



UNIWERSYTET GDAŃSKI

Adam Betka
Nr albumu: 266517

Analiza wpływu wielokrotnego użycia i integracji pionowej na konkurencyjność cenową komercyjnych rakiet kosmicznych.

Kierunek studiów: Ekonomia
Poziom studiów: I stopnia - licencjackie
Profil studiów: ogólnoakademicki
Forma studiów: studia niestacjonarne

Praca dyplomowa licencjacka
wykonana pod kierunkiem
dr Andrzej Poszewiecki

Gdańsk, 2026 r.

OŚWIADCZENIE

Wyrażam zgodę / ~~nie wyrażam zgody~~* na udostępnienie osobom zainteresowanym mojej pracy dyplomowej dla celów naukowo-badawczych. Zgoda na udostępnienie pracy dyplomowej nie oznacza wyrażenia zgody na kopiowanie pracy dyplomowej w całości lub w części.

* niepotrzebne skreślić

23.06.2026

data

podpis

SPIS TREŚCI

WYKAZ SKRÓTÓW	6
WSTĘP	8
ROZDZIAŁ 1. PODSTAWY TEORETYCZNE INTEGRACJI PIONOWEJ I WIELORAZOWOŚCI	10
1.1. Przegląd literatury	10
1.1.1. Przestrzeń kosmiczna jako laboratorium organizacji przemysłowej	10
1.1.2. Krzywe uczenia i prawo Wrighta	11
1.1.3. Teoria integracji pionowej	12
1.1.3.1. Luka w literaturze	14
1.1.4. Ekonomia ponownego wykorzystania	15
1.1.5. Wyzwanie identyfikacyjne	17
1.2. Tło instytucjonalne	18
1.2.1. Era koszt plus marża	18
1.2.2. Dziedzictwo Space Shuttle	19
1.2.3. Zwrot komercyjny	20
1.2.4. Mechanizmy zmiany instytucjonalnej	21
ROZDZIAŁ 2. ANALIZA EMPIRYCZNA CEN, INTEGRACJI I WIELORAZOWOŚCI RAKIET NOŚNYCH	23
2.1. Dane i metody	24
2.1.1. Źródła danych	24
2.1.2. Definicje zmiennych	25
2.1.3. Specyfikacja ekonometryczna	27
2.1.4. Ograniczenia identyfikacji	28
2.2. Dokumentacja integracji pionowej	29
2.2.1. Model SpaceX	29
2.2.2. Model tradycyjny	30
2.2.3. Znaczenie integracji pionowej	31
2.2.4. Integracja i uczenie się	31
2.2.5. Bariery integracji pionowej u tradycyjnych dostawców	32

2.3.	Dane przekrojowe	32
2.3.1.	Statystyki opisowe	33
2.3.2.	Wzorce dwuwymiarowe	34
2.3.3.	Specyfikacje progresywne	37
2.3.4.	Wyniki regresji: interpretacja	39
2.3.5.	Współzależność integracji pionowej i wielorazowości	40
2.3.6.	Test odporności: tylko jednorazowe	41
2.3.7.	Analiza heterogeniczności	42
2.3.8.	Wielkość ekonomiczna efektu	43
2.3.9.	Interpretacja	44
2.4.	Ekonomika wielorazowości	44
2.4.1.	Mechanizm progowy	45
2.4.2.	Wolumen startów SpaceX	45
2.4.3.	Integracja pionowa po stronie popytu	47
2.4.4.	Struktura kosztów stałych	47
2.4.5.	Europejska ścieżka rozwoju bez wielorazowości	48
2.5.	Interakcja integracji i wielorazowości	48
2.6.	Studia przypadków	49
2.6.1.	SpaceX: od nieudanych negocjacji do pozycji rynkowej	50
2.6.2.	Arianespace: ograniczenia instytucjonalne	52
2.6.3.	United Launch Alliance: ograniczenia struktury właścicielskiej	53
2.6.4.	Blue Origin: test podwójnej VI	54
2.6.5.	Analiza porównawcza	55
2.7.	Dokumentacja danych	56
ROZDZIAŁ 3. IMPLIKACJE WYNIKÓW I OGRANICZENIA ANALIZY		57
3.1.	Implikacje dla przemysłu i polityki	57
3.1.1.	Implikacje dla struktury rynku	57
3.1.2.	Europejski dylemat strategiczny	58
3.1.3.	Reforma zamówień publicznych jako polityka przemysłowa	59
3.1.4.	Wnioski dla innych branż kapitałochłonnych	60
3.2.	Ograniczenia i kierunki przyszłych badań	60
3.2.1.	Ograniczenia identyfikacji	60
3.2.2.	Nieprecyzyjność oszacowania wielorazowości	61
3.2.3.	Ograniczenia danych	61
3.2.4.	Selekcja i endogeniczność	62
3.2.5.	Wielkość próby i możliwość generalizacji	64
3.2.6.	Kierunki przyszłych badań	64
ZAKOŃCZENIE		66

ZAŁĄCZNIK A. ZBIÓR DANYCH I DOKUMENTACJA ŹRÓDŁOWA . . .	69
A.1. Pełny zbiór danych	69
A.1.1. Uzasadnienie jakości źródeł i kodowania VI	74
BIBLIOGRAFIA	79
SPIS TABEL	86
SPIS RYSUNKÓW	87

WYKAZ SKRÓTÓW

B+R badania i rozwój

BE-4 silnik rakietowy Blue Engine 4

CNES Centre national d'études spatiales

COTS Commercial Orbital Transportation Services

CPI-U Consumer Price Index for All Urban Consumers

ESA Europejska Agencja Kosmiczna

FAA Federal Aviation Administration

FTC Federal Trade Commission

GAO Government Accountability Office

HC1 estymator odpornych błędów standardowych

ISRO Indian Space Research Organisation

JAXA Japan Aerospace Exploration Agency

LEO niska orbita okołoziemską

MNK metoda najmniejszych kwadratów

NASA National Aeronautics and Space Administration

OLS Ordinary Least Squares

SEC U.S. Securities and Exchange Commission

SLS Space Launch System

ULA United Launch Alliance

USAF United States Air Force

USD dolar amerykański

VI integracja pionowa

WSTĘP

Sektor startów orbitalnych przez dekady opierał się głównie na systemach jedno-razowych. Po wykonaniu misji zasadnicze elementy rakiet były tracone, a wysoka cena jednostkowa ograniczała częstotliwość wykorzystania usług wynoszenia ładunków. W ostatniej dekadzie SpaceX osiągnęło pozycję cenową wyraźnie odmienną od tradycyjnych dostawców usług startowych. Skala tej różnicy wskazuje, że wyjaśnienie nie może ograniczać się do samej technologii lądowania pierwszego stopnia.

Celem pracy jest zidentyfikowanie mechanizmów ekonomicznych, poprzez które integracja pionowa i ponowne wykorzystanie członów rakiet wpływają na konkurencyjność cenową dostawców usług wynoszenia ładunków na orbitę okołoziemską. Główne pytanie badawcze dotyczy tego, jakie mechanizmy ekonomiczne pomagają wyjaśnić przewagę cenową SpaceX nad tradycyjnymi dostawcami usług startowych.

Chociaż przypadek SpaceX stanowi punkt wyjścia dla pytania badawczego, praca nie jest wyłącznie studium przypadku tej spółki. SpaceX traktowane jest jako obserwacja skrajna, pozwalająca zidentyfikować mechanizmy ekonomiczne konfrontowane następnie z danymi przekrojowymi oraz porównaniami z Arianespace, United Launch Alliance, Blue Origin i wybranymi programami instytucjonalnymi.

Hipoteza pracy zakłada, że przewaga cenowa SpaceX wynika nie z samej wielorazowości, lecz z komplementarnego oddziaływania integracji pionowej po stronie podaży, integracji po stronie popytu oraz wysokiego wolumenu startów. Po stronie podaży produkcja kluczowych komponentów wewnątrz przedsiębiorstwa może sprzyjać zatrzymaniu wiedzy inżynierskiej i organizacyjnej. Po stronie popytu system Starlink pełni funkcję stabilnego wewnętrznego klienta, który zwiększa wolumen startów potrzebny do ekonomicznego wykorzystania odzyskiwanych członów rakiet.

Zakres empiryczny pracy obejmuje komercyjne i instytucjonalne systemy wynoszenia ładunków na niską orbitę okołoziemską w latach 1981–2026. Mimo że tytuł akcentuje rakiety komercyjne, w zbiorze pozostawiono również systemy rządowe i instytucjonalne, takie jak Space Shuttle, SLS oraz wybrane programy NASA i USAF, ponieważ pełnią funkcję historycznych i organizacyjnych punktów porównawczych dla rynku komercyjnego. Podstawą analizy jest zbiór danych opracowany na potrzeby pracy, obejmujący 42 rakiety nośne oraz publicznie dostępne informacje o cenach, ładowności, statusie

wielorazowości, poziomie integracji pionowej, liczbie startów i jakości źródeł. Praca wykorzystuje dane wtórne pochodzące z dokumentów agencji publicznych, raportów branżowych, publikacji naukowych i materiałów przedsiębiorstw.

Metodyka pracy łączy przegląd literatury, analizę porównawczą, analizę danych przekrojowych oraz studia przypadków. W części ilościowej zastosowano estymację MNK z odpornymi błędami standardowymi, aby sprawdzić związek między poziomem integracji pionowej a ceną za kilogram ładunku. Studia przypadków SpaceX, Ariane-space, United Launch Alliance i Blue Origin służą jakościowej weryfikacji mechanizmów zasugerowanych przez analizę przekrojową.

Praca ma charakter analityczny i wyjaśniający. Nie przedstawia pełnej identyfikacji przyczynowej, ponieważ publiczne dane nie pozwalają oddzielić wpływu integracji pionowej, wielorazowości, skali, strategii zarządzania i warunków wejścia na rynek. Wyniki należy więc interpretować jako udokumentowaną zależność zgodną z teorią ekonomiczną, a nie jako ścisły dowód przyczynowy.

Rozdział 1 przedstawia podstawy teoretyczne integracji pionowej, krzywych uczenia i ekonomii wielorazowości oraz omawia tło instytucjonalne amerykańskich zamówień kosmicznych. Rozdział 2 prezentuje dane, metody, wyniki analizy przekrojowej, ekonomię wielorazowości oraz studia przypadków. Rozdział 3 omawia implikacje wyników, ograniczenia identyfikacyjne i kierunki przyszłych badań.

ROZDZIAŁ 1. PODSTAWY TEORETYCZNE INTEGRACJI PIONOWEJ I WIELORAZOWOŚCI

1.1. Przegląd literatury

1.1.1. Przestrzeń kosmiczna jako laboratorium organizacji przemysłowej

Weinzierl przedstawia gospodarkę orbitalną jako „najlepszą szansę w historii ludzkości na stworzenie i zbadanie społeczeństw gospodarczych niemal od zera”.¹ Działania sektora kosmicznego odsłaniają dynamikę kosztów, które w dojrzałych branżach bywają trudniejsze do zaobserwowania z powodu dekad stopniowych zmian. Sektor ten ma charakter oligopolistyczny. Koszty stałe są wysokie, a wejście na rynek wymaga nakładów rozwojowych przekraczających 1 miliard dolarów.² Jedynie nieliczni konkurenci są w stanie dokonać tak znaczącej inwestycji. Komplementarność między usługami wynoszenia rakiet a produkcją satelitów dodatkowo sprzyja koncentracji kapitału oraz pracowników. Jeszcze do niedawna amerykański rynek kosmiczny stanowił w istocie monopol United Launch Alliance.³ Powstanie SpaceX istotnie zmieniło tę strukturę.

Skalę zmiany dobrze pokazuje porównanie historyczne. Cena wyniesienia 1 kg ładunku na orbitę okołozemską przy użyciu rakiety Falcon 9 wynosi 3364 dolary.⁴ W przypadku Space Shuttle było to 78 436 dolarów.⁵ Jest to około 23-krotna luka między ceną rakiety Falcon 9 a inflacyjnie skorygowanym kosztem programu Space Shuttle. Porównanie to ma charakter ilustracyjny, a nie bezpośrednio ekonometryczny: zestawia aktualną cenę katalogową rakiety Falcon 9 z historycznie oszacowanym kosztem programu Space Shuttle, a więc wartości pochodzące z różnych epok technologicznych i odmiennych reżimów organizacyjnych. Jego funkcją jest pokazanie skali problemu badawczego,

¹M. Weinzierl, *Space, the Final Economic Frontier*, „Journal of Economic Perspectives”, Vol. 32, No. 2, 2018, s. 5.

²H. W. Jones, *The Recent Large Reduction in Space Launch Cost*, 48th International Conference on Environmental Systems, 2018, s. 10.

³Tamże.

⁴SpaceX, *Capabilities & Services*, 2026, <https://www.spacex.com/assets/media/Capabilities%26Services.pdf>.

⁵H. W. Jones, op. cit., Appendix A, 61 720 dol./kg w dolarach z 2018 r. przeliczono na dolary z 2024 r. przy użyciu CPI-U.

nie estymacja efektu konkretnej zmiennej.

Analiza oparta jest na trzech nurtach teoretycznych. Ekonomia krzywej uczenia pokazuje, w jaki sposób skumulowana produkcja może obniżać koszty jednostkowe. Ekonomia kosztów transakcyjnych i teoria praw własności wyjaśniają, kiedy przedsiębiorstwa integrują się pionowo zamiast zawierać transakcje rynkowe. Ekonomia ponownego wykorzystania bada warunki, w których amortyzacja raket oraz innych maszyn, takich jak samoloty, w wielu cyklach użytkowania staje się opłacalna. Mechanizm łączący te nurty można opisać następująco.

Zintegrowane przedsiębiorstwo budujące własne silniki gromadzi wiedzę produkcyjną niedostępną w takim samym zakresie dla przedsiębiorstwa nabywającego silniki od zewnętrznych dostawców. Skumulowana wiedza pomaga następnie rozpoznawać, które komponenty mogą przetrwać wiele lotów, a które wymagają modyfikacji. Ponowne wykorzystanie tych samych komponentów, wraz z brakiem potrzeby wytwarzania systemów całkowicie od nowa, umożliwia wolumen lotów orbitalnych, który napędza kolejne iteracje uczenia organizacyjnego.

1.1.2. Krzywe uczenia i prawo Wrighta

Setny samolot kosztuje mniej niż pierwszy. To prawidłowość, którą Wright udokumentował jako funkcję potęgową skumulowanej produkcji. Dziś znamy ją jako „80-procentową krzywą uczenia”. Podwojenie produkcji obniża średnie koszty do 80% poprzedniego poziomu.⁶

Uczenie się, argumentował Arrow, jest endogeniczne względem produkcji. Powinno być indeksowane skumulowanymi inwestycjami, a nie czasem kalendarzowym. Rośnie wraz z doświadczeniem. „Uczenie się jest produktem doświadczenia” i „może zachodzić jedynie poprzez próbę rozwiązania problemu”.⁷ Funkcja uczenia się ma postać $\lambda(G) = bG^{-n}$, a skala i powtarzalność tworzą rosnące korzyści w ujęciu zagregowanym. Arrow dostrzegł jednak kluczowy efekt zewnętrzny: „prywatna krańcowa produktywność kapitału jest niższa od społecznej krańcowej produktywności, ponieważ efekt uczenia się nie jest kompensowany na rynku”.⁸

Zintegrowane przedsiębiorstwa, internalizując produkcję na większej liczbie etapów, mogą przechwytywać efekty zewnętrzne uczenia się, które rozdrobnieni wykonawcy tracą na granicach organizacyjnych. Przedsiębiorstwo nabywające silniki uczy się mniej z ich produkcji niż wykonawca budujący silniki we własnym zakresie. Ten drugi gromadzi wiedzę ukrytą o zachowaniu turbopomp, stabilności spalania i trybach awarii. Wiedza

⁶T. P. Wright, *Factors Affecting the Cost of Airplanes*, „Journal of the Aeronautical Sciences”, Vol. 3, No. 4, 1936, s. 124.

