyłożona jest również do wału korbowego o promieniu r – wytwarzany jest zatem moment siły, który wprawia wał korbowy w ruch. Wał obraca się o kąt α, po czym po osiągnięciu położenia $\alpha = 180°$ ruch tłoka zmienia swój kierunek. Teraz siłą napędzającą dalszy obrót wału korbowego jest eksplozja w kolejnej komorze spalania (omawiamy silnik czterocylindrowy!), a dalszy obrót wału powoduje ruch tłoka pionowo do góry. W tym momencie dochodzi do sprężenia przez tłok mieszanki paliwa w komorze spalania i cykl pracy się zamyka. Poniższa animacja podsumowuje cały cykl pracy silnika.

Film dostępny pod adresem https://zpe.gov.pl/a/D11Bhclne

Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/File:4StrokeEngine_Ortho_3D.gif, licencja: CC BY-SA 3.0.

Animacja przygotowana jest bez ścieżki dźwiękowej. Przedstawia pracę silnika. Silnik pokazany jest w pozycji takiej, że wał korbowy jest prostopadły do płaszczyzny rysunku. U góry cylindra widoczne są dwa zawory, nad którymi znajdują się obracające się krzywki o kształcie zbliżonym do spłaszczonego jajka zwężonego i wydłużonego z jednej strony. Gdy wydłużony koniec krzywki znajduje się na dole, naciska na zawór i zawór otwiera się. Krzywki obracają się w kierunku ruchu wskazówek zegara. Gdy lewa krzywka otwiera zawór, prawa dopiero zbliża się do tego momentu i prawy zawór jest zamknięty. Zawory otwierają się na przemian. W momencie, gdy oba zawory są zamknięte, a tłok jest w najwyższym położeniu, w górnej części cylindra widoczny jest błysk oznaczający wybuch mieszanki paliwowej. Tłok po wybuchu porusza się w dół. Dolny koniec korbowodu, łączącego tłok z wałem korbowym, porusza się w tym czasie po prawej stronie okręgu w kierunku ruchu wskazówek zegara. Gdy dolny koniec korbowodu znajduje się w najniższym punkcie okręgu, tłok jest w najniższym położeniu, a następnie zaczyna poruszać się do góry. Podczas ruchu tłoka do góry lewy zawór otwiera się i z cylindra wyrzucane są spaliny. Tłok przesuwa się w dół i jednocześnie otwiera się prawy zawór, przez który do cylindra napływa mieszanka paliwowa. Tłok ponownie porusza się do góry, sprężając mieszankę. Gdy osiągnie najwyższe położenie, następuje wybuch i cykl powtarza się.

Istotną wielkością, która pozwala zrozumieć pracę układu napędowego jest moment obrotowy silnika. Wielkość ta to wartość momentu siły, który przez korbowód przykładany jest do wału korbowego. Wielkość ta jest o tyle istotna, że znając moment obrotowy silnika i liczbę obrotów na minutę (wyświetlane na desce rozdzielczej w samochodzie), możemy obliczyć moc silnika, jako:

$$\text{moc silnika} = \text{moment obrotowy} \times \text{obroty}$$

Należy pamiętać, że wartość momentu obrotowego zależy m.in. od liczby obrotów na minutę. Stąd chwilowa moc wyjściowa samochodu (wyrażana w koniach mechanicznych, gdzie 1 KM ≈ 735 W) zależy nie tylko od samej konstrukcji silnika, ale tego, na jakim biegu aktualnie znajduje się samochód i z jaką liczbą obrotów na minutę pracuje układ silnika.

Słowniczek

> **Koń mechaniczny (ang. horespower)**
>
> dawna jednostka miary mocy, wynosząca około 1 KM = 735 W.

Symulacja interaktywna

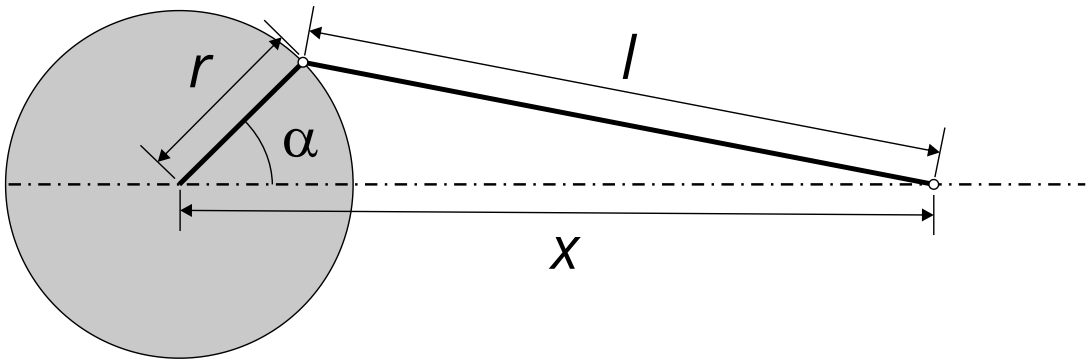
Działanie silnika spalinowego w świetle praw mechaniki

