

Falcon 9 – inżynieryjne arcydzieło współczesnej astronautyki

Ernest Gnapowski

Wydział Matematyki i Informatyki Technicznej, Politechnika Lubelska w Lublinie

Streszczenie

W artykule przedstawiono rakietę nośną Falcon 9, zaprojektowaną i produkowaną przez firmę SpaceX. Uwzględniono szczególnie jej parametry techniczne oraz zastosowane rozwiązania. Opisano elementy składowe Falcona 9, skupiając się zwłaszcza na konstrukcji rakiety, obejmującej pierwszy i drugi stopień, a także na zastosowanych silnikach Merlin wraz z ich charakterystyką i osiągnięciami. W dalszej części artykułu przeanalizowano profile typowych misji realizowanych przy użyciu Falcona 9, zarówno w konfiguracji z załogowym statkiem Dragon, jak i w wersji transportowej dla satelitów i ładunków cargo. Przedstawiono również wybrane innowacyjne rozwiązania, m.in. odzyskiwanie pierwszego stopnia rakiety nośnej.

Słowa kluczowe: Falcon 9, rakietę nośną, SpaceX, Merlin

Wprowadzenie

Falcon 9 to rakietę nośną opracowaną przez amerykańską firmę SpaceX, która zrewolucjonizowała sektor kosmiczny dzięki innowacyjnemu podejściu do ponownego użycia elementów rakietowych. Po raz pierwszy wystrzelona w 2010 r., jest obecnie najczęściej używaną rakietą orbitalną na świecie. Charakteryzuje się wysoką niezawodnością, niższymi kosztami wynoszenia ładunków oraz unikatowym systemem lądowania pierwszego stopnia. Na ryc. 1 przedstawiono Falcona 9 na stanowisku startowym z widoczną wieżą startową.

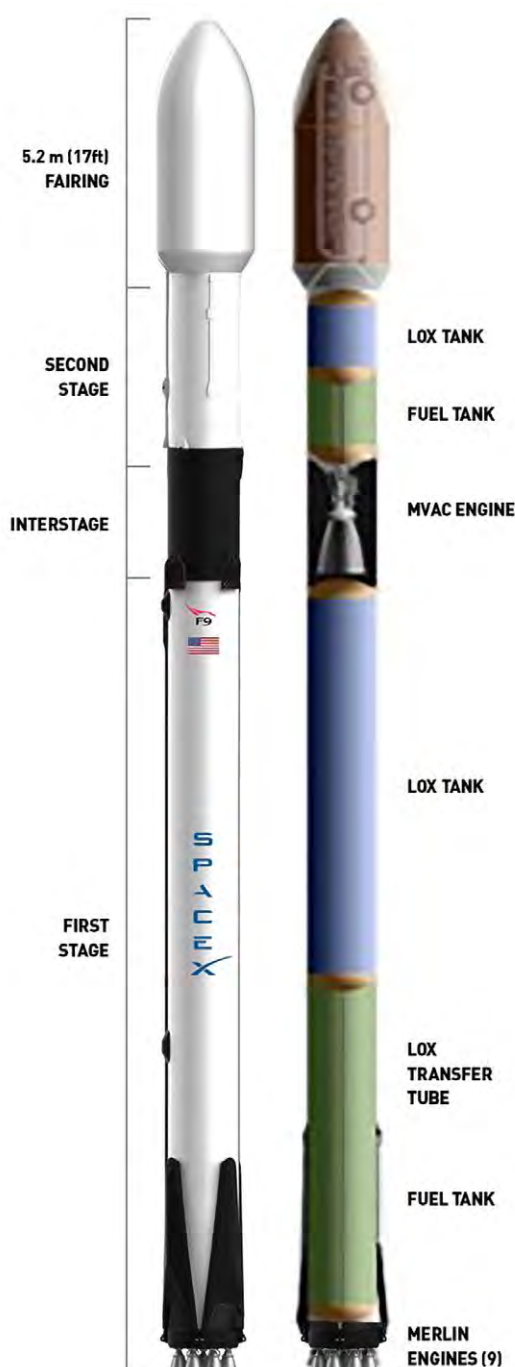
Budowa rakiety Falcon 9

Falcon 9 jest dwustopniową rakietą nośną o wysokości 70 m i średnicy 3,66 m. Główne moduły rakiety przedstawiono



Ryc. 1. Falcon 9 na stanowisku startowym z widoczną wieżą startową [1]