⁷K. J. Arrow, *The Economic Implications of Learning by Doing*, „The Review of Economic Studies”, Vol. 29, No. 3, 1962, s. 155.

⁸Tamże, s. 159.

ta pomaga później ocenić, czy komponent nadaje się do ponownego lotu.

Farmer i Lafond zweryfikowali krzywe uczenia się dla 53 technologii. Występowalna heterogeniczność jest znaczna: fotowoltaika poprawiła się 2330-krotnie między 1956 a 2013 rokiem. Dla porównania węgiel nie wykazał żadnego wyraźnego trendu. Koszty energii pochodzącej z atomu natomiast wzrosły. Tradycyjne koszty wynoszenia na orbitę wpisują się w schemat stagnacji: Jones dokumentuje, że „od 1970 do 2000 roku średni koszt wyniesienia ładunku na niższą orbitę okołoziemską wynosił 18,5 tys. dolarów/kg, przy typowym zakresie od 10 do 32 tys. dolarów/kg”.⁹ SpaceX odcięło się od powyższego schematu, co wymaga wyjaśnienia roli czynników instytucjonalnych.

Benkard rozwinął analizę krzywej uczenia, stosując ją do produkcji samolotów. Wykazał, że doświadczenie deprecjonuje się podczas przerw w produkcji. Jego oszacowania wskazują na miesięczną stopę deprecjacji wynoszącą 0,96. Oznacza to, że jedynie 61 procent zgromadzonego czynnika uczenia przetrwa rok przerwy produkcyjnej.¹⁰

Mechanizm działa poprzez rotację pracowników i zwolnienia, które kaskadowo zakłócają funkcjonowanie organizacji. Po uwzględnieniu tej deprecjacji szacowane stopy uczenia wzrastają z 18 procent do 35–40 procent.¹¹ Standardowe ramy zaniżają rzeczywiste uczenie się, ponieważ ignorują zapomnianie.

Tradycyjni dostawcy lotów orbitalnych wynoszą ładunki kilka razy w roku, podczas gdy SpaceX wykonuje starty średnio kilka razy w tygodniu.¹² W ujęciu Benkarda operatorzy o niskiej częstotliwości produkcji i operacji mogą tracić wiedzę instytucjonalną, którą operatorzy o wysokiej częstotliwości stale wzmacniają. Dokładna wielkość tego efektu w przypadku komercyjnych rakiet kosmicznych pozostaje kwestią empiryczną, jednak kierunek mechanizmu jest zgodny z teorią: operator wykonujący starty zaledwie co kwartał ma większe ryzyko utraty wiedzy między misjami niż operator wykonujący starty co tydzień.

W niniejszej pracy nie są bezpośrednio szacowane parametry uczenia się dla SpaceX, gdyż przedsiębiorstwo publikuje ceny, a nie koszty. Ramy te wyjaśniają natomiast, dlaczego integracja może mieć znaczenie. Prawo Wrighta dostarcza mechanizmu ekonomicznego, którego obserwowalne konsekwencje są analizowane w Rozdziale 2.

1.1.3. Teoria integracji pionowej

Punktem wyjścia teorii integracji pionowej jest pytanie, dlaczego część transakcji odbywa się wewnątrz przedsiębiorstw, a nie przez rynek. W uproszczonych modelach neoklasycznych przedsiębiorstwo bywa traktowane jako technologia przekształcania na-

⁹H. W. Jones, op. cit., s. 2.

¹⁰C. L. Benkard, *Learning and Forgetting: The Dynamics of Aircraft Production*, „American Economic Review”, Vol. 90, No. 4, 2000, s. 1049.

¹¹Tamże, s. 1045–1049.

¹²BryceTech, *2024 State of the Satellite Industry Report*, 2024.

kładów w produkcję. Coase przesunął uwagę na koszty korzystania z rynku i wskazał, że przedsiębiorstwa powstają wtedy, gdy organizowanie produkcji wewnętrznie kosztuje mniej niż zawieranie transakcji rynkowych. „Najbardziej oczywistym kosztem organizowania produkcji za pośrednictwem mechanizmu cenowego jest koszt ustalenia, jakie są odpowiednie ceny”.¹³ Przedsiębiorstwo rozszerza się dopóki koszty organizacji wewnętrznej nie zrównają się z kosztami transakcji rynkowych.

Williamson rozwinął tę obserwację w ekonomię kosztów transakcyjnych. Integracji sprzyjają następujące warunki: specyficzność aktywów, niekompletność kontraktowa i oportunizm. Spośród nich specyficzność aktywów odgrywa najważniejszą rolę. Williamson nazywa ją „wielką lokomotywą, której ekonomia kosztów transakcyjnych zawdzięcza znaczną część swojej mocy predykcyjnej”.¹⁴ Gdy inwestycje tracą wartość poza daną relacją, rynki konkurencyjne przekształcają się w monopole bilateralne. Integracja przenosi transakcje do wnętrza przedsiębiorstwa, co pozwala na sekwencyjne podejmowanie decyzji w miarę zmiany okoliczności, bez konieczności każdorazowego renegotjowania umów.¹⁵

Grossman i Hart sformalizowali komplementarny pogląd traktujący o tym, że kontrakty są niekompletne. Nie można określić wszystkich decyzji *ex ante*. Własność nadaje to, co nazywają „rezydującymi prawami kontroli”, czyli władzę nad decyzjami, których kontrakt nie obejmuje.¹⁶ Integracja jest optymalna, gdy inwestycje jednej strony mają istotnie większe znaczenie niż drugiej.¹⁷ Strona, której inwestycje mają największe znaczenie, powinna posiadać aktywa.

Klein, Crawford i Alchian przeanalizowali „przywłaszczalne quasi-renty”, czyli lukę między wartością aktywu w bieżącym zastosowaniu a jego najlepszą alternatywą.¹⁸ Duże quasi-renty tworzą ryzyko tzw. szantażu: właściciele mogą grozić przemieszczeniem aktywów, chyba że warunki zostaną renegotjowane. Integracja pionowa ogranicza problem szantażu poprzez unifikację własności. Ramy te mają zastosowanie w przemyśle kosmicznym, gdzie wyspecjalizowane systemy fizyczne i wiedza inżynierska mają kluczowe znaczenie dla powodzenia misji realizowanych dla klientów, zarówno prywatnych jak i publicznych, takich jak NASA.

SpaceX produkuje własne silniki, struktury, awionikę i oprogramowanie.¹⁹ Jones podaje: „SpaceX szacuje, iż zlecenie podwykonawcom pracy o wartości jednego dolara

¹³R. H. Coase, *The Nature of the Firm*, „Economica”, Vol. 4, No. 16, 1937, s. 390.

¹⁴O. E. Williamson, *Transaction-Cost Economics: The Governance of Contractual Relations*, „The Journal of Law and Economics”, Vol. 22, No. 2, 1979, s. 239.

¹⁵Tamże, s. 234–253.

¹⁶S. J. Grossman, O. D. Hart, *The Costs and Benefits of Ownership: A Theory of Vertical and Lateral Integration*, „Journal of Political Economy”, Vol. 94, No. 4, 1986, s. 691–692.

¹⁷Tamże, s. 705, 707–709.

¹⁸B. Klein, R. G. Crawford, A. A. Alchian, *Vertical Integration, Appropriable Rents, and the Competitive Contracting Process*, „The Journal of Law and Economics”, Vol. 21, No. 2, 1978, s. 298–299.

¹⁹Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

kosztowałoby od trzech do pięciu dolarów ze względu na koszty ogólne i zysk podwykonawców”.²⁰ Oszacowanie to nie zostało niezależnie zweryfikowane, jednak jest kierunkowo zgodne z porównaniami NAFCOM omawianymi poniżej. Poza potencjalnymi oszczędnościami na kosztach transakcyjnych integracja zmienia to, co inżynierowie optymalizują. Gdy zespół projektujący silnik Merlin pracuje blisko zespołu projektującego strukturę Falcon 9, wymiana wiedzy o kompromisach między stosunkiem ciągu do masy a masą konstrukcji jest łatwiejsza. W przypadku osobnych podwykonawców podobna wymiana wymagałaby dodatkowej koordynacji. Kolokowane zespoły dzielą się informacjami, których kontrakty nie są w stanie w pełni określić.

1.1.3.1. Luka w literaturze

Empiryczne testy ekonomii kosztów transakcyjnych koncentrowały się głównie na integracji po stronie podaży. Konkretnie na tym, czy przedsiębiorstwa wytwarzają, czy kupują swoje nakłady. Monteverde i Teece zbadali produkcję komponentów samochodowych i stwierdzili, że części wymagające większego wysiłku inżynierskiego (przybliżenia specyficzności aktywów) częściej były produkowane wewnątrz.²¹ Masten przetestował podobne przewidywania w przemyśle lotniczym. Udokumentował, że złożoność i specyficzność komponentów przewidywały produkcję wewnętrzną.²² Oba badania potwierdziły ramy Williamsona, jednak skupiły się wyłącznie na decyzjach skierowanych w górę łańcucha wartości.

Literatura z zakresu ekonomii kosmicznej dokumentuje koszty, ceny i strukturę rynku bez właściwego teoretyzowania mechanizmów integracji. Weinzierl przedstawia przestrzeń kosmiczną jako laboratorium organizacji przemysłowej, lecz nie analizuje integracji pionowej.²³ Gatti i D’Ottavio dokumentują rolę systemu Starlink w wolumenie startów SpaceX, ale traktują ją jako strategię biznesową, a nie zjawisko kosztów transakcyjnych.²⁴ Jones porównuje koszty wynoszenia u różnych dostawców bez badania determinant organizacyjnych.²⁵

Niniejsza praca proponuje interpretację dwóch słabiej opisanych wątków w literaturze. Po pierwsze, wcześniejsze prace empiryczne dotyczące integracji pionowej badały głównie decyzje po stronie podaży. W tej pracy logika kosztów transakcyjnych zostaje zastosowana również do integracji po stronie popytowej. System Starlink funkcjonuje nie tylko jako źródło przychodów, lecz także jako integracja w dół łańcucha wartości ograni-

²⁰H. W. Jones, op. cit.

²¹K. Monteverde, D. J. Teece, *Supplier Switching Costs and Vertical Integration in the Automobile Industry*, „The Bell Journal of Economics”, Vol. 13, No. 1, 1982.

²²S. E. Masten, *The Organization of Production: Evidence from the Aerospace Industry*, „The Journal of Law and Economics”, Vol. 27, No. 2, 1984.

²³M. Weinzierl, op. cit.

²⁴M. Gatti, A. D’Ottavio, *The Missing Rocket: An Economic and Engineering Analysis of the Reusability Dilemma in the European Space Sector*, „Intereconomics”, Vol. 60, No. 2, 2025, s. 88–95.

²⁵H. W. Jones, op. cit.

czająca ryzyko szantażu ze strony klientów i niepewność popytu, czyli koszty transakcyjne analogiczne do tych, które zidentyfikował Williamson.²⁶ Po drugie, literatura ekonomii przemysłu kosmicznego rzadko analizuje komplementarność między integracją po stronie podaży a integracją po stronie popytu. Szersza literatura dotycząca integracji pionowej również rzadko opisuje przypadki, w których przedsiębiorstwa integrują się jednocześnie w górę i w dół łańcucha wartości w kapitałochłonnych branżach o stromych krzywych uczenia się.²⁷ Pozycja cenowa SpaceX jest związana z obydwooma rodzajami integracji: integracja po stronie podaży sprzyja występowaniu krzywych uczenia, a integracja po stronie popytu stabilizuje wolumen startów. Doświadczenie Blue Origin, czyli integracja podażowa bez porównywalnej integracji popytowej, ilustruje, że sama integracja po stronie podaży może być niewystarczająca.

1.1.4. Ekonomia ponownego wykorzystania

Należy podkreślić istotny fakt: integracja poprzedziła ponowne wykorzystanie. SpaceX osiągnęło obniżenie cen i kosztów rozwoju w warunkach integracji pionowej oraz kontraktów ze stałą ceną między 2006 a 2015 rokiem. Miało to miejsce zanim rakieta Falcon 9 po raz pierwszy pomyślnie wylądowała i odzyskała pierwszy stopień w grudniu 2015 roku.²⁸ Oszczędności i wyższe marże mogły następnie wspierać rozwój programu Starlink. Komercyjne satelity internetowe stworzyły potrzebę częstych startów, czyniąc ponowne wykorzystanie pierwszego stopnia rakiet opłacalnym ekonomicznie. Sekwencja ta jest zgodna z interpretacją przyczynową, ale sama jej nie dowodzi.

Technicznie Space Shuttle był pojazdem kosmicznym wielokrotnego użytku, z orbiterami wykonującymi ponad 100 misji. Koszt wyniesienia ładunku poniesiony przez NASA na podstawie zamówień od dostawców wynosił jednak 78 436 dolarów za kilogram.²⁹ Jones formułuje zagadkę wprost: „ponowne wykorzystanie rakiet i pojazdów nośnych, najbardziej oczekiwana metoda obniżania kosztów, jak dotąd faktycznie nie obniżyło kosztów i prawdopodobnie przyczyniło się do niezwykle wysokich kosztów eksploatacji programu Space Shuttle”.³⁰ Falcon 9, latający jako jednorazowy przed 2015 rokiem, był już znacznie tańszy. Ponowne wykorzystanie nie obniżyło kosztów programu Space Shuttle, natomiast w przypadku systemu Falcon 9 wiązało się z inną strukturą ekonomiczną. Kluczowe pytanie brzmi, jaki mechanizm ekonomiczno-rynkowy może wyjaśnić tę różnicę.

Odpowiedzią wydaje się być wolumen startowy. Gatti i D’Ottavio, opierając się

²⁶O. E. Williamson, op. cit.

²⁷F. Lafontaine, M. Slade, *Vertical Integration and Firm Boundaries: The Evidence*, „Journal of Economic Literature”, Vol. 45, No. 3, 2007.

²⁸SpaceX, *Falcon 9 First Stage Landing*, 2025.

²⁹H. W. Jones, op. cit., przeliczono na dolary z 2024 r.

³⁰Tamże.

na Lionnet i Cuellar, identyfikują próg rentowności na poziomie od sześciu do dziewięciu startów rocznie.³¹ Poniżej tego progu koszty stałe opracowania systemów wielokrotnego użytku nie są w stanie zamortyzować się na wystarczającej liczbie lotów. Space Shuttle wykonywał średnio pięć startów rocznie przez trzydzieści lat.³² W 2024 SpaceX miało okazję wynieść swoje rakiety 134 razy.³³

Pozostaje jednak kluczowe pytanie, skąd wziął się ten wolumen? Odpowiedzią jest system globalnego internetu satelitarnego o nazwie Starlink. W 2024 roku około 70 procent ze 134 startów SpaceX umieszczało na orbicie satelity Starlink.³⁴ Prospekt S-1/A pokazuje ten mechanizm szerzej w kategorii startów wewnętrznych: w 2025 roku 122 ze 165 startów rakiet Falcon miały charakter wewnętrzny, a w pierwszym kwartale 2026 roku było to 33 z 40 startów.³⁵ „Wysoka częstotliwość startów SpaceX jest napędzana przede wszystkim przez system Starlink, a nie przez ogólny popyt komercyjny”, zauważają Gatti i D’Ottavio.³⁶ Przedsiębiorstwo wynosi satelity Starlink po 2500 dolarów za kilogram. Konkurencja, OneWeb, korzystając z tradycyjnych dostawców wynosi swoje satelity na orbitę po 14 000 dolarów za kilogram.³⁷ Integracja sprzyjała obniżeniu kosztów satelitów, tańsze satelity zwiększyły wolumen, a wolumen poprawił opłacalność ponownego wykorzystania rakiet. SpaceX w znacznym stopniu stworzyło własny rynek startów, a następnie obsłużyło go swoimi raketami.

System Starlink jest przykładem integracji po stronie popytu. Rozróżnienie to ma ważne znaczenie analityczne.