Symulacja prezentuje działanie mechanizmu korbowego. Ma ona na celu zilustrowanie ciągłego ruchu obrotowego wału korbowego przy ruchu tłoczno-zwrotnym tłoka.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Polecenie 1

Wyprowadź wzór na położenie tłoka w zależności od promienia korby r, długości korbowodu l i kąta odchylenia korby od pionu α.



Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Polecenie 2

Wyznacz maksymalną, minimalną oraz środkową (centralną) wartość położenia tłoka.

Polecenie 3

Jaki będzie kąt odchylenia korby α, gdy tłok znajdzie się w położeniu środkowym?

Sprawdź się

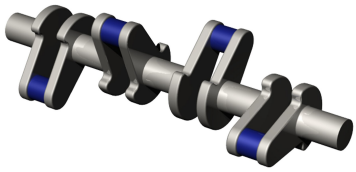
Pokaż ćwiczenia:

Ćwiczenie 1

Dopasuj zdjęcia elementów wału korbowego do ich nazw:







korbowód

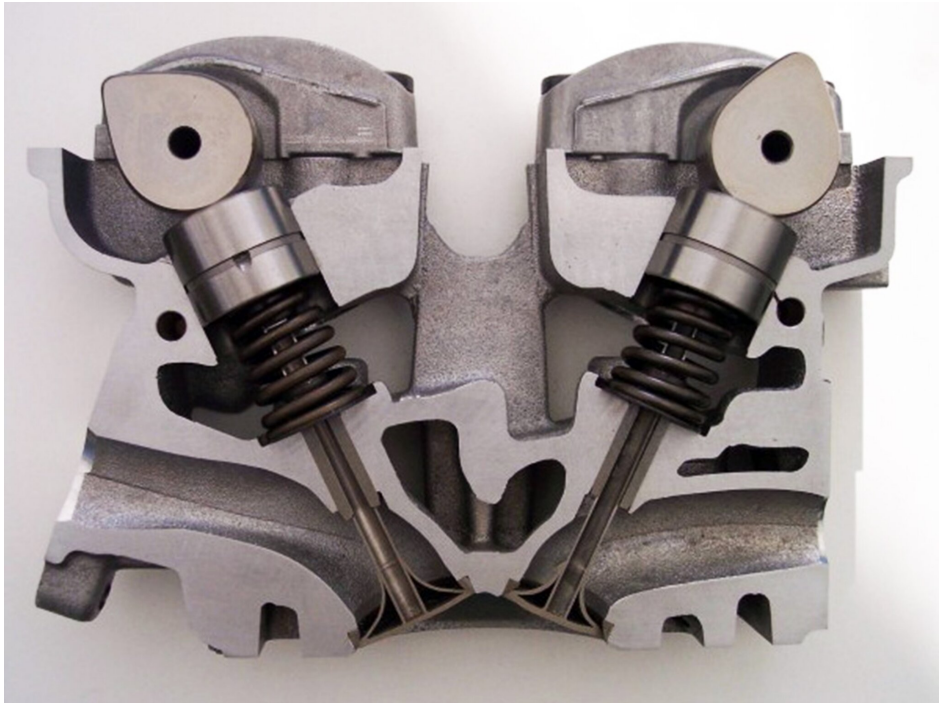
wał korbowy

tłok

Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Piston_2.jpg [dostęp 7.04.2022], https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Crankshaftrendering.png [dostęp 7.04.2022], https://www.freepik.com/free-vector/realistic-pistons-isolated-white-background-engine-equipment-car-motorbike_3586231.htm [dostęp 7.04.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

Ćwiczenie 2

Na zdjęciu zaprezentowano przekrój fragmentu silnika, z widocznymi zaworami (podłużne elementy z tłokiem i sprężyną) oraz krzywkami, regulującymi moment otwarcia zaworów. Przyjmijmy, że wałek rozrządu obraca się zgodnie z ruchami wskazówek zegara (innymi słowy: patrząc na ten obrazek – w prawo). Który z zaworów otworzy się pierwszy?