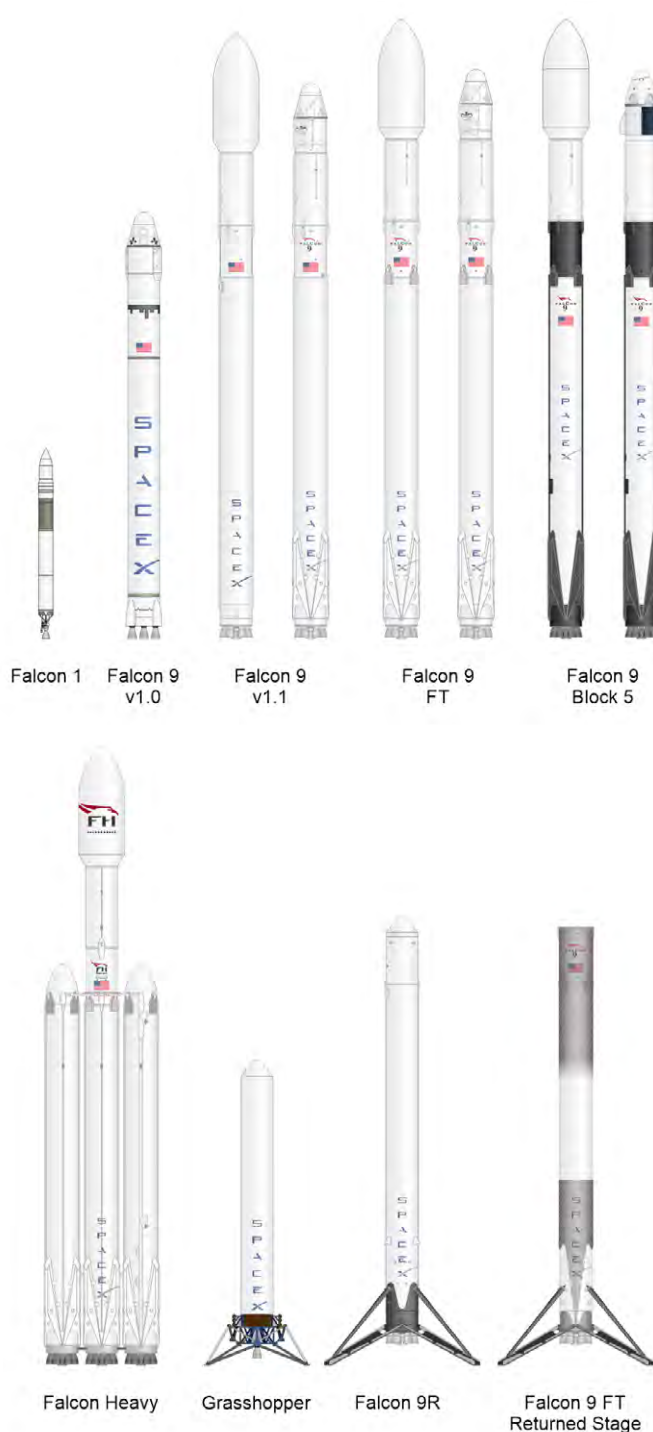
na ryc. 2. Pierwszy stopień jest wyposażony w dziewięć silników Merlin 1D i odpowiada za wyniesienie rakiety przez najgęstsze warstwy atmosfery. Drugi stopień, zasilany jednym silnikiem Merlin Vacuum (Merlin 1D w wersji przystosowanej do pracy w przestrzeni kosmicznej), odpowiedzialny jest za umieszczenie ładunku na docelowej orbicie. Kolejny moduł stanowi tzw. *interstage*, czyli element łączący oba stopnie rakiety, zawierający systemy separacyjne. Ostatni moduł stanowi osłona ładunku (*fairing*), która chroni go przed warunkami atmosferycznymi podczas startu.



Ryc. 2. Schemat rakiety Falcon 9 z opisem poszczególnych elementów [2]

Należy zaznaczyć, że istnieje kilka wersji Falcona 9. Od momentu swego debiutu w 2010 r. rakieta przeszła szereg modernizacji, które pokazano na ryc. 3. Najważniejsze wersje to:

- Falcon 9 v1.0 (2010–2013) – pierwsza generacja, z silnikami ułożonymi w układzie krzyżowym;
- Falcon 9 v1.1 (2013–2016) – większy ciąg, wydłużony pierwszy stopień;
- Falcon 9 Full Thrust (v1.2) – lepsze osiągi dzięki schłodzonemu paliwu;



Ryc. 3. Wersje rakiety Falcon 9 [3]

- Falcon 9 Block 5 (od 2018 r.) – finalna i obecnie używana wersja, zoptymalizowana pod kątem wielokrotnego użycia.