Ekonomia kosztów transakcyjnych tradycyjnie zajmuje się decyzjami w górę łańcucha wartości, czyli wyborem między budową własnych silników a nabywaniem ich od zewnętrznych dostawców. Jednakże ta sama logika ma zastosowanie w dół łańcucha wartości. Dostawca usług wynoszenia ładunków na orbitę zależny od komercyjnych klientów satelitarnych narażony jest na ryzyko szantażu po stronie ładunku. Klienci mogą opóźniać zamówienia, renegejować ceny lub korzystać z konkurencyjnych usług. Niepewność popytu pogłębia problemy z odzyskiwaniem kosztów stałych. Spostrzeżenie Williamsona, że integracja pozwala na „adaptację w sposób sekwencyjny bez konieczności konsultowania, uzupełniania czy rewizji umów między przedsiębiorstwami”, stosuje się do relacji z klientami, w taki sam sposób jak do relacji z dostawcami.³⁸

SpaceX ograniczyło niepewność po stronie popytu, stając się swoim własnym klientem. Satelity Starlink wypełniają okna startowe, które w przeciwnym razie zależałyby

³¹M. Gatti, A. D’Ottavio, op. cit., s. 88; P. Lionnet, A. Cuellar, *The Economics of Space Transportation: Reusability and Beyond*, Eurospace, 2021.

³²M. Weinzierl, op. cit., s. 17.

³³SpaceX, op. cit.

³⁴Tamże.

³⁵Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

³⁶M. Gatti, A. D’Ottavio, op. cit., s. 90–91.

³⁷Tamże.

³⁸O. E. Williamson, op. cit., s. 253.

od zewnętrznych kontrahentów. Harmonogramy startów odpowiadają na wewnętrzne cele produkcyjne, a nie wyłącznie na negocjacje z klientami. Przedsiębiorstwo, które buduje raketę, tworzy również jej ładunek, ograniczając koszty transakcyjne występujące po obu stronach rozdrobnionego łańcucha wartości.

Podsumowując, mechanizmy te mogą wzmacniać się wzajemnie. Integracja sprzyja uczeniu się, uczenie ułatwia ponowne wykorzystanie, wykorzystanie zwiększa wolumen, a wolumen przyspiesza uczenie się wewnątrz organizacji. Sekcja 2.5 pracy formalizuje ten czterocząłowy system i wyjaśnia, dlaczego tradycyjne zamówienia publiczne realizowane przez NASA mogły zakłócać jego działanie na poszczególnych etapach.

1.1.5. Wyzwanie identyfikacyjne

Wśród nowoczesnych systemów wielokrotnego użytku, wczesnooperacyjnych obserwacji oraz projekcji ujętych w zbiorze integracja pionowa i ponowne wykorzystanie są bardzo silnie skorelowane. Każdy z tych przypadków w zbiorze 42 systemów raketowych wykazuje integrację pionową na poziomie 80 procent lub wyższym:³⁹ Falcon 9 (80%), Falcon Heavy (80%), New Glenn (80%), Starship (85%). Jedynym wyjątkiem w szerszej kategorii częściowej odzyskiwalności jest Space Shuttle, który był systemem częściowo odzyskiwalnym o niskiej integracji pionowej.

Występowanie współliniowości odzwierciedla również charakter technologii. W dostępnych danych nie występuje ekonomicznie udana wielorazowość bez wcześniejszego wystąpienia wysokiej integracji. Iteracyjny rozwój, którego ponowne wykorzystanie wymaga, a więc testowanie, które turbopompy przetrwają powrót do atmosfery ziemskiej i które osłony termiczne tolerują powtarzane naprężenia termiczne, wymaga wiedzy ukrytej, którą łatwiej gromadzi zintegrowana produkcja i częste loty. Przedsiębiorstwo wynoszące rakiety jednorazowe ma ograniczone możliwości uczenia się, które komponenty przetrwają ponowny lot, ponieważ nie podejmuje takich prób w rutynowej eksploatacji.

Rozdział 2 sprawdza empirycznie, czy wyższy poziom integracji pionowej jest związany z niższą ceną za kilogram. Analiza nie może jednak oddzielnie zidentyfikować efektu ponownego wykorzystania, ponieważ wielorazowość nie zmienia się niezależnie od integracji wśród rakiet, które ją osiągnęły. Porównanie opisowe pokazuje skalę różnicy między zintegrowanym systemem wielorazowym a alternatywami jednorazowymi, natomiast regresja prezentuje, co integracja przewiduje dla systemów raketowych w próbie. Żadne z tych podejść nie identyfikuje parametrów strukturalnych pozwalających na analizę kontrfaktyczną nisko zintegrowanych systemów wielokrotnego użytku.

³⁹Klasyfikacja na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1; dokumentacja źródeł cenowych znajduje się w Tabeli A.2; por. także Tabela 2.10.

Praca uwzględnia to ograniczenie i jasno je dokumentuje. Dane są zgodne z mechanizmem sekwencyjnym: integracja zachowuje uczenie się, uczenie się ułatwia wielorazowość, a wielorazowość wiąże się z możliwością oferowania niższej ceny za kilogram przy odpowiednim wolumenie startów. Ta kolejność jest zgodna z interpretacją przyczynową, ale nie stanowi jej dowodu. Zrozumienie, dlaczego te innowacje pojawiły się w SpaceX, a nie w ramach ugruntowanego przemysłu kosmicznego, wymaga zbadania struktur instytucjonalnych, które rządziły amerykańskim przemysłem kosmicznym przez pięćdziesiąt lat.

1.2. Tło instytucjonalne

Niniejsza sekcja dokonuje syntezy prac Weinzierla, Jonesa i Rogersona w celu udokumentowania transformacji instytucjonalnej: od zamówień typu koszt plus marża do kontraktowania komercyjnego.⁴⁰ Narracja pochodzi z prac powyższych autorów, natomiast synteza i zastosowanie tych ustaleń do ram uczenie-integracja-wielorazowość stanowią element analityczny niniejszej pracy.

1.2.1. Era koszt plus marża

Wykonawcy rządowi funkcjonują w specyficznej relacji z klientem, który może finansować projekty mimo bardzo wysokich kosztów. Struktura instytucjonalna amerykańskiego lotnictwa kosmicznego wzmacniała ten mechanizm. Gdy Związek Radziecki wystrzelił Sputnika w 1957 roku, Stany Zjednoczone odpowiedziały programem kryzysowym, który przedkładał szybkość i możliwości nad koszty. NASA, założona w 1958 roku, przyjęła podejście kontraktów koszt plus marża, które Rogerson dokumentuje w zamówieniach obronnych.⁴¹ Dominującym typem kontraktu był koszt plus marża: rząd zwracał koszty wykonawcy i doliczał procentowy zysk. Struktura ta miała uzasadnienie, gdy rząd musiał zmobilizować przemysł prywatny do bezprecedensowych wyzwań technicznych w warunkach ekstremalnej niepewności. Miała natomiast znacznie słabsze uzasadnienie pięćdziesiąt lat później, gdy wyzwania związane z lotami orbitalnymi i misjami w głębi kosmosu stały się lepiej zrozumiane.

Rogerson analizuje, w jaki sposób zamówienia oparte na kosztach tworzą systematyczne nieefektywności. W ramach wyceny koszt plus marża kontrahenci mają ograniczone zachęty do redukcji kosztów. Ich zyski wynikają z poziomu kosztów, a nie z ich redukcji. Rząd instruuje przedsiębiorstwa odpowiadające za wykonywanie kontraktów, że „ich zadaniem nie jest uzyskanie najniższej ceny. Przepisy wyjaśniają natomiast szczegó-

⁴⁰M. Weinzierl, op. cit.; H. W. Jones, op. cit.; W. P. Rogerson, *Economic Incentives and the Defense Procurement Process*, „Journal of Economic Perspectives”, Vol. 8, No. 4, 1994.

⁴¹W. P. Rogerson, op. cit.

łowo, jak obliczyć uczciwą cenę na podstawie szacowanych kosztów”.⁴² Mechanizm ten zakłada standardowe bodźce rynkowe. Efektywność może zmniejszać przychody wykonawcy, ponieważ przedsiębiorstwo, które odkrywa tańszą metodę produkcji, często uzyskuje niższą refundację kosztów. Struktura zachęt ekonomicznych kumuluje się w czasie i wpływa na rutyny organizacyjne. Rogerson dokumentuje, że renegocjacja często przekształca kontrakty ze stałą ceną w porozumienia o podziale kosztów, przy średnich wzrostach cen o 31,3 procent w trakcie trwania kontraktów.⁴³ Dostawcy technologii lotniczej wykorzystywali reguły alokacji kosztów ogólnych, przesuwając koszty między programami. Dla głównych przedsiębiorstw przemysłu kosmicznego poniesienie jednego dolara nadmiarowych kosztów pracy na kontrakcie obronnym z jednego źródła zwiększało przychody przedsiębiorstwa o 1,20 do 1,50 dolara.⁴⁴ System zamówień tworzył rodzaj presji selekcyjnej: wykonawcy odkrywający tańsze metody obserwowali spadek przychodów, podczas gdy wykonawcy tolerujący wyższe koszty utrzymywali strumienie przychodów.

Rozproszenie geograficzne wzmacniało te dynamiki. NASA i Departament Obrony rozmieszczały kontrakty w okręgach kongresowych w celu budowy poparcia politycznego. Program Space Shuttle opierał się na ponad 1500 aktywnych dostawcach, z których ponad 230 klasyfikowano jako krytyczne pojedyncze źródła, dla których „nie istniał żaden bezpośredni lub natychmiastowy zamiennik”.⁴⁵ To rozdrobnienie ograniczało efekty uczenia się napędzające redukcję kosztów. Żaden pojedynczy zakład nie gromadził wystarczającego wolumenu produkcji, aby łatwo przesunąć się w dół krzywej doświadczenia. Inżynierowie u jednego wykonawcy nie mogli łatwo dzielić się wiedzą z inżynierami w innym przedsiębiorstwie. Każda interakcja między organizacjami tworzyła koszty transakcyjne i zwiększała ryzyko błędów. Gdy GAO przeprowadziło audyt przejścia do programu Constellation, stwierdzono, że średnie koszty złagodzenia utraty jednego dostawcy, obejmujące kwalifikację alternatywnych dostawców, przeprojektowanie komponentów i zarządzanie przejściem, wahały się od 200 000 do 700 000 dolarów na dostawcę.⁴⁶

1.2.2. Dziedzictwo Space Shuttle

Space Shuttle miał uczynić podróże kosmiczne rutyną, lecz tak się jednak nie stało. Zaprojektowany jako system wielorazowy w celu obniżenia kosztów, nie osiągnął ani niezawodności, ani ekonomiczności. Program kosztował około 220 miliardów dolarów prze-

⁴²Tamże, s. 69.

⁴³Tamże, s. 67.

⁴⁴Tamże, s. 82.

⁴⁵U.S. Government Accountability Office, *NASA Supplier Base: Challenges Exist in Transitioning from the Space Shuttle Program to the Next Generation of Human Space Flight Systems*, GAO-07-940, 2007, s. 1.

⁴⁶Tamże, s. 15.

licząc na ceny z 2017 roku.⁴⁷ Koszty wysłania kilograma na niską orbitę okołozemską wyniosły 78 436 dolarów.⁴⁸ Space Shuttle zrealizował 135 misji w ciągu 30 lat, mniej niż pięć rocznie.⁴⁹ Zbyt mało, aby umożliwić wystąpienie znaczących efektów uczenia się. Weinzierl wypowiada się wprost: Space Shuttle „uosabiał podatności centralizacji: koszty przekraczały oczekiwania, osiągi rozczarowywały, a dobra publiczne były przedkładane nad priorytety komercyjne”.⁵⁰ Tysiące indywidualnie dopasowanych płytek termicznych wymagało ręcznej inspekcji między lotami, co podważa hipotezę wielorazowości systemu. Architektura systemu w tej konfiguracji tworzyła koszty, zamiast je redukować.

W czasie programu doszło również do tragedii, i dwie katastrofy zabiły czternastu astronautów.⁵¹ Komisja Badająca Katastrofę Columbia stwierdziła, że „kultura organizacyjna i struktura NASA miały tyle samo wspólnego z tą katastrofą, co piana ze zbiornika zewnętrznego”.⁵² Komisja udokumentowała „normalizację dewiacji”: piana odpadała przy 80 procentach lotów, lecz każdy sukces interpretowano jako dowód, że problem jest akceptowalny, nie jako dowód skumulowanego ryzyka.⁵³ Rozdrobniona struktura wykonawców tworzyła bariery komunikacyjne. Boeing działał jako główny kontrahent, United Space Alliance obsługiwało statek, a nakładające się odpowiedzialności rozpraszały rozliczalność i zwiększały ryzyko, gdy w pojedynczych systemach występowały nieprawidłowości.⁵⁴ Space Shuttle został wycofany w 2011 roku bez gotowego następcy, a jego całkowity koszt okazał się znacznie wyższy niż koszt alternatywnych systemów jednorazowych analizowanych przez Jonesa.

1.2.3. Zwrot komercyjny

NASA zainicjowała program Commercial Orbital Transportation Services (COTS) w 2006 roku w następstwie katastrofy Columbia i późniejszej decyzji o wycofaniu Space Shuttle. COTS oznaczał wyraźne odejście od zamówień typu koszt plus marża i stanowi użyteczny przypadek zmiany instytucjonalnej. NASA miała płacić stałe ceny za wykazane możliwości zamiast zwracać koszty. Przedsiębiorstwa zachowywały własność intelektualną i uprawnienia projektowe. NASA określała wymagania funkcjonalne, a nie projekty pojazdów, co pozwalało wykonawcom wybierać własne rozwiązania techniczne. Skala różnicy była znaczna. Model kosztowy NAFCOM NASA, skalibrowany do tradycyjnej kultury przemysłu kosmicznego, przewidywał, że rozwój Falcon 9 będzie wymagał nakła-

⁴⁷M. Weinzierl, op. cit., s. 17.

⁴⁸H. W. Jones, op. cit., przeliczono na dolary z 2024 r.

⁴⁹M. Weinzierl, op. cit.

⁵⁰Tamże, s. 17.

⁵¹Columbia Accident Investigation Board, *Report*, Vol. 1, 2003.

⁵²Tamże, s. 177.

⁵³Tamże, s. 122.

⁵⁴Tamże, s. 102–105.

dów 3,977 miliarda dolarów.⁵⁵ SpaceX ukończyło go za 390–443 miliony dolarów, około 89 procent poniżej tradycyjnego oszacowania. To porównanie łączy wiele mechanizmów: kulturę rozwoju, strukturalne zachęty kontraktowe, innowacyjność siły roboczej i strukturę zarządzania. Rozbieżności nie można przypisać żadnemu pojedynczemu czynnikowi. Jej wielkość sugeruje jednak, że różnice organizacyjne miały istotne znaczenie.

Komercyjne dostawy ładunków rozpoczęły się w 2012 roku.⁵⁶ Początkowo kapsuła SpaceX Dragon dostarczała ładunki na ISS po 89 000 dolarów za kilogram, zaś Cygnus przedsiębiorstwa Orbital ATK kosztował 135 000 dolarów za kilogram.⁵⁷ Były to pierwsze wersje nowych systemów, ale ich wyniki wskazywały na potencjał komercyjnych lotów kosmicznych. Skoro prywatne przedsiębiorstwa były w stanie osiągnąć ceny zbliżone do poziomu kosztów programu Space Shuttle, model komercyjny mógł stać się podstawą dalszej redukcji kosztów wynoszenia ładunków na orbitę. Uproszczony nadzór NASA zredukował koszty zarządzania z 13 procent wartości zamówienia w tradycyjnych programach do 5 procent w ramach COTS.⁵⁸ Program załogowych lotów komercyjnych rozszerzył ten model: rozwój statku Dragon 2 przedsiębiorstwa SpaceX kosztował 2,2 miliarda dolarów; CST-100 Boeinga kosztował 3,3 miliarda dolarów.⁵⁹ Konkurencja między dostawcami, nieobecna w erze Space Shuttle, wydaje się poprawiać efektywność.