- ◯ prawy
- ◯ lewy

Źródło: dostępny w internecie: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DOHC-Zylinderkopf-Schnitt.jpg [dostęp 7.04.2022], licencja: CC BY-SA 3.0.

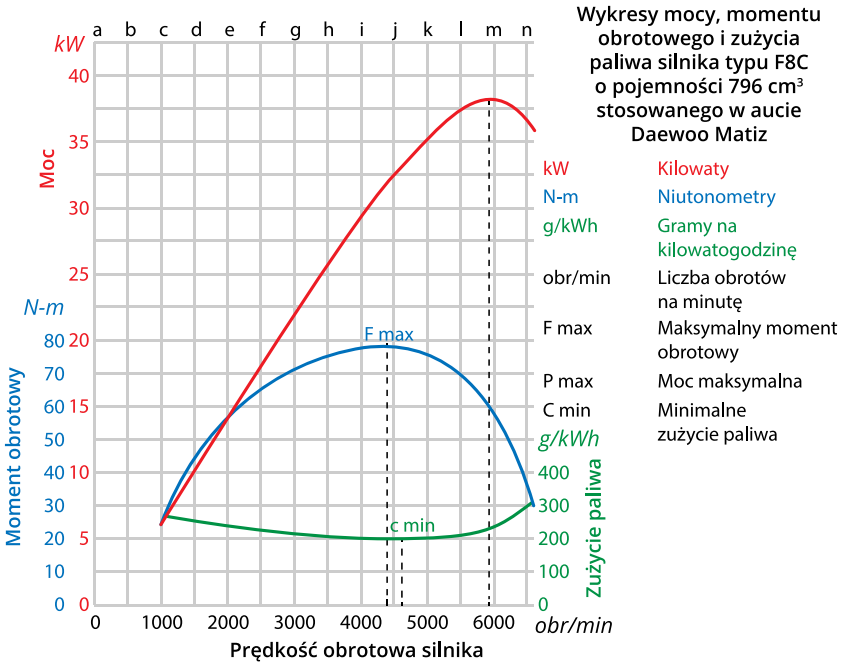
Ćwiczenie 3

Moment obrotowy pewnego silnika wynosi 315 Nm przy 2400 obrotów na minutę. Jaka jest moc tego silnika? Odpowiedź podaj w kilowatach, z dokładnością do dwóch cyfr znaczących.

Odpowiedź: kW

Ćwiczenie 4

Poniższy wykres przedstawia wyniki pomiarów różnych wielkości fizycznych związanych z pracą pewnego silnika samochodowego. Jak to możliwe, że moc wyjściowa nie rośnie liniowo, ale osiąga pewne maksimum, a następnie maleje, skoro liczba obrotów może nadal się zwiększać?



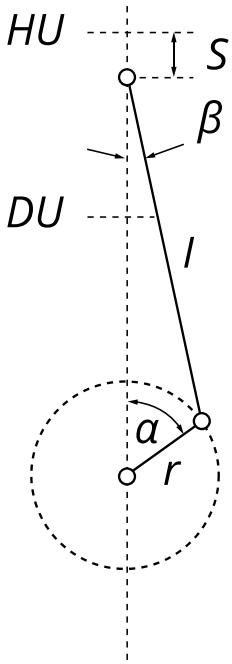
Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Ćwiczenie 5

Wyprowadź wzór pozwalający określić, w jakim odstępie czasu Δt nastąpi otwarcie zaworu przez krzywki, jeśli są one obrócone względem siebie o kąt α_0, a wałek obraca się z prędkością kątową ω.

Ćwiczenie 6

Schemat przedstawia geometryczny opis mechanizmu korbowego silnika. Kolejno od góry pojawiają się oznaczenia: S, β, l, α, r.



Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Przypisz opisy do odpowiednich symboli:

β	odległość, o jaką przemieszcza się tłok
l	kąt, o jaki obrócił się wał korbowy
α	długości korbowodu
r	promień wału korbowego
S	kąt, jaki tworzy korbowód z osią ruchu tłoka

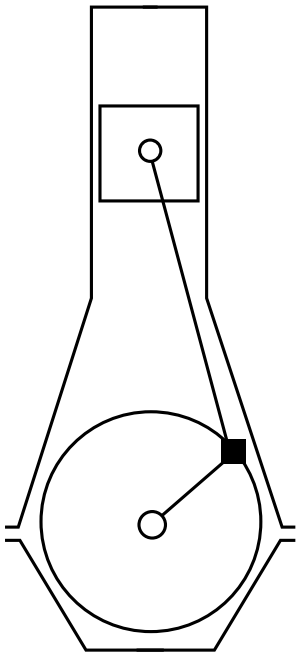
Ćwiczenie 7

Jaki jest cel stosowania mechanizmów korbowych?