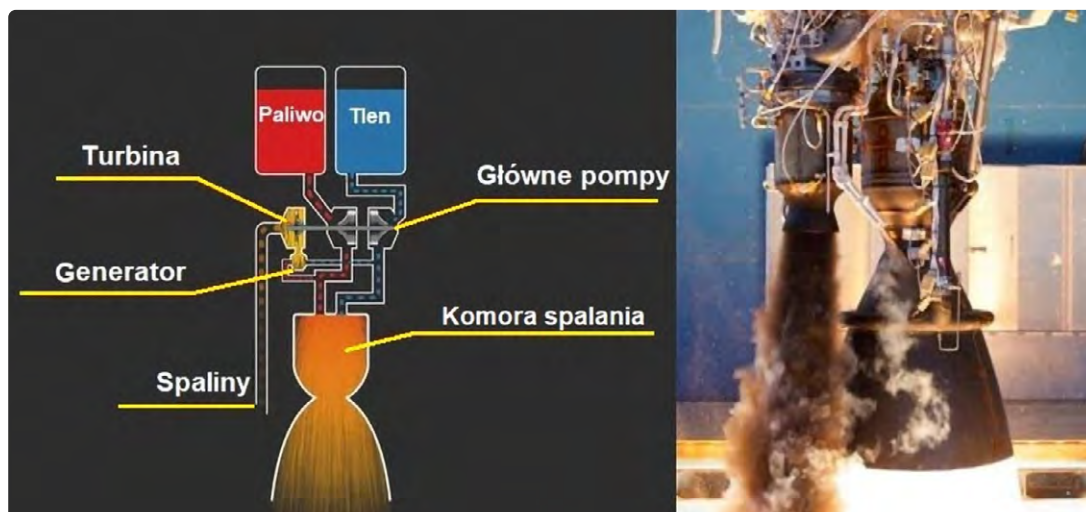
Napęd rakiety Falcon 9 stanowi zespół silników raketowych Merlin 1D na ciekłe paliwo, spalających RP-1 (oczyszczona nafta lotnicza) oraz ciekły tlen. Uproszczoną budowę wspomnianego silnika, wraz z porównaniem do rzeczywistego układu, pokazano na ryc. 4. W pierwszym stopniu znajduje się dziewięć silników Merlin 1D, natomiast drugi stopień korzysta z jednego silnika Merlin Vacuum – oba typy przedstawiono na ryc. 5.

Silniki Merlin wykorzystują cykl otwartego obiegu gazowego. W tym układzie część paliwa i utleniacza trafia do tzw. generatora gazu, gdzie ulega spaleniowi w sposób niepełny, tworząc gorące gazy, które następnie napędzają turbiny pomp paliwowych. Po napędzeniu turbin spaliny są wyrzucane na zewnątrz, a główne strumienie paliwa i utleniacza trafiają do komory spalania, tworząc ciąg niezbędny do startu rakiety.

Należy zauważyć, że dzięki zaawansowanej elektronice i systemom telemetrycznym każdy z silników jest indywidualnie monitorowany w czasie rzeczywistym, a komputer pokładowy może w razie potrzeby wyłączyć niesprawny silnik bez zagrożenia dla całej misji. Elastyczność i prostota konstrukcji Merlina sprawiają, że jest to jeden z najtańszych i najbardziej niezawodnych silników w swojej klasie.