1.2.4. Mechanizmy zmiany instytucjonalnej

Wyższa efektywność zamówień komercyjnych w porównaniu z reżimem koszt plus marża wynikała przede wszystkim ze struktury kontraktów. Kontrakty ze stałą ceną zmieniły rozkład ryzyka kosztowego. Gdy SpaceX ponosiło to ryzyko, każdy zaoszczędzony dolar zwiększał zysk. Innowacja techniczna tworzyła długoterminową wartość dla właścicieli i pracowników spółki. Stało to w kontraście z reżimem kontraktów koszt plus marża, w ramach którego każdy zaoszczędzony dolar mógł zmniejszać przychody. Różnica 89 procent między oszacowaniami NAFCOM a rzeczywistymi wydatkami SpaceX odzwierciedla głęboką zmianę struktury zachęt finansowych, choć porównanie łączy wiele czynników. Konkurencja rynkowa uwidoczniła i wzmocniła ten efekt. NASA wybrała wiele przedsiębiorstw, tworząc alternatywy na wypadek niepowodzenia jednego z nich. Przedsiębiorstwa, które nie były w stanie dostarczyć technologii, rakiet i statków kosmicznych w ramach kosztów i harmonogramu, ryzykowały utratę przyszłych kontraktów. Space Shuttle nie podlegał takiej presji, ponieważ był jedyną amerykańską

⁵⁵NASA, *Commercial Market Assessment for Crew and Cargo Systems Pursuant to Section 403 of the NASA Authorization Act of 2010*, 2011.

⁵⁶NASA, *Commercial Orbital Transportation Services: A New Era in Spaceflight*, NASA/SP-2014-617, 2014.

⁵⁷E. Zapata, *An Assessment of Cost Improvements in the NASA COTS/CRS Program and Implications for Future NASA Missions*, NASA Kennedy Space Center, 2017.

⁵⁸Tamże.

⁵⁹Tamże.

opcją załogowych lotów kosmicznych przez trzydzieści lat. Gatti i D'Ottavio zauważają, że „USA zdecydowały się inwestować w rozwój tego rynku, co podkreśla kontrastujące kultury ryzyka” między podejściem amerykańskim a europejskim.⁶⁰ Popyt komercyjny wykraczający poza NASA również odegrał rolę. SpaceX wynosiło satelity komercyjne, budowało system internetu satelitarnego Starlink, a także obsługiwało Departament Obrony Stanów Zjednoczonych. Szacuje się, że program COTS zachęcił 1,4 dolara prywatnych inwestycji na każdego dolara wydanego przez NASA i stworzył nowoczesny przemysł kosmiczny w USA.⁶¹ Reformy zamówień poprzedziły redukcję kosztów udokumentowane w niniejszej pracy. Kontrakty ze stałą ceną zwiększyły opłacalność integracji pionowej, pozwalając przedsiębiorstwom zachowywać zyski z efektywności. Popyt komercyjny wyniósł częstotliwość startów powyżej progu, przy którym technologia ponownego wykorzystania rakiet staje się ekonomiczna. Zmiana instytucjonalna była więc warunkiem sprzyjającym zmianie technologicznej.

⁶⁰M. Gatti, A. D'Ottavio, op. cit.

⁶¹E. Zapata, op. cit.

ROZDZIAŁ 2. ANALIZA EMPIRYCZNA CEN, INTEGRACJI I WIELORAZOWOŚCI RAKIET NOŚNYCH

W 2026 roku katalogowa cena startu rakiety Falcon 9 wynosi 3364 dolary za wyniesienie kilograma ładunku na niską orbitę okołozemską, łącznie 74 miliony dolarów za start i 22 000 kg maksymalnej ładowności LEO.⁶² Trzy dziesięciolecia wcześniej większość rakiet nośnych kosztowała od 15 000 do 20 000 dolarów za kilogram.⁶³ Space Shuttle wypadał jeszcze drożej: 78 436 dolarów za kilogram (wszystkie wartości w dolarach z 2024 r., poza aktualizacją ceny rakiety Falcon 9 do ceny katalogowej obowiązującej do 2026 r.).⁶⁴ SpaceX osiągnęło poziom cenowy, którego wcześniejsze programy finansowane przez rząd nie uzyskiwały.

Pytanie badawcze dotyczy mechanizmów organizacyjnych i ekonomicznych, które pomagają wyjaśnić tę różnicę cenową oraz wskazać jej najbardziej prawdopodobne źródła instytucjonalne.

Rozdział 1 przedstawił trzy mechanizmy mogące to wyjaśnić: krzywe uczenia obniżają koszty poprzez powtarzalność, ekonomia kosztów transakcyjnych wskazuje, kiedy przedsiębiorstwa powinny internalizować produkcję zamiast zlecać ją na zewnątrz, a progi wielorazowości określają, kiedy odzyskiwanie członów rakiet ma podstawę ekonomiczną. Każdy z tych mechanizmów działa jednak dopiero w określonych warunkach. SpaceX wydaje się je spełniać w większym stopniu niż większość konkurentów.

Przedstawione dalej rozważania określają potencjalne mechanizmy, lecz nie stanowią identyfikacji przyczynowej. Rozdział dokumentuje sekwencję zdarzeń i łączy zaobserwowane wzorce z przewidywaniami teoretycznymi. Zebrane dane są zgodne z przyjętymi ramami teoretycznymi, jednak wymagają dopuszczenia alternatywnych wyjaśnień. Dlatego wnioski należy interpretować jako analizę zależności, a nie jako pełny dowód przyczynowości.

Argumentacja rozwija się w następującej sekwencji. Integracja pionowa może

⁶²SpaceX, *Capabilities & Services*, 2026, <https://www.spacex.com/assets/media/Capabilities%26Services.pdf>.

⁶³H. W. Jones, *The Recent Large Reduction in Space Launch Cost*, 48th International Conference on Environmental Systems, ICES-2018-81, 2018, s. 2: „od 1970 do 2000 r. średni koszt startu wynosił 18,5 tys. dol./kg, przy typowym zakresie od 10 do 32 tys. dol./kg”, przeliczono na USD z 2024 r.

⁶⁴Jones, op. cit., Appendix A, 61 720 dol./kg w dolarach z 2018 r. przeliczono na USD z 2024 r.

sprzyjać zatrzymaniu wiedzy wewnątrz przedsiębiorstw. Inżynierowie zachowują tę wiedzę i mogą wykorzystać ją do opracowania rakiet wielorazowego użytku. Wielorazowość zwiększa następnie potencjalny wolumen startów przyspieszający uczenie się. Żaden z tych elementów nie działa jednak bez popytu. SpaceX wytworzyło znaczną część własnego popytu, budując system internetu satelitarnego Starlink. Tradycyjni dostawcy, ograniczeni kontraktami typu koszt plus marża (*cost-plus*) i politycznymi ograniczeniami, mieli mniejsze możliwości powielenia tej sekwencji.

Struktura dalszej części rozdziału przedstawia się następująco. Podrozdział 2.1 obejmuje dane i metody. Podrozdział 2.2 dokumentuje, jak w praktyce wygląda integracja pionowa SpaceX. Podrozdział 2.3 przedstawia dane przekrojowe. Podrozdział 2.4 omawia ekonomikę wielorazowości. Podrozdział 2.5 formalizuje pętlę wzmacniającą. Podrozdział 2.6 śledzi mechanizmy poprzez studia przypadków. Podrozdział 2.7 prezentuje pełny zbiór danych.

2.1. Dane i metody

2.1.1. Źródła danych

Analiza obejmuje 42 rakiety nośne z 13 krajów na przestrzeni czterech dziesięcioleci (1981–2026). Dane cenowe pochodzą z dokumentów kontraktowych NASA, audytów rządowych GAO, dokumentacji FAA, raportów ESA, ujawnień JAXA, publikacji ISRO, zgłoszeń SEC, w tym prospektu S-1/A SpaceX z czerwca 2026 roku, oraz oświadczeń spółek. Gdy źródła były ze sobą sprzeczne, pierwszeństwo przyznawano kontraktom rządowym przed szacunkami branżowymi, a szacunkom branżowym przed projekcjami.

Historyczne ceny, dla których źródła podawały wartości z wcześniejszych lat, przeliczono na USD z 2024 r. przy użyciu CPI-U; wyjątkiem od tej bazy porównania jest aktualna katalogowa cena Falcon 9, przyjęta nominalnie z dokumentu SpaceX obowiązującego do 2026 r. Ma to duże znaczenie dla porównywalności danych nominalnych z różnych okresów. Wartość 54 500 dol./kg dla Space Shuttle z pracy Jonesa (2018) wzrasta do 78 436 dol./kg w dolarach z 2024 r. Pominięcie korekty inflacyjnej zaniżałoby historyczne ceny w ujęciu realnym.

Wiarygodność danych sklasyfikowano według czterech poziomów jakości, stosowanych konsekwentnie w kolumnie „Źr.” Tabeli A.1 oraz rozwiniętych w Tabeli A.3:

- Poziom 1: Ceny katalogowe publikowane przez spółki, dokumenty użytkownika ładunku albo wartości zweryfikowane w sprawozdaniach finansowych. Poziom ten przypisano wtedy, gdy cena startu pochodzi bezpośrednio od operatora lub z dokumentu raportowanego przez spółkę.
- Poziom 2: Wartości kontraktów rządowych, oficjalne raporty agencji publicznych albo dokumenty instytucjonalne. Poziom ten stosowano, gdy cena wynikała z zamówienia.

wienia publicznego, raportu NASA, GAO, JAXA, ISRO, KARI albo analogicznego źródła urzędowego.

- Poziom 3: Szacunki branżowe, dane operatorów o ograniczonej przejrzystości albo wartości rekonstruowane z kilku źródeł. Poziom ten oznacza większą niepewność, ale nie projekcję technologiczną.
- Poziom 4: Projekcje dla rakiet nieposiadających dojrzałej ceny operacyjnej. Poziom ten służy wyłącznie do scenariuszy porównawczych i nie powinien być interpretowany jako zrealizowana cena rynkowa.

Większość rakiet w próbie mieści się w poziomach 1–2. Ariane 6 i rakietą New Glenn opierają się na szacunkach poziomu 3, a rakietą Starship jest projekcją poziomu 4, ponieważ pełne dane operacyjne nie są jeszcze dostępne. Rakietą New Glenn jest wcześniejsza obserwacja wielorazowości pierwszego stopnia, a nie dojrzałym systemem cenowym porównywalnym z rakietą Falcon 9. Ceny chińskie i rosyjskie obarczone są większą niepewnością ze względu na potencjalne dotacje państwowe, ograniczoną przejrzystość oraz trudność oddzielenia ceny katalogowej od rzeczywistego kosztu świadczenia usługi. Pełne uzasadnienie przypisania każdej rakiety do poziomu źródła zamieszczono po dokumentacji cenowej.

2.1.2. Definicje zmiennych

Zmienna zależna: Logarytm wskaźnika ceny za kilogram na niską orbitę okołoziemską. Wskaźnik obliczono jako katalogową, kontraktową albo szacowaną cenę dedykowanego startu podzieloną przez deklarowaną maksymalną ładowność LEO. Nie jest to obserwowana cena faktycznie wyniesionego kilograma w konkretnej misji, lecz porównywalny wskaźnik cenowy oparty na publicznie dostępnych parametrach rakiet. Wartość ta mierzy cenę lub szacowaną cenę usługi startowej, a nie bezpośredni koszt produkcji. Transformacja logarytmiczna niweluje prawostronną asymetrię rozkładu i pozwala interpretować współczynniki jako zmiany procentowe.

Zmienne objaśniające:

- *Integracja pionowa* (VI, od ang. *vertical integration*): Przybliżony odsetek głównych podsystemów kontrolowanych lub produkowanych wewnętrznie (zakres od 10–95%). Oszacowanie opiera się na ujawnieniach przedsiębiorstw, raportach branżowych i dokumentacji łańcucha dostaw, z uwzględnieniem przede wszystkim silników, struktur, awioniki, oprogramowania, operacji startowych i kontroli integracji systemowej. Wskaźnik ma charakter porządkowy i przybliżony, nie audytowy: SpaceX plasuje się na poziomie 80–85%; Arianespace około 60%; ULA między 30–50%; ISRO około 90%.

- *Wielorazowość*: Wskaźnik kategoriyczny (0/0,5/1). Operacyjne odzyskiwanie i ponowny lot pierwszego stopnia otrzymuje wartość 1. Częściowa wielorazowość, jak w przypadku programu Space Shuttle czy rakiety Electron, otrzymuje 0,5. Rakiety czysto jednorazowe otrzymują 0. Kategoria 0,5 oznacza wyłącznie niepełny zakres odzysku lub ponownego użycia i nie zakłada technologicznej równoważności programu Space Shuttle oraz rakiety Electron. „Wielorazowość” oznacza tu odzyskanie i ponowny lot pierwszego stopnia rakiety, nie pełną wielorazowość obu stopni systemu; New Glenn i Starship oznaczają odpowiednio wczesnooperacyjną obserwację oraz projekcję, nie dojrzałą eksploatację w rodzaju rakiety Falcon 9.
- *Ładowność*: Logarytm maksymalnej ładowności na LEO w kilogramach. Zmienna ta kontroluje korzyści skali.

Kodowanie VI należy interpretować jako porządkowy wskaźnik kontroli nad kluczowymi aktywami, a nie jako audytowy udział kosztów wewnętrznych. Każdy system oceniono według tych samych obszarów: napędu, struktur, awioniki i oprogramowania, integracji systemowej, operacji startowych oraz kontroli nad dostawcami krytycznych komponentów. Wartości 0, 0,5 i 1 dla wielorazowości nie są liniową miarą technologii, lecz trzema klasami operacyjnymi: brak ponownego użycia, częściowe ponowne użycie lub ponowny lot pierwszego stopnia albo jego jawna projekcja w systemie wczesnooperacyjnym. Szczegółową punktację cząstkową VI dla każdej rakiety przedstawia Tabela A.4.

Tabela 2.1. Kryteria kodowania zmiennych organizacyjnych

Kryterium	Zakres punktów	Zasada kodowania
Silniki i napęd	0–25	Produkcja i projektowanie silników wewnętrznie otrzymują najwyższą ocenę; zakup silników od niezależnych dostawców obniża wynik.
Struktury i zbiorniki	0–15	Kontrola nad strukturami głównymi i zbiornikami zwiększa VI; rozproszona produkcja kontraktowa zmniejsza VI.
Awionika i oprogramowanie	0–15	Wewnętrzne projektowanie systemów sterowania, komputerów pokładowych i oprogramowania zwiększa VI.
Integracja systemowa i testy	0–20	Własne zakłady integracji, testów silników i testów systemowych zwiększają VI.
Operacje startowe	0–10	Własna obsługa platform i procedur startowych zwiększa VI.
Kontrola nad dostawcami krytycznymi	0–15	Brak zależności od pojedynczych zewnętrznych dostawców krytycznych komponentów zwiększa VI.
Wielorazowość	0/0,5/1	0 = system jednorazowy; 0,5 = częściowa wielorazowość lub odzysk wybranych komponentów, bez założenia równoważności technologicznej przypadków w tej klasie; 1 = ponowny lot pierwszego stopnia albo projekcja takiego systemu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji przedsiębiorstw, raportów branżowych i literatury wskazanej w Bibliografii.

2.1.3. Specyfikacja ekonometryczna

Specyfikacja bazowa przedstawia się następująco:

$$\log(\text{Price/kg}_i) = \alpha + \beta_1 \cdot \text{VI}_i + \beta_2 \cdot \text{Reusable}_i + \beta_3 \cdot \log(\text{Payload}_i) + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

Wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów (MNK; ang. *ordinary least squ-*

ares, OLS) z odpornymi błędami standardowymi na heteroskedastyczność (HC1). Klastrowanie według kraju lub operatora byłoby koncepcyjnie uzasadnione, ponieważ reżimy zamówień publicznych, subsydia i polityka przemysłowa mogą korelować w obrębie grup. Przy 42 obserwacjach, 13 nierównych klastrach krajowych i kilku grupach jednoobserwacyjnych taka estymacja byłaby jednak niestabilna i podatna na małą liczbę klastrów. HC1 przyjęto więc jako specyfikację bazową, natomiast zależność błędów w obrębie krajów i operatorów traktowana jest jako ograniczenie danych, a nie coś, co próba pozwala wiarygodnie oszacować.