- Zamiana ruchu posuwisto-zwrotnego na obrotowy lub odwrotnie.
- Wprowadzenie elementu w ruch posuwisto-zwrotny.
- Żadna z wymienionych.
- Zmniejszenie wartości przykładanej siły, która ma wykonać pracę w ruchu obrotowym.

Ćwiczenie 8

Poniższy rysunek przedstawia schematycznie budowę mechanizmu korbowego wewnątrz silnika. Jeśli w tym momencie tłok porusza się do dołu, to w którą stronę obracać się będzie wał korbowy?



- ◯ Przeciwnie do ruchu wskazówek zegara
- ◯ Zgodnie z ruchem wskazówek zegara

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Dariusz Aksamit
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	**Działanie silnika spalinowego w świetle praw mechaniki**
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres rozszerzony
Podstawa programowa:	**Cele kształcenia – wymagania ogólne** II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. **Zakres podstawowy** **Zakres rozszerzony** **Treści nauczania – wymagania szczegółowe** I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 19) wyodrębnia zjawisko z kontekstu, nazywa je oraz wskazuje czynniki istotne i nieistotne dla jego przebiegu. III. Mechaniki bryły sztywnej. Uczeń: 3) stosuje warunki statyki bryły sztywnej; posługuje się pojęciem momentu sił wraz z jednostką.
Kształtowane kompetencje kluczowe:	**Zalecenia Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r.:** • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.

Cele operacyjne:	Uczeń: 1. wymienia elementy budowy silnika spalinowego, 2. tłumaczy, czym jest ruch tłoczno-zwrotny, 3. definiuje moment obrotowy silnika, 4. oblicza moc silnika spalinowego.
Strategie i metody nauczania:	- project-based learning, - metoda projektów.
Formy zajęć:	praca grupowa
Środki dydaktyczne:	komputer z dostępem do Internetu i projektorem multimedialnym, kawałki drewna lub tektury, narzędzia do wycinania, kleje
Materiały pomocnicze:	brak
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	
Nauczyciel wypisuje na tablicy nazwy elementów składających się na układ napędowy silnika (tłok, korbowód, wał korbowy, zawory, komora spalania, wałek rozrządu...). Następnie pyta uczniów, które z tych słów znają i rozumieją funkcję, jaką pełnią te elementy. Nauczyciel zbiera wiedzę uczniów, uzupełniając ewentualne braki.	
Faza realizacyjna:	
Nauczyciel prezentuje symulację interaktywną z niniejszego e-materiału, pokazującą pracę tłoka. Aby upewnić się, że wszyscy uczniowie zrozumieli zasadę działania mechanizmu korbowego, nauczyciel prosi o rozwiązanie zadań 6, 7 i 8 z zestawu ćwiczeń. Uczniowie dobierają się w grupy, z zadaniem zbudowania prostego mechanizmu korbowego. Mogą wykorzystać do tego różne materiały, np. formować wał korbowy z drutu lub wyciąć go z tektury, a jako cylinder, w którym porusza się tłok, wykorzystać tekturę po ręczniczkach papierowych. Grupy pracują niezależnie, nauczyciel doradza im indywidualnie. Na koniec każda z grup prezentuje skonstruowany przez siebie mechanizm.	
Faza podsumowująca:	
Nauczyciel podkreśla, że mechanizm korbowy wykorzystywany jest w wielu urządzeniach, od historycznych (jak naciąg kuszy), po współczesne (jak maszyny do szycia). Nauczyciel wspólnie z ochotnikiem rozwiązuje na tablicy zadanie 5.	
Praca domowa:	
Zadanie 4 jest pracą domową, z poleceniem znalezienia w Internecie dodatkowych artykułów dyskutujących temat mocy silnika i jego momentu obrotowego.	

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:	Medium może być wykorzystane zgodnie ze scenariuszem. Można również podjąć się konstrukcji wałka rozrządu, narzucając np. czas, po jakim kolejne krzywki mają uderzać w podstawę konstrukcji. Możliwe jest również wykonanie odwróconej klasy, a w trakcie lekcji prezentacja projektów wykonanych w domu.