Parametry techniczne napędu Falcon 9

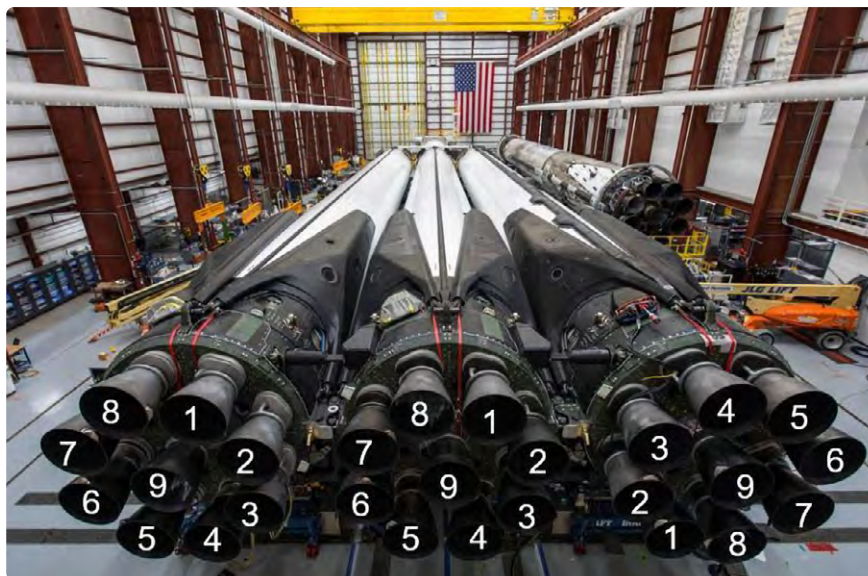
Zespół napędowy pierwszego stopnia składa się, w zależności od konfiguracji, z 9 do 27 silników Merlin 1D. Wersję pierwszego stopnia Falcon 9 Heavy wraz z konfiguracją silników pokazano na ryc. 6. Ciąg jednego silnika Merlin 1D wynosi 845 kN na poziomie morza, natomiast całkowity ciąg pierwszego stopnia waha się od 7600 kN do 22819 kN, w zależności od specyfikacji. Do lotu w przestrzeni kosmicznej używany jest drugi stopień rakiety nośnej, którego napęd



Ryc. 4. Schemat budowy silnika Merlin 1D oraz rzeczywisty silnik podczas pracy [4]



Ryc. 5. Silnik Merlin 1D oraz Merlin Vacuum z wyraźnie większą dyszą [4]



Ryc. 6. Widok pierwszego stopnia rakiety Falcon 9 Heavy [5]

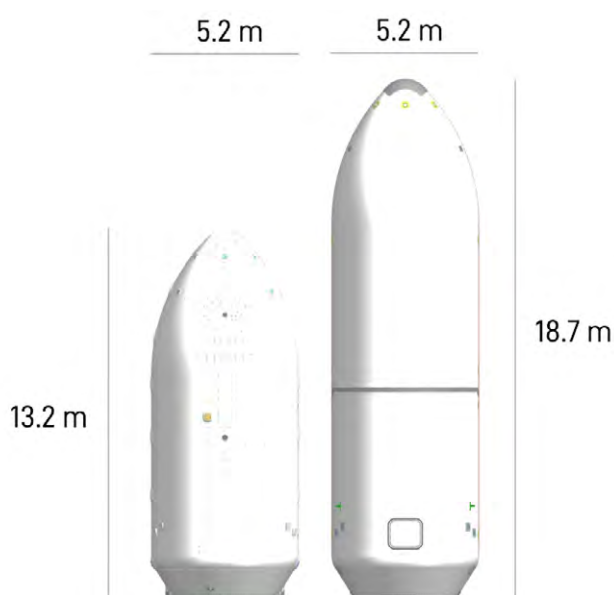
stanowi silnik Merlin Vacuum o ciągu około 981 kN w próżni.

Ważnymi parametrami są również zapas oraz zużycie paliwa niezbędne do pracy silników: dla pierwszego stopnia jest to około 385 000 l ciekłego tlenu i 147 000 l RP-1, natomiast dla drugiego stopnia jest to 90 000 l ciekłego tlenu i 35 000 l RP-1. Paliwo zużywane jest w ciągu około 2,5 minuty przez pierwszy stopień i około 6 minut przez drugi stopień. W komorze spalania silnika Merlin 1D panuje ciśnienie około 9,7 MPa, a sprawność turbopomp wynosi ponad 95%. Sterowanie ciągiem, jak wspomniano, odbywa się elektronicznie, natomiast sam proces chłodzenia komory realizowany jest poprzez przepływ paliwa przez jej ścianki. Należy nadmienić, że ważną cechą drugiego stopnia rakiety Falcon 9 (Merlin Vacuum) jest zdolność do wielokrotnego uruchamiania – wykorzystywana przy korektach orbitalnych.

Jednym z najważniejszych parametrów rakiet lecących w przestrzeń kosmiczną jest zdolność do zabierania ładunków. Falcon 9 w wersji Block 5 może wynieść do 22,8 tony na niską orbitę okołozemską (LEO od 200 do 2000 km nad powierzchnią Ziemi), do 8,3 tony na orbitę geostacjonarną (GTO, 35 786 km nad równikiem) oraz do ponad 4 ton na orbitę translunarną (jest to tor lotu statku kosmicznego, który przecina orbitę Księżyca, ale nie wchodzi na stałą orbitę okołoksiężycową). Na ryc. 7 przedstawiono wymiary standardowej i poszerzonej wersji osłon przestrzeni ładunkowej.