Obliczenia statystyczne i wykresy wykonano w języku Python na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Oczekiwane znaki wszystkich współczynników są ujemne. Wyższa integracja pionowa (VI) powinna przewidywać niższą cenę za kilogram dzięki oszczędnościom na kosztach transakcyjnych i retencji wiedzy. Wielorazowość amortyzuje koszty stałe na wiele lotów. Większa ładowność pozwala osiągać korzyści skali.

2.1.4. Ograniczenia identyfikacji

W tym miejscu pojawia się zasadnicze ograniczenie identyfikacyjne. Regresja nie może oszacować scenariusza, który nie występuje w danych.

Wszystkie cztery systemy sklasyfikowane jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne w próbie mają VI na poziomie 80% lub wyższym:

- Falcon 9: VI = 80%
- Falcon Heavy: VI = 80%
- New Glenn: VI = 80% (wczesnooperacyjny szacunek)
- Starship: VI = 85% (projekcja)

W próbie nie występuje system wielorazowy o niskiej VI. Współczynnik VI jest identyfikowany przez zmienność wśród rakiet jednorazowych, gdzie VI waha się od 10% (SLS) do 95% (różne rakiety chińskie). Współczynnik wielorazowości próbuje uchwycić dodatkową wariancję na szczycie rozkładu VI, gdzie wielorazowość zaczyna występować. Przy zaledwie czterech systemach sklasyfikowanych jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne, wszystkich skupionych przy VI 80–85%, błąd standardowy jest duży.

Ta współliniowość nie jest problemem danych, który można naprawić. Odzwierciedla obecną strukturę branży: żadne przedsiębiorstwo nie osiągnęło ekonomicznie udanej wielorazowości bez uprzedniego osiągnięcia wysokiej integracji pionowej. Regresja dokumentuje związek, a porównania opisowe dokumentują wielkość różnicy. Żadne z tych podejść nie ustala jednak przyczynowości.

Interpretacja: Współczynnik VI opisuje zależność między oszacowanym poziomem integracji a wskaźnikiem ceny w całej próbie. Porównanie opisowe (relacja 8,4 do 1 dla rakiet z ponownym lotem pierwszego stopnia lub jego projekcją) pokazuje łączny efekt systemu VI-wielorazowość. Efektu łącznego nie można rozłożyć na parametry strukturalne.

2.2. Dokumentacja integracji pionowej

Istnieją dwa zasadniczo odmienne sposoby budowy rakiet kosmicznych.

W pierwszym podejściu spółka projektuje silnik, produkuje go, testuje, instaluje i przeprowadza lot. Ci sami inżynierowie, którzy projektują turbopompę, obserwują jej zachowanie w testach i misjach. W drugim podejściu przedsiębiorstwo określa wymagania, ogłasza przetargi, przyznaje kontrakty, zarządza dostawcami i integruje dostarczone komponenty.

Pierwsze podejście jest najbliższe modelowi SpaceX. Drugie opisuje tradycyjny model wielu dotychczasowych dostawców, choć poszczególne organizacje mieszczą się często między tymi biegunami.

2.2.1. Model SpaceX

SpaceX buduje rakiety w Hawthorne w Kalifornii, testuje silniki w McGregor w Teksasie i produkuje raketę Starship w Boca Chica w Teksasie.⁶⁵ Silnik Merlin napędzający raketę Falcon 9 powstał w zakładach SpaceX. Podobnie Raptor, który napędza raketę Starship. Żaden zewnętrzny kontrahent nie dostarcza silników dla SpaceX.

Podobny wzorzec występuje w większości podsystemów. Awionika, komputery pokładowe i oprogramowanie powstają wewnętrznie. SpaceX produkuje struktury rakiet w Hawthorne, a dla rakiety Starship w Boca Chica. SpaceX obsługuje także własne platformy startowe na Cape Canaveral, Vandenberg i w Boca Chica.

Dane wskazują na wysoki poziom integracji. SpaceX produkuje ponad 85 procent komponentów wewnętrznie.⁶⁶ Nowsze ujawnienie S-1/A podaje dla rakiety Starship około 80 procent produkcji wewnętrznej.⁶⁷ Guillaume Faury, dyrektor generalny Airbus, ujął europejski kontrast w 2024 roku następująco: „Produkujemy 20%, kupujemy 80%”.⁶⁸ Jones (2018) podaje, że SpaceX oszacowało, iż zlecenie produkcji na zewnątrz pomnożyłoby koszty trzy- do pięciokrotnie ze względu na narzuty i marże podwykonawców.⁶⁹ Jest

⁶⁵Berger, E. (2021). *Liftoff: Elon Musk and the Desperate Early Days That Launched SpaceX*. William Morrow.

⁶⁶Berger (2021).

⁶⁷Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

⁶⁸Reuters (2024), *Airbus CEO says SpaceX would not pass anti-trust test in Europe*.

⁶⁹Jones, H. W. (2018). „The Recent Large Reduction in Space Launch Cost.” 48th International Conference on Environmental Systems, ICES-2018-81.

to szacunek własny spółki, więc należy traktować go z rezerwą, choć porównania NASA NAFCOM między rozwojem typu koszt plus marża (*cost-plus*) a rozwojem w systemie stałej ceny (*fixed-price*) sugerują mnożniki w podobnym zakresie.

Tabela 2.2. Integracja pionowa według podsystemu

Podsystem	SpaceX	ULA	Arianespace
Silniki	Merlin, Raptor (wewnętrznie)	RD-180 (Rosja), RL-10 (Aerojet), BE-4 (Blue Origin)	Vulcain (Francja), turbopompy (Włochy)
Struktury	Zakłady Hawthorne i Boca Chica	Kontraktowane u dostawców	MT Aerospace (Niemcy)
Awionika	Projekt i produkcja wewnętrzne	Wyspecjalizowani kontrahenci	Liczni dostawcy europejscy
Oprogramowanie lotowe	Wewnętrznie	Zewnętrzni deweloperzy	Rozwój rozproszony
Operacje startowe	Platformy obsługiwane przez SpaceX	Obiekty obsługiwane przez rząd	Obsługiwane przez Arianespace (Kourou)

Źródła: Jones (2018); Berger (2021); ESA (2024); Bruno (2019); Space Exploration Technologies Corp. (2026).

2.2.2. Model tradycyjny

Program Space Shuttle zależał od ponad 1500 aktywnych dostawców, z czego ponad 230 zostało sklasyfikowanych jako krytyczni dostawcy jedyne źródła „bez bezpośredniego ani natychmiastowego zastępstwa”.⁷⁰ Zarządzanie tak rozległą bazą dostawców generowało mierzalne koszty transakcyjne. GAO (2007, s. 15) oszacował od 200 000 do 700 000 dolarów na każdego krytycznego dostawcę wyłącznie na obsługę potencjalnych zakłóceń. Pomnożenie tego przez 230 dostawców wskazuje na znaczną skalę kosztów koordynacji.

United Launch Alliance kupuje silniki BE-4 od Blue Origin do swojej rakiety Vulcan. Tory Bruno, były dyrektor generalny ULA, nazywa to modelem „*competimates*”: „Konkurujesz, mając ich jako dostawcę. Konkurujesz, będąc ich dostawcą”.⁷¹ Jest to przykład dwustronnej zależności, którą Klein, Crawford i Alchian (1978) wskazali jako źródło ryzyka szantażu (*hold-up*).⁷²

⁷⁰GAO (2007). *NASA Supplier Base: Challenges Exist in Transitioning from the Space Shuttle Program to the Next Generation of Human Space Flight Systems*. GAO-07-940, s. 1.

⁷¹Bruno, T. (2019). Wywiad na University of Central Florida.

⁷²Klein, B., Crawford, R. G., & Alchian, A. A. (1978). „Vertical Integration, Appropriable Rents, and the Competitive Contracting Process.” *Journal of Law and Economics*, 21(2), 297–326.

Arianespace koordynuje produkcję w trzynastu krajach europejskich. Francja wnosi 55,3 procent finansowania; Niemcy dokładają 21 procent; Włochy dodają 7,6 procent.⁷³ Zasada zwrotu geograficznego zapewnia, że kontrakty trafiają z powrotem do państw wnoszących wkład proporcjonalnie do ich udziałów. Uczestniczy około 600 partnerów przemysłowych.⁷⁴ Philippe Baptiste, szef CNES, wskazał na napięcie między tym modelem a konkurencyjnością: „Szybkość rozwoju i konkurencyjność są kluczowe, a to okazuje się nie do pogodzenia z fragmentacją wynikającą ze zwrotu geograficznego”.⁷⁵

2.2.3. Znaczenie integracji pionowej

Rozdział 1 przedstawił ramy teoretyczne. Produkcja rakiet spełnia warunki, które teoria kosztów transakcyjnych łączy z integracją pionową. Silniki rakietowe i infrastruktura testowa są aktywami specyficznymi dla danego systemu; kontrakty nie mogą *ex ante* opisać wszystkich reakcji na awarie turbopomp, problemy spalania lub zmiany wymagań misji; a dostawca kontrolujący krytyczny komponent może uzyskać pozycję przetargową wobec zależnego nabywcy. Przykład RD-180 uwiadamia tę podatność. Gdy ULA zależało od rosyjskich silników RD-180, a Rosja zaanektowała Krym w 2014 roku, Kongres ograniczył zakupy, a USAF finansowała alternatywne silniki w 2016 roku,⁷⁶ zmuszając ULA do szybkiego poszukiwania alternatyw. SpaceX, budując silniki wewnętrznie, nie było narażone na równoważną zależność.

2.2.4. Integracja i uczenie się

Kluczowe pytanie dotyczy miejsca, w którym gromadzi się wiedza.

Gdy inżynierowie SpaceX budują Merlin i analizują jego osiągi po locie, wiedza ukryta pozostaje w organizacji. Gdy ULA kupuje silniki, część uczenia kumuluje się u dostawcy. Rozdział 1 dokumentował, jak doświadczenie deprecjonuje się podczas przerw w produkcji. Shuttle latał średnio 4,5 razy rocznie.⁷⁷ SpaceX wystartowało 134 razy w 2024 roku,⁷⁸ a w 2025 roku rakiety Falcon wykonały 165 startów.⁷⁹ Kontrahent startujący kwartalnie ma większe ryzyko utraty wiedzy między misjami niż operator wykonujący starty co tydzień.

Związek z wielorazowością ma tu również znaczenie: zintegrowane przedsiębior-

⁷³ESA (2024). *Ariane 6 Programme Status Report*. European Space Agency.

⁷⁴ESA (2024).

⁷⁵European Spaceflight (2023), *CNES Boss on Damage Control for ArianeGroup on Ariane 6 Failures*.

⁷⁶S. Erwin, *ULA to Invest in Blue Origin Engine as RD-180 Replacement*, *SpaceNews*, 17 września 2014; S. Clark, *ULA's Candidates to Replace RD-180 Engine Win Air Force Funding*, *Spaceflight Now*, 7 marca 2016.

⁷⁷Weinzierl, M. (2018). „Space, the Final Economic Frontier.” *Journal of Economic Perspectives*, 32(2), 173–192.

⁷⁸SpaceX (2025), *Falcon 9 Launch and Landing Statistics*.

⁷⁹Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

stwo uczy się, które płytki na osłonach termalnych są najbardziej zagrożone. Wiedza ta ułatwia podjęcie decyzji o rozpoczęciu rozwoju technologii odzyskiwania członów rakiet.

Uczenie się wymaga obserwowalnych prób, testów, a niekiedy także awarii systemów.

2.2.5. Bariery integracji pionowej u tradycyjnych dostawców

Kontrakty typu koszt plus marża (*cost-plus*) odwracały część naturalnych bodźców, które prowadzą do poprawy systemu. W takim systemie efektywność mogła zmniejszać przychody.⁸⁰ SpaceX działało w systemie stałej ceny (*fixed-price*) od COTS wzwyż. Każdy zaoszczędzony dolar mógł zwiększać zysk.

Ograniczenia polityczne krępowały Arianespace. Philippe Baptiste, szef CNES, ujął problem dosadnie: ArianeGroup nie miała „pola manewru w wyborze dostawców i negocjowaniu cen”.⁸¹

Struktura *joint venture* ULA ograniczała adaptację od samego początku. Boeing i Lockheed Martin posiadają po 50 procent. Ważne decyzje wymagają zgody spółek dominujących o różnych interesach strategicznych. Bruno zdołał osiągnąć 36-procentową redukcję kosztów poprzez konsolidację.⁸² Było to istotne osiągnięcie, choć ostatecznie ograniczone.

Integracja wydaje się uchwytować oszczędności na kosztach transakcyjnych i efekty zewnętrzne uczenia się. Tradycyjni dostawcy napotykali bariery instytucjonalne, czyli bodźce kontraktowe, ograniczenia polityczne i struktury zarządzania, których SpaceX doświadczało w mniejszym stopniu. Czy integracja spowodowała przewagę SpaceX, czy też zarówno integracja, jak i niskie ceny wynikały z trzeciego czynnika, takiego jak przywództwo czy tolerancja ryzyka, dostępne dane nie pozwalają tego rozstrzygnąć.

2.3. Dane przekrojowe

W tej sekcji definicje zmiennych zostają przełożone na empiryczny obraz próby. Najpierw przedstawiono rozkład cen i podstawowe zależności dwuwymiarowe, a następnie regresje, testy odporności oraz ograniczenia wynikające z małej liczby obserwacji wielorazowych.

⁸⁰Rogerson, W. P. (1994). „Economic Incentives and the Defense Procurement Process.” *Journal of Economic Perspectives*, 8(4), 65–90.

⁸¹European Spaceflight, *CNES Boss on Damage Control for ArianeGroup on Ariane 6 Failures*, 2023.

⁸²*Smithsonian Magazine* (2018), *Tory Bruno, the Other Rocket Man*.

2.3.1. Statystyki opisowe

Tabela 2.3. Statystyki opisowe (n = 42)

Zmienna	Średnia	Mediana	Odch. std.	Min	Maks
Cena/kg (USD)	15 321	8 429	21 028	667	112 867
VI (%)	70	80	24	10	95
Ładowność LEO (kg)	17 698	8 100	27 901	300	150 000

Źródło: obliczenia własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Próba obejmuje zakres od Pegasus XL (112 867 dol./kg) do Starship (667 dol./kg). Wartość dla rakiety Starship jest projekcją, a New Glenn obserwacją wczesnooperacyjną.

65-krotna różnica między SLS (43 158 dol./kg) a rakietą Starship (667 dol./kg) pokazuje pełny zakres obserwacji między rozdrobnionymi systemami jednorazowymi a zintegrowanymi systemami wielorazowymi. Należy jednak pamiętać, że wartość dla rakiety Starship ma charakter projekcji, więc nie stanowi zrealizowanej ceny rynkowej. Dlatego Tabela 2.4 pokazuje, jak zmieniają się statystyki opisowe po wyłączeniu obserwacji projekcyjnych lub wczesnooperacyjnych.

Tabela 2.4. Statystyki opisowe po wyłączeniu obserwacji projekcyjnych

Zakres próby	<i>n</i>	Średnia	Mediana	Min	Maks
Pełna próba	42	15 321	8 429	667	112 867
Bez Starship	41	15 678	8 857	1 511	112 867
Bez Starship i New Glenn	40	16 032	8 873	1 520	112 867

Źródło: obliczenia własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

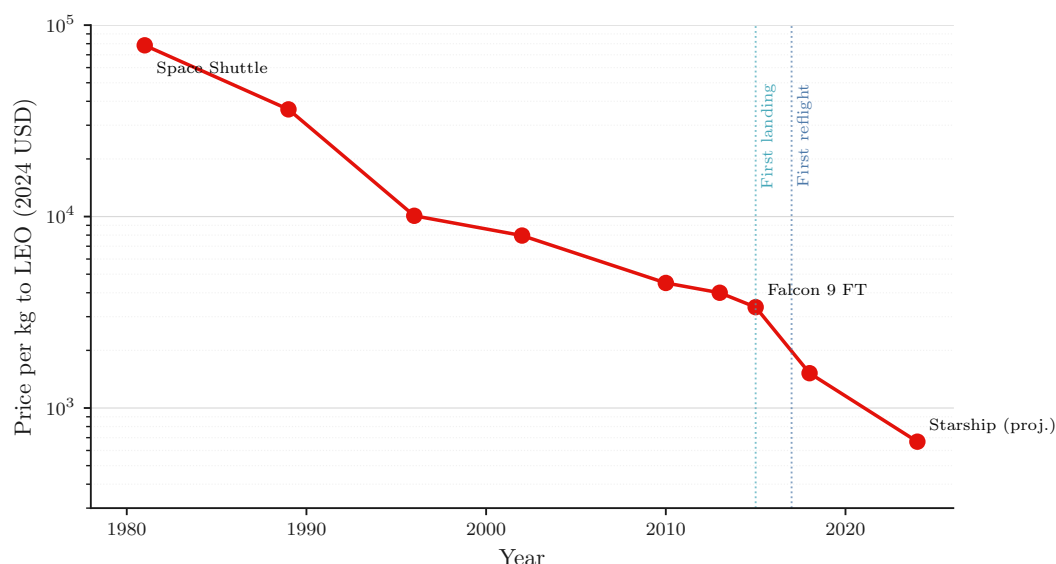
Wartości podano w USD za kg LEO. Starship ma poziom źródła 4, a New Glenn poziom 3 i status wczesnooperacyjny.

Wyłączenie rakiety Starship podnosi minimum próby z 667 do 1511 dol./kg, a jednocześnie wyłączenie rakiet Starship i New Glenn podnosi minimum do 1520 dol./kg, czyli poziomu rakiety Falcon Heavy. Oznacza to, że skrajny dolny kraniec rozkładu jest silnie zależny od obserwacji niedojrzałych, natomiast średnia i mediana pozostają w tym samym rzędzie wielkości.

Tabela 2.5. Wrażliwość projekcji rakiety Starship na założenie ładowności

Scenariusz	kg LEO	dol./kg	Śr. wiel.	Jedn./wiel.	Wsp. VI
V3 według S-1/A	100 tys.	1 000	1 849	8,0	−0,029
Scenariusz główny	150 tys.	667	1 766	8,4	−0,029
Przyszłe generacje	200 tys.	500	1 724	8,6	−0,029

Źródło: obliczenia własne w Pythonie na podstawie Tabeli A.1; cena startu rakiety Starship utrzymana na poziomie projekcyjnym 100 mln USD. Współczynnik VI pochodzi z pełnej specyfikacji MNK po ponownym przeliczeniu każdego scenariusza. Prospekt S-1/A wskazuje 100 ton dla wariantu Starship V3 i możliwe 200 ton dla przyszłych generacji, ale nie podaje operacyjnej ceny startu.



Rysunek 2.1. Ewolucja ceny za kilogram na LEO w wybranych systemach startowych (1981–2026)

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1, dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2, Jonesa (2018) oraz dokumentu SpaceX (2026).

2.3.2. Wzorce dwuwymiarowe

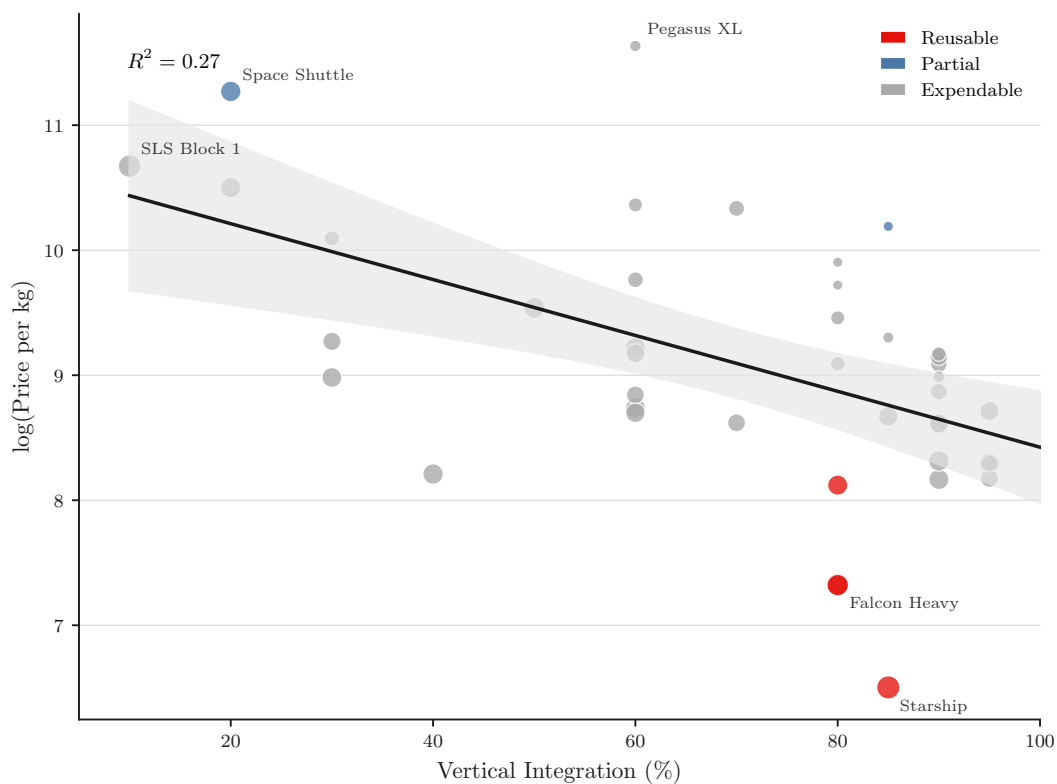
Korelacje z $\log(\text{cena/kg})$:

Tabela 2.6. Korelacje z logarytmem ceny za kilogram

Zmienna	r	p
VI (%)	-0,52	< 0,001
Wielorazowość	-0,43	0,004
log(Ładowność)	-0,49	0,001

Źródło: obliczenia własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Wszystkie trzy zmienne korelują ujemnie z ceną za kilogram, zgodnie z przewidywaniami teorii. Wyższa integracja, wielorazowość i skala wiążą się z niższymi cenami.



Rysunek 2.2. Zależność między integracją pionową a logarytmem ceny za kilogram

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Średnie grupowe według poziomu VI:

Tabela 2.7. Średnie ceny według poziomu integracji pionowej

Poziom VI	<i>n</i>	Średnia dol./kg
Wysoki ($\geq 70\%$)	26	8 630
Średni (40–70%)	10	21 841
Niski ($<40\%$)	6	33 448

Źródło: obliczenia własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Rakiety o niskiej VI mają średnio 3,9 raza wyższą cenę za kilogram niż rakiety o wysokiej VI, co stanowi znaczącą różnicę nawet przed uwzględnieniem wielorazowości.

Średnie grupowe według wielorazowości:

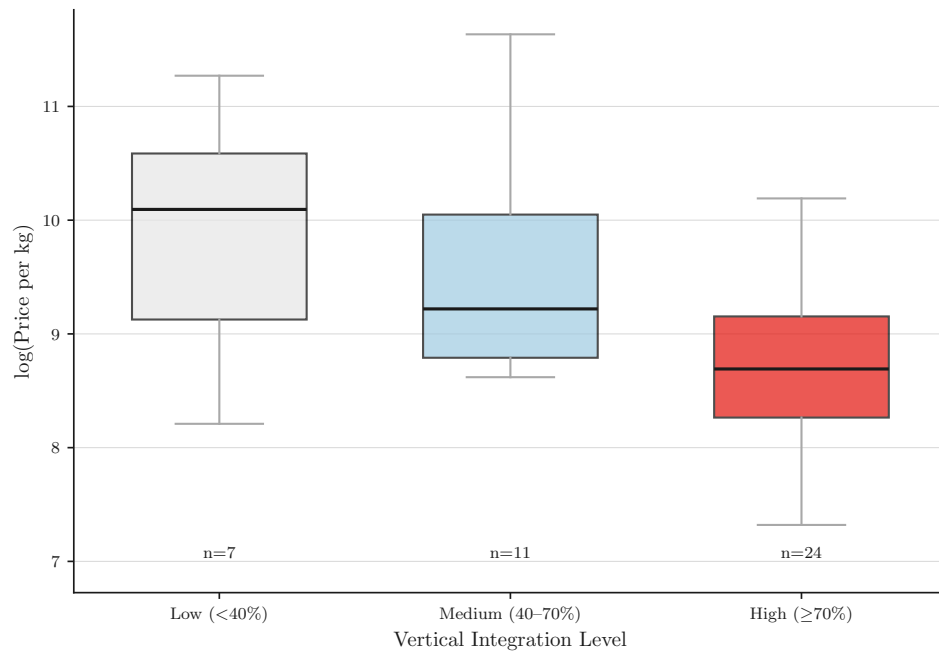
Tabela 2.8. Średnie ceny według statusu wielorazowości

Wielorazowość	<i>n</i>	Średnia dol./kg
Ponowny lot pierwszego stopnia lub projekcja	4	1 766
Bez Starship	3	2 132
Dojrzałe obserwacje Falcon	2	2 442
Jednorazowe	36	14 759

Źródło: obliczenia własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Prosta relacja średnich cen, czyli porównanie grup bez kontroli pozostałych zmiennych, wynosi 8,4 do 1 w pełnej próbie. Po wyłączeniu Starship spada do 6,9 do 1, a po ograniczeniu porównania do dojrzałych obserwacji Falcon 9 i Falcon Heavy do 6,0 do 1. Porównanie to jest jednak obciążone współwystępowaniem zmiennych: każdy system sklasyfikowany jako wielorazowy, wczesnooperacyjny lub projekcyjny ma VI co najmniej 80%, podczas gdy grupa jednorazowych obejmuje rakiety o niskiej VI (SLS przy 10%, Titan IV przy 20%). Relacje te łączą efekty integracji i wielorazowości, a w najszerszej wersji obejmują New Glenn jako obserwację wczesnooperacyjną oraz Starship jako projekcję.

Bardziej porównywalne zestawienie ogranicza się wyłącznie do rakiet o wysokiej VI. Wśród jednorazowych z $VI \geq 70\%$ średnia cena wynosi około 9079 dol./kg. Systemy sklasyfikowane jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne (wszystkie o wysokiej VI) mają średnią 1766 dol./kg, co daje relację 5,1 do 1. Po wyłączeniu rakiety Starship relacja spada do 4,3 do 1, a przy samych dojrzałych obserwacjach rakiet Falcon do 3,7 do 1. Te wartości są ostrożniejszymi miarami opisowymi, ponieważ słabiej zależą od projekcji technologicznych i różnic w poziomie integracji.



Rysunek 2.3. Rozkład logarytmu ceny za kilogram według poziomu integracji pionowej

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

2.3.3. Specyfikacje progresywne

Tabela 2.9 pokazuje, jak współczynnik VI ewoluuje wraz z dodawaniem zmiennych kontrolnych. Progresja ujawnia, które zmienne odpowiadają za wzrost siły wyjaśniającej modelu i czy VI utrzymuje swój związek z ceną za kilogram po uwzględnieniu alternatywnych mechanizmów.

Tabela 2.9. Progresywne specyfikacje MNK

Zmienna	(1)	(2)	(3)	(4)
VI (%)	–0,022 (0,007) [<0,001]	–0,030 (0,005) [<0,001]	–0,021 (0,007) [<0,001]	–0,029 (0,006) [<0,001]
log(Ładowność)		–0,416 (0,071) [<0,001]		–0,379 (0,063) [<0,001]
Wielorazowość			–1,255 (0,432) [0,004]	–0,430 (0,298) [0,148]
Stała	11,50 (0,54)	14,80 (0,78)	11,68 (0,52)	14,48 (0,76)
R^2	0,27	0,69	0,41	0,70
n	42	42	42	42

Źródło: obliczenia własne w języku Python na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2. Błędy standardowe w nawiasach okrągłych (odporne HC1). Wartości p w nawiasach kwadratowych.

Co ujawnia progresja:

Kolumna (1) pokazuje surową zależność VI-cena. Sama integracja pionowa wyjaśnia 27% wariancji logarytmu ceny za kilogram. Współczynnik –0,022 oznacza, że 10-punktowy wzrost VI przewiduje około 20% niższą cenę. Ta wartość bazowa ujmuje bezwarunkowy związek.

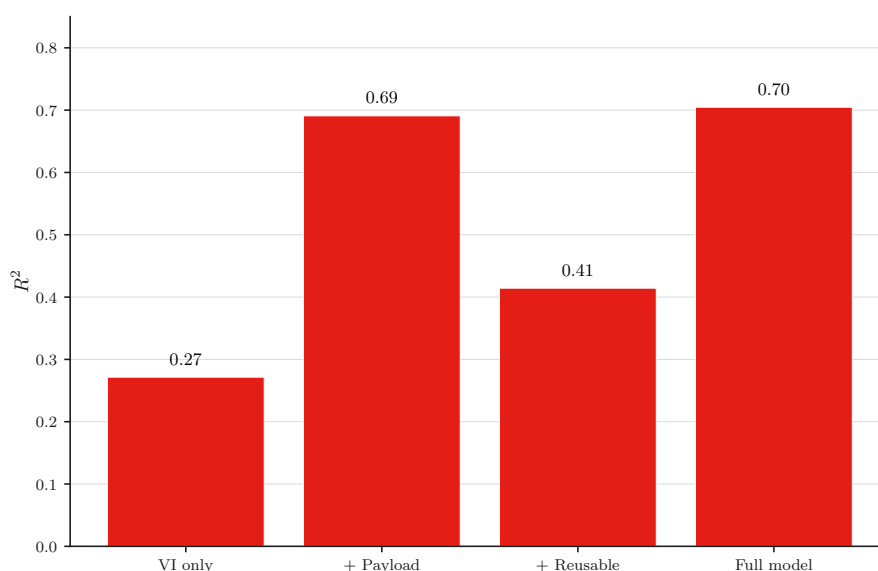
Kolumna (2) dodaje ładowność. R^2 wzrasta do 0,69, ponieważ korzyści skali wyjaśniają znaczną wariancję. Współczynnik VI zwiększa się co do wartości bezwzględnej z –0,022 do –0,030, co wskazuje, że relacja VI-cena nie jest wyłącznie artefaktem skali rakiet. Współczynnik VI pozostaje istotny przy $p < 0,001$. Integracja przewiduje niższą cenę nawet wśród rakiet o podobnej wielkości.

Kolumna (3) dodaje wielorazowość zamiast ładowności. R^2 wzrasta do 0,41, a współczynnik VI wynosi –0,021. Współczynnik wielorazowości jest duży i istotny ($p = 0,004$), ponieważ model nie kontroluje jeszcze skali. W tej specyfikacji wielorazowość absorbuje część wariancji, którą w przeciwnym razie uchwyciłaby ładowność. Współczynnik VI pozostaje istotny.

Kolumna (4) przedstawia pełną specyfikację. Z obiema zmiennymi kontrolnymi R^2 osiąga 0,70. Współczynnik VI stabilizuje się na poziomie –0,029, wciąż istotny przy $p < 0,001$. Wielorazowość traci istotność ($p = 0,148$), ponieważ koreluje zarówno z VI,

jak i z ładownością, a gdy obie są kontrolowane, niezależny wkład wielorazowości nie może być precyzyjnie oszacowany.

Główny wynik: VI przewiduje niższą cenę za kilogram we wszystkich specyfikacjach. W pełnym modelu współczynnik jest bliski wartości ze specyfikacji z kontrolą ładowności: zależność pozostaje widoczna po kontroli ładowności i statusu wielorazowości, co jest zgodne z hipotezą o znaczeniu integracji pionowej.



Rysunek 2.4. Zmiana współczynnika determinacji w kolejnych specyfikacjach MNK

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

2.3.4. Wyniki regresji: interpretacja

Interpretacja współczynników

Współczynnik VI ($-0,029$) oznacza, że 10-punktowy wzrost integracji pionowej przewiduje około 25% niższą cenę za kilogram przy stałej wielorazowości i ładowności. Przejście z 20% VI do 80% VI przewiduje 82% niższą cenę. Jest to duża różnica ekonomiczna, choć pozostaje zależnością predykcyjną, a nie dowodem przyczynowym.