Rakieta Falcon 9 jest wykorzystywana w różnych profilach misji, m.in. do wynoszenia satelitów na orbitę LEO i GTO, lotów zaopatrzeniowych dla Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS), załogowych lotów Crew Dragon oraz do misji eksploracyjnych, np. z sondami księżycowymi i marsjańskimi.

Należy wspomnieć o unikalnym rozwiązaniu stosowanym przez SpaceX w rakiecie Falcon 9, które pozwala na odzyskiwanie pierwszego stopnia rakiety przez jego „samodzielne” lądowanie, co znacząco redukuje koszty misji. Po separacji pierwszy stopień rozpoczyna serię manewrów, aby bezpiecznie powrócić na Ziemię. Przebieg lądowania rozpoczyna się od korekty trajektorii w stronę miejsca lądowania, następnie dochodzi do redukcji prędkości przed wejściem w gęste warstwy atmosfery i finalnego wyhamowania tuż przed przyziemieniem. Lądowanie może odbyć się na autonomicznej barce (ASDS) na oceanie lub na stanowisku lądowym. Na ryc. 8 przedstawiono lądowanie pierwszego stopnia rakiety Falcon 9.



Ryc. 7. Wymiary osłon przestrzeni ładunkowej [5]

Innowacyjne rozwiązania technologiczne

Jednym z najbardziej przełomowych rozwiązań zastosowanych w rakiecie Falcon 9 jest możliwość wielokrotnego użycia pierwszego stopnia. SpaceX jako pierwsza firma na świecie z powodzeniem opracowała i wdrożyła system



Ryc. 8. Lądowanie pierwszego stopnia Falcona 9 [6]

lądowania oraz ponownego wykorzystania tego segmentu rakiety, który jeszcze kilka lat temu był uznawany za jednorazowy. Kolejnymi innowacjami są m.in.: system siatki sterującej, wykonane z tytanu kratownice montowane w górnej części pierwszego stopnia (umożliwiają precyzyjne sterowanie kierunkiem lotu podczas schodzenia w atmosferze), autonomiczne barki lądowania (ASDS), które są bezzałogowymi platformami oceanicznymi umożliwiającymi odzysk pierwszego stopnia przy misjach, w których niemożliwe jest lądowanie na lądzie. Ponadto Falcon 9 korzysta z zaawansowanego oprogramowania do kontroli trajektorii i samodzielnego podejmowania decyzji na podstawie danych z czujników. Ważną innowacją jest również modułowa konstrukcja, która pozwala na szybsze przygotowanie do kolejnych misji i łatwiejszą integrację z różnymi typami ładunków.

Podsumowanie

Rakieta Falcon 9 to kamień milowy w dziejach astronautyki, łączący niezawodność z innowacjami. Zdolność do wielokrotnego użycia pierwszego stopnia oraz uniwersalność

zastosowań czynią tę ракетę fundamentem obecnych i przyszłych misji SpaceX, w tym ambitnych planów eksploracji Księżyca i Marsa. Innowacyjne technologie, takie jak lądowanie na autonomicznych barkach, wyznaczają nowe standardy w budowie i eksploatacji ракет nośnych XXI w.

Bibliografia:

- [1] <https://dzienniknaukowy.pl/niekontrolowane-wejscie-w-atmosfere-nad-terytorium-polski-szczatkow-rakiety-falcon-9> [dostęp: 02.09.2025].
- [2] <https://web.mit.edu/2.70/Reading%20Materials/SpaceX%20Falcon-users-guide-2021-09.pdf>. [dostęp: 02.09.2025].
- [3] https://historicspacecraft.com/Rockets_SpaceX.html [dostęp: 02.09.2025].
- [4] <https://www.wevolver.com/specs/merlin-engine-merlin-1d-falcon-9-falcon-heavy> [dostęp: 02.09.2025].
- [5] <https://www.spacex.com/assets/media/falcon-users-guide-2025-05-09.pdf> [dostęp: 02.09.2025].
- [6] <https://spacex.com.pl/wiadomosci/start-rakiety-falcon-9-z-misja-starlink-29> [dostęp: 02.09.2025].