Współczynnik wielorazowości ($-0,430$) jest ujemny, lecz statystycznie nieodróżnialny od zera przy konwencjonalnych poziomach istotności ($p = 0,148$). Nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej, że wielorazowość nie ma niezależnego efektu po kontroli VI. Ta nieprecyzyjność odzwierciedla współliniowość: przy zaledwie czterech rakietach z możliwością ponownego lotu pierwszego stopnia lub jego projekcją, wszystkich o VI 80% lub wyższej, regresja nie może oddzielnie zidentyfikować wkładu wielorazowości. Oszacowanie punktowe sugeruje niższą cenę, lecz przedział ufności jest na tyle szeroki, że obejmuje zero.

Współczynnik ładowności ($-0,379$) jest zgodny z korzyściami skali: podwojenie

ładowności przewiduje 23% niższą cenę za kilogram.

$R^2 = 0,70$: Siedemdziesiąt procent wariancji logarytmu ceny za kilogram wyjaśniają trzy obserwowalne charakterystyki. Jak na dane przekrojowe jest to wysoka wartość. Znaczna część zmienności cenowej wiąże się z integracją, wielorazowością i skalą.

2.3.5. Współzależność integracji pionowej i wielorazowości

Tabela 2.10. Rakiety z ponownym lotem pierwszego stopnia

Rakiet	dol./kg	VI%	Status danych
Falcon 9	3 364	80	dojrzała cena katalogowa
Falcon Heavy	1 520	80	dojrzała cena katalogowa
New Glenn	1 511	80	wczesnooperacyjny szacunek
Starship	667	85	projekcja

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

W Tabeli 2.10 nie występuje rakiet z możliwością ponownego lotu pierwszego stopnia o niskiej VI. Dwie obserwacje są jednak mniej dojrzałe niż Falcon 9 i Falcon Heavy: New Glenn pozostaje systemem wczesnooperacyjnym, a Starship jest projekcją cenową.

Macierz 2x2 porządkuje ten wzorzec:

Tabela 2.11. Macierz integracji pionowej i wielorazowości

	Niska VI (<40%)	Wysoka VI (≥70%)
Jednorazowe	SLS, Shuttle, Titan IV, Atlas V, Minotaur IV, Antares	Seria Long March, Proton, Soyuz, Angara, PSLV, LVM3, Electron, Firefly itd. ($n=26$)
Ponowny lot pierwszego stopnia lub projekcja	(puste)	Falcon 9, Falcon Heavy, New Glenn, Starship

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Pusta komórka pokazuje ograniczenie danych. W próbie nie występuje przypadek wielorazowości bez wcześniejszego osiągnięcia wysokiej VI. Regresja nie może oszacować kontrfaktycznego scenariusza, którego nie ma w danych.

2.3.6. Test odporności: tylko jednorazowe

Tabela 2.12. Tylko rakiety jednorazowe ($n = 36$)

Zmienna	Wsp.	Bł. std.	p
VI (%)	-0,024	0,005	< 0,001
log(Ładowność)	-0,298	0,088	< 0,001

Źródło: obliczenia własne w języku Python na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2. $R^2 = 0,59$.

VI przewiduje niższą cenę za kilogram nawet wśród samych rakiet jednorazowych. Zintegrowane rakiety jednorazowe (Long March 5: 4000 dol./kg, Proton-M: 3522 dol./kg) osiągają niższe ceny niż rozdrobnione systemy jednorazowe (SLS: 43 158 dol./kg, Space Shuttle: 78 436 dol./kg). Zależność VI nie jest więc wyłącznie artefaktem wielorazowości.

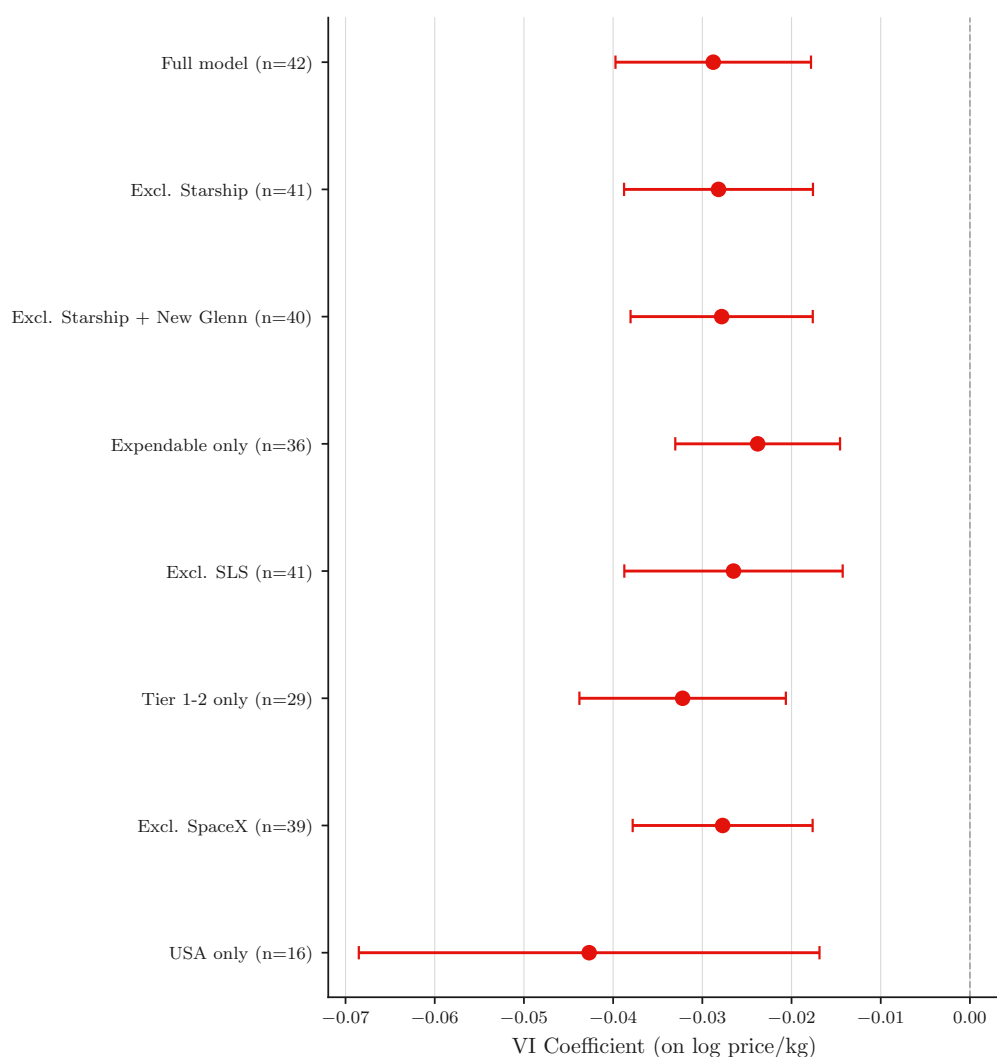
Dodatkowe testy odporności:

Tabela 2.13. Testy odporności współczynnika VI

Specyfikacja	n	Wsp. VI	Bł. std.	p	R^2
Pełna próba	42	-0,029	0,006	< 0,001	0,70
Bez Starship	41	-0,028	0,005	< 0,001	0,66
Bez Starship i New Glenn	40	-0,028	0,005	< 0,001	0,64
Z wyłączeniem SLS	41	-0,027	0,006	< 0,001	0,71
Tylko poziom 1–2	29	-0,032	0,006	< 0,001	0,67
Tylko jednorazowe	36	-0,024	0,005	< 0,001	0,59

Źródło: obliczenia własne w języku Python na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Wynik utrzymuje się we wszystkich specyfikacjach. Wyłączenie rakiety Starship oraz jednocześnie wyłączenie rakiet Starship i New Glenn obniża R^2 , ale nie zmienia znaku ani istotności współczynnika VI. Zależność nie wydaje się więc wynikać wyłącznie z obserwacji projekcyjnych, obserwacji odstających ani z różnic jakości danych.



Rysunek 2.5. Stabilność oszacowania współczynnika VI w testach odporności

Źródło: opracowanie własne na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

2.3.7. Analiza heterogeniczności

Tabela 2.14 testuje, czy zależność VI-cena różni się w podgrupach, poprzez ponowne oszacowanie specyfikacji bazowej na podpróbach określonych przez erę, region i klasę ładowności. Analiza ma charakter eksploracyjny, ponieważ część podprób jest mała, a wartości p nie powinny być traktowane jako dowód trwałych różnic regionalnych lub technologicznych.

Tabela 2.14. Heterogeniczność współczynnika VI według podgrupy

Podgrupa	<i>n</i>	Wsp. VI	wartość <i>p</i>
Przed 2015	18	−0,029	<0,001
Po 2015	24	−0,025	0,004
USA	16	−0,043	0,001
Chiny	8	−0,011	0,363
Mała nośność (<2t)	11	−0,035	0,029
Średnia nośność (2–20t)	17	−0,014	<0,001
Duża nośność (>20t)	14	−0,038	<0,001

Źródło: obliczenia własne w języku Python na podstawie zbioru danych przedstawionego w Tabeli A.1 oraz dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2.

Współczynnik VI pozostaje ujemny we wszystkich specyfikacjach, choć istotność statystyczna zmienia się wraz z wielkością próby. Według ery współczynnik jest zbliżony przed i po 2015 roku, co sugeruje, że zależność nie jest jedynie artefaktem okresu po wejściu rakiety Falcon 9 do eksploatacji.

Zróznicowanie regionalne jest bardziej wyraźne. Współczynnik jest najsilniejszy dla rakiet amerykańskich (−0,043) i najsłabszy dla rakiet chińskich (−0,011, $p = 0,363$). Dotacje państwowe mogą zaciemniać rynkowe zależności cenowe w próbie chińskiej; alternatywnie chińscy producenci mogą mierzyć się z innymi strukturami kosztów nakładów, które osłabiają premię za integrację. Ze względu na małe *n* wynik ten należy traktować jako przesłankę do dalszych badań, nie jako precyzyjne porównanie regionalne.

Według klasy ładowności kierunek pozostaje zgodny z hipotezą: rakiety małej nośności wykazują współczynnik −0,035 ($p = 0,029$), średniej nośności −0,014 ($p < 0,001$), a dużej nośności −0,038 ($p < 0,001$). Wzorzec ten jest zgodny z teorią kosztów transakcyjnych, ponieważ większe rakiety wymagają złożonej integracji podsystemów. Różnic między klasami nie należy jednak interpretować jako precyzyjnie oszacowanych efektów technologicznych.

Małe wielkości podprób ograniczają siłę statystyczną, a różnice między współczynnikami nie są statystycznie istotne. Głównym wnioskiem eksploracyjnym jest odporność: ujemna zależność VI-cena utrzymuje się w niemal wszystkich badanych podgrupach.

2.3.8. Wielkość ekonomiczna efektu

Istotność statystyczna wskazuje, że zależność jest trudna do uznania za przypadkową w tej próbie. Wielkość ekonomiczna określa, czy ma ona znaczenie praktyczne.

Współczynnik VI wynoszący $-0,029$ oznacza, że każdy punkt procentowy wzrostu integracji pionowej przewiduje około 2,9% niższą cenę za kilogram. Warto przełożyć tę wartość na przybliżone różnice dolarowe.

Rozważmy kontrfaktyczny scenariusz, w którym Vulcan Centaur ULA (40% VI) osiągnąłby poziom integracji SpaceX (80%). Regresja przewiduje, że ten 40-punktowy wzrost wiązałby się z około 69% niższą ceną za kilogram. W odniesieniu do szacowanej ceny startu rakiety Vulcan Centaur wynoszącej 100 milionów dolarów daje to ilustracyjną różnicę rzędu 69 milionów dolarów na start, przy założeniu niezmienności pozostałych czynników.

Dla Ariane 64 (60% VI, około 135 milionów dolarów za start) przejście do 80% VI odpowiada przewidywanej różnicy cenowej rzędu 59 milionów dolarów na start. Wzorzec utrzymuje się wśród jednorazowych konkurentów: luka VI względem SpaceX przekłada się na dziesiątki milionów przewidywanej niekorzystnej różnicy cenowej na misję.

Wartości reprezentują ilustracyjne różnice cenowe wynikające z oszacowanego współczynnika VI przy stałej wielorazowości. Kalkulacja zakłada, że współczynnik VI ujmuje rzeczywiste zyski efektywnościowe, a nie efekty selekcji. Założenia nie można zweryfikować za pomocą danych przekrojowych. Organizacja, która zwiększyłaby VI, mogłaby nie uzyskać takiego spadku ceny, jeśli nieobserwowalne charakterystyki, a nie sama integracja, napędzają korelację.

Szacunki mają charakter ilustracyjny, nie precyzyjny. Dają poczucie skali ekonomicznej, lecz nie prognozy operacyjnej. Wielkości te mają jednak znaczenie dla regulacji i polityki branży: nawet częściowa materializacja przewidywanych różnic oznaczałaby silną przewagę integracji nad fragmentacją pod względem ceny jednostkowej.

2.3.9. Interpretacja

Z analizy wynikają dwa wnioski. Po pierwsze, VI przewiduje niższą cenę za kilogram: każdy 10-punktowy wzrost odpowiada około 25% niższej cenie, a wynik jest odporny przy $p < 0,001$ we wszystkich zastosowanych specyfikacjach. Po drugie, rakiety z możliwością ponownego lotu pierwszego stopnia lub jego projekcją są opisowo 8,4 razy tańsze, lecz efekt ten jest nierozdzielny od wysokiej VI i częściowo opiera się na obserwacjach wczesnooperacyjnych lub projekcyjnych. Wyniki są zgodne z przyjętymi ramami teoretycznymi, ale nie dowodzą przyczynowości, dlatego obawy dotyczące selekcji omówiono w Rozdziale 3.

2.4. Ekonomia wielorazowości

Wielorazowość opiera się na prostej zasadzie: rakieta, która ląduje, generuje wartość tylko wtedy, gdy lata ponownie wystarczająco często, aby uzasadnić wieloletnią in-

westycję w jej technologii. Wolumen jest tu zatem kluczowym warunkiem opłacalności ekonomicznej.

2.4.1. Mechanizm progowy

Mimo potencjału wielorazowości do obniżania ceny za kilogram jej zastosowanie ograniczają wysokie koszty stałe. Lionnet i Cuellar (2021), cytowani w Gatti i D’Ottavio (2025, s. 88), określają próg rentowności na poziomie sześciu do dziewięciu startów rocznie.⁸³ Poniżej tego progu rozwój technologii wielorazowych może być droższy niż budowanie rakiet jednorazowych.

Przypadek Space Shuttle dobrze ilustruje ten tryb niepowodzenia: mniej niż pięć lotów rocznie przez trzy dziesięciolecia.⁸⁴ Jones (2018, s. 4) ujmując to następująco: „wielorazowość pojazdów nośnych, najbardziej oczekiwana metoda redukcji kosztów, jak dotąd w rzeczywistości nie obniżyła kosztów i prawdopodobnie przyczyniła się do bardzo wysokich kosztów startów programu Space Shuttle”.⁸⁵

2.4.2. Wolumen startów SpaceX

Tabela 2.15. Roczne starty SpaceX

Okres	Starty rakiet Falcon	Starty wewnętrzne	Starty klientów
2023	96	63	33
2024	134	89	45
2025	165	122	43
I kw. 2025	36	24	12
I kw. 2026	40	33	7

Źródło: Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

Uwaga: „Start wewnętrzny” jest klasyfikacją SpaceX i nie jest tożsamy z każdą misją Starlink, choć dobrze oddaje mechanizm popytu wewnętrznego.

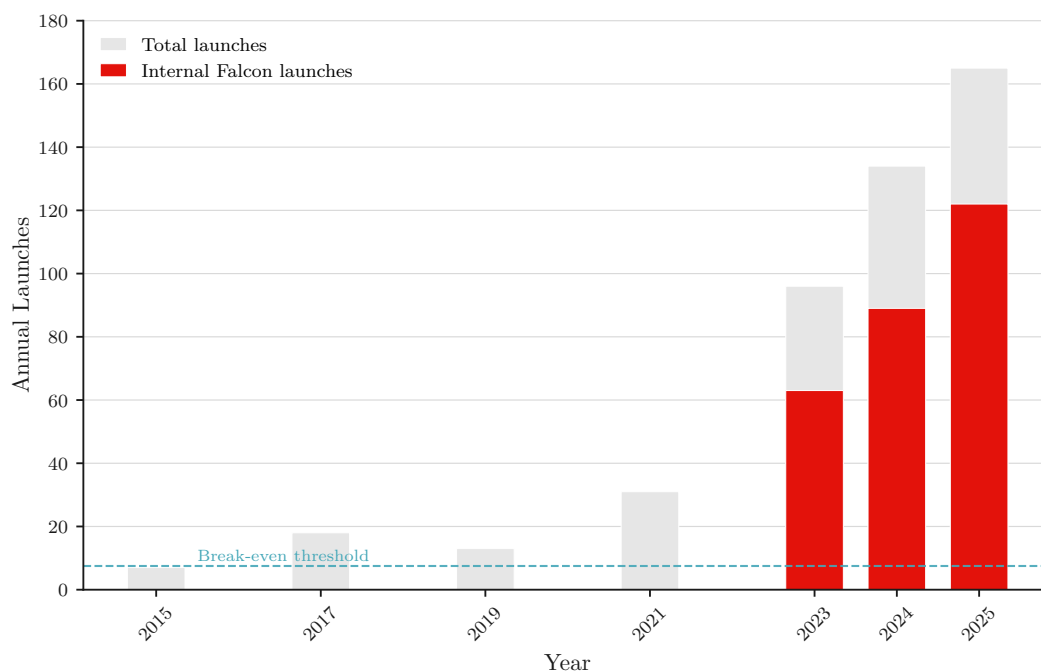
SpaceX przekroczyło ten próg w dużej skali. Siedem startów w 2015 roku mieściło się w zakresie rentowności według Lionnet i Cuellara. Do 2024 roku 134 starty przekroczyły próg ponad piętnastokrotnie. W 2025 roku same rakiety Falcon wykonały 165 startów, w tym 122 wewnętrzne i 43 dla klientów zewnętrznych. Przejście od marginalnej opłacalności do wysokiej częstotliwości operacyjnej nastąpiło między 2019 a 2021

⁸³M. Gatti, A. D’Ottavio, *The Missing Rocket: An Economic and Engineering Analysis of the Reusability Dilemma in the European Space Sector*, „Intereconomics”, Vol. 60, No. 2, 2025, s. 88–95.

⁸⁴Weinzierl (2018), s. 17.

⁸⁵Jones (2018), s. 4.

rokiem, w tym samym okresie, w którym wzrosła liczba misji Starlink.



Rysunek 2.6. Roczny wolumen startów SpaceX i starty wewnętrzne rakiet Falcon

Źródło: opracowanie własne na podstawie Gatti i D'Ottavio (2025), BryceTech (2024), danych SpaceX (2025) oraz Space Exploration Technologies Corp. (2026).

Zbieżność czasowa jest istotna dla interpretacji mechanizmu. Prospekt S-1/A wskazuje, że rakieta Falcon 9 osiągnęła ponad 570 udanych lądowań boosterów i ponad 540 startów z użyciem rakiety *flight-proven*.⁸⁶ Blue Origin stało się drugą organizacją, która odzyskała człon klasy orbitalnej, gdy pierwszy stopień rakiety New Glenn z sukcesem wylądował w listopadzie 2025 roku. Miało to miejsce podczas drugiego lotu rakiety,⁸⁷ a następnie Blue Origin ponownie użyło tego samego członu w misji NG-3 w kwietniu 2026 roku.⁸⁸ Ponowny lot pierwszego stopnia był sukcesem technologicznym, lecz misja NG-3 ujawniła problem górnego stopnia, a 28 maja 2026 r. kolejny egzemplarz rakiety New Glenn uległ zniszczeniu podczas testu statycznego przed planowaną misją.⁸⁹ Blue Origin zapowiedziało powrót do lotu przed końcem 2026 r., ale jest to harmonogram deklarowany, a nie potwierdzony wynik operacyjny. New Glenn pozostaje więc systemem wczesnooperacyjnym, a drugi stopień pozostaje jednorazowy.

⁸⁶Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

⁸⁷C. Swope, *How Important Is Blue Origin's Second New Glenn Launch?*, CSIS Critical Questions, 14 listopada 2025.

⁸⁸Blue Origin, *New Glenn Mission NG-3*, 19 kwietnia 2026.

⁸⁹Associated Press, *Blue Origin investigates rocket explosion as public is warned about possible wreckage washing ashore*, 29 maja 2026; E. Berger, *Blue Origin has set a very aggressive return-to-flight timeline*, *Ars Technica*, 2 czerwca 2026.

2.4.3. Integracja pionowa po stronie popytu

Integracja pionowa po stronie popytu oznacza w tym ujęciu kontrolę nad znaczną częścią własnego popytu na usługi startowe. W przypadku SpaceX mechanizm ten wynika z powiązania rakiet Falcon z systemem Starlink: spółka, która buduje raketę, produkuje również satelity wynoszone przez tę raketę.

Gatti i D'Ottavio (2025, s. 90–91) obserwują, że „wysoka częstotliwość startów SpaceX jest napędzana głównie przez system Starlink, a nie ogólny popyt komercyjny”. W 2024 roku około 70 procent ze 134 startów SpaceX wynosiło satelity Starlink.⁹⁰ W prospekcie S-1/A spółka ujmuje ten mechanizm jako starty wewnętrzne: 122 ze 165 startów rakiet Falcon w 2025 roku oraz 33 z 40 startów w pierwszym kwartale 2026 roku miały taki charakter.⁹¹

Ekonomia kosztów transakcyjnych wyjaśnia, dlaczego zaspokajanie własnej podaży lotów ma znaczenie poza samym wolumenem. Harmonogram startów jest aktywem o wysokich kosztach stałych, którego wartość zależy od wykorzystania. Zewnętrzny klient może opóźniać zamówienia lub renegocjować warunki po tym, jak dostawca zaangażował zasoby. System Starlink ogranicza tę ekspozycję: popyt wewnętrzny zmniejsza ryzyko niewykorzystania mocy, opóźnień i przechwytywania quasi-rent przez klientów zewnętrznych.

Rozważmy scenariusz kontrfaktyczny. Przed wdrożeniem systemu Starlink NASA zapewniała około cztery starty rocznie. Agencje wojskowe dodawały od dwóch do czterech więcej. Całkowity popyt instytucjonalny wynosił więc około sześciu do ośmiu startów, czyli znajdował się na progu rentowności, a nie wyraźnie powyżej niego. Lionnet i Cuellar (2021) doszli do wniosku, że nawet popyt rządu amerykańskiego może nie wystarczyć do utrzymania wielorazowości w sposób rentowny w dłuższej perspektywie.

System Starlink przesunął wielorazowość od marginalnej opłacalności do wysokiego wolumenu operacyjnego przede wszystkim poprzez własność strony popytowej. Popyt wewnętrzny ogranicza również deprecjację uczenia się, ponieważ częste operacje pomagają zachować wiedzę instytucjonalną, którą sporadyczne starty mogłyby osłabiać.

2.4.4. Struktura kosztów stałych

Koszty zmienne spadają przy ponownym użyciu, ale koszty stałe rosną: amortyzacja prac B+R, amortyzacja członów, infrastruktura renowacji i stały personel. Lionnet i Cuellar (2021), cytowani w Gatti i D'Ottavio (2025, s. 88), ostrzegają, że po uwzględnieniu amortyzacji „rozprasza się złudzenie, że wielorazowy człon jest »bezpłatny do użytku na zawsze«”. Prospekt S-1/A nie ujawnia czystego kosztu krańcowego startu, lecz wskazuje, że w 2025 roku koszty segmentu Space przypisane do przychodów spadły o 189 mln

⁹⁰SpaceX (2025).

⁹¹Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

dolarów głównie dzięki większej wielorazowości rakiet Falcon i niższej amortyzacji.⁹² Przy 165 startach rakiet Falcon w 2025 roku SpaceX operuje znacznie powyżej progu rentowności, więc ta sama ekonomika, która ograniczała opłacalność Shuttle przy 4,5 lotach rocznie, sprzyja rakiecie Falcon 9 przy bardzo wysokim wolumenie.

2.4.5. Europejska ścieżka rozwoju bez wielorazowości

Arianespace startuje około sześć razy rocznie,⁹³ czyli na poziomie zbliżonym do progu rentowności lub niższym. Nie istnieje europejski odpowiednik systemu Starlink. Gatti i D'Ottavio (2025, s. 95) konkludują, że „decyzja Europy o nieuznaniu wielorazowości za priorytet wynikała z trafnej oceny, że taka technologia wymaga solidnego rynku LEO, którego brakowało”.

2.5. Interakcja integracji i wielorazowości

Integracja pojawiła się pierwsza. SpaceX zostało założone jako przedsiębiorstwo zintegrowane pionowo w 2002 roku. Pierwsze udane lądowanie członu nastąpiło dopiero w grudniu 2015 roku, trzynastcie lat później.⁹⁴ W tych latach integracja sprzyjała iteracyjnemu rozwojowi silników. Berger (2021) dokumentuje, że ten sam zespół projektujący silniki Merlin diagnozował je również po awariach.

Integracja w 2002 roku poprzedziła iteracyjny rozwój do 2015 roku. Iteracyjny rozwój zwiększył wykonalność lądowania. Lądowanie stało się ekonomicznie bardziej opłacalne, gdy system Starlink wygenerował popyt od 2019 roku. Brak któregośkolwiek ogniwa osłabiałby cały mechanizm.

Mechanizm można sformułować następująco. Integracja pionowa po stronie podaży przechwytuje efekty zewnętrzne uczenia się, które zidentyfikował Arrow (1962): wiedza pozostaje wewnątrz przedsiębiorstwa.⁹⁵ Ta zachowana wiedza ułatwia rozwój wielorazowości, ponieważ inżynierowie rozumiejący zachowanie turbopompy mogą lepiej przewidzieć, które komponenty przetrwają ponowne wejście. Wielorazowość staje się jednak ekonomicznie opłacalna dopiero powyżej progu Lionnet i Cuellara (2021) wynoszącego sześć do dziewięciu startów rocznie. Integracja po stronie popytu zapewnia ten wolumen w bardziej stabilny sposób.

System ma cztery ogniwa:

- 1. VI po stronie podaży sprzyja retencji uczenia się, co ułatwia rozwój zdolności wielorazowości**

⁹²Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

⁹³Gatti i D'Ottavio (2025).

⁹⁴SpaceX (2025).

⁹⁵Arrow, K. J. (1962). „The Economic Implications of Learning by Doing.” *Review of Economic Studies*, 29(3), 155–173.

2. **VI po stronie popytu zapewnia stabilniejszy wolumen**, co poprawia ekonomikę wielorazowości
3. **Ekonomika wielorazowości umożliwia więcej lotów**, co przyspiesza uczenie się
4. **Przyspieszone uczenie się wiąże się z tańszymi operacjami**, czyniąc większy popyt wewnętrzny bardziej zrównoważonym

Oslabienie któregośkolwiek ogniwa może zatrzymać pętlę. Arianespace nie posiada obu typów integracji w porównywalnym zakresie. ULA kupuje silniki i obsługuje wyłącznie zewnętrznych klientów. Blue Origin buduje silniki BE-4 wewnątrz, lecz nie ma odpowiednika systemu Starlink: posiada integrację po stronie podaży bez integracji po stronie popytu. SpaceX operuje w obu wymiarach.

Macierz 2x2 porządkuje to porównanie:

Tabela 2.16. Macierz integracji pionowej po stronie podaży i popytu

	Niska VI po stronie podaży	Wysoka VI po stronie podaży
Niska VI po stronie popytu	Arianespace, ULA	Blue Origin
Wysoka VI po stronie popytu	(niestabilne)	SpaceX

Źródło: opracowanie własne na podstawie studiów przypadków.

Pusta komórka jest teoretycznie interesująca. Wysoka integracja po stronie popytu bez integracji po stronie podaży byłaby trudna do utrzymania: koszty mogłyby pozostać zbyt wysokie, aby obsługiwać wewnętrzny popyt z zyskiem. Spółka posiadająca konstelację satelitów, lecz kupująca rakiety od rozdrobnionych dostawców, mierzyłaby się z podobną strukturą kosztów jak mniej zintegrowani dostawcy. Wolumen bez kontroli kosztów może być niezrównoważony. Wszystko to pomaga wyjaśnić pustą komórkę.

Regresja nie może oddzielnie zidentyfikować ogniw funkcjonujących jako system. Dane opisowe dokumentują, które przedsiębiorstwa zajmują które komórki. Ramy teoretyczne wyjaśniają, dlaczego ten wzorzec istnieje. Żadne z tych podejść nie dowodzi przyczynowości.

2.6. Studia przypadków

Studia przypadków służą jakościowej weryfikacji mechanizmów zasugerowanych przez analizę przekrojową. Nie stanowią osobnej identyfikacji przyczynowej, lecz pozwalają prześledzić sekwencję decyzji, bodźców i ograniczeń instytucjonalnych. SpaceX jest

głównym przypadkiem, podczas gdy Arianespace, ULA i Blue Origin pokazują odmienne ścieżki organizacyjne.

2.6.1. SpaceX: od nieudanych negocjacji do pozycji rynkowej

Profil ilościowy: VI = 80%, 3364 dol./kg (Falcon 9), dojrzałe ponowne wykorzystanie pierwszego stopnia, 165 startów rakiet Falcon w 2025 r., w tym 122 wewnętrzne.

Początki SpaceX wyłoniło się z nieudanych negocjacji. W latach 2001–2002 Musk próbował kupić rosyjskie rakiety, lecz napotkał eskalujące żądania cenowe,⁹⁶ przypominające dynamikę szantażu (*hold-up*) opisaną przez Kleina, Crawforda i Alchiana (1978). Przeliczył i stwierdził, że surowce stanowią zaledwie 3 procent ceny rakiety,⁹⁷ pozostałe 97 procent przypadało na pracę, narzuty i marże rozdzielone między rozdrobione łańcuchy dostaw. SpaceX zostało zarejestrowane w maju 2002 roku z integracją pionową jako strategią założycielską. Berger (2021) podsumowuje: „Postawił na integrację pionową. Jego celem było budowanie jak największej części rakiety wewnętrznie, aby obniżyć koszty przy każdej okazji”.

Rozwój iteracyjny (2002–2008) Rakieta Falcon 1 zawiodła w trzech kolejnych startach między 2006 a 2008 rokiem, zanim osiągnęła orbitę przy czwartej próbie.⁹⁸ Każda awaria generowała uczenie się, które wracało do projektu: zmiany materiałów, instalacja deflektorów, modyfikacje oprogramowania. Ponieważ inżynierowie projektujący komponenty również diagnozowali awarie i wdrażali poprawki, wiedza pozostawała wewnątrz przedsiębiorstwa. Garrett Reisman, który pracował zarówno w SpaceX, jak i w NASA, ujmuje różnicę: „Podejmowaliśmy decyzję na jednym spotkaniu, która w NASA wymagałaby lat, aby dojść do tego samego punktu decyzyjnego”.⁹⁹

Struktura kontraktu COTS (2006–2012) Program COTS NASA zapewnił 396 milionów dolarów na rozwój rakiety Falcon 9 i statku Dragon. SpaceX wniosło ponad 450 milionów dolarów środków własnych.¹⁰⁰ Kamienie milowe były płatne w systemie stałej ceny (*fixed-price*). NASA określiła wymagania dotyczące dostawy ładunków, pozostawiając podejścia techniczne do uznania SpaceX. Każdy zaoszczędzony dolar zwiększał zatem marżę SpaceX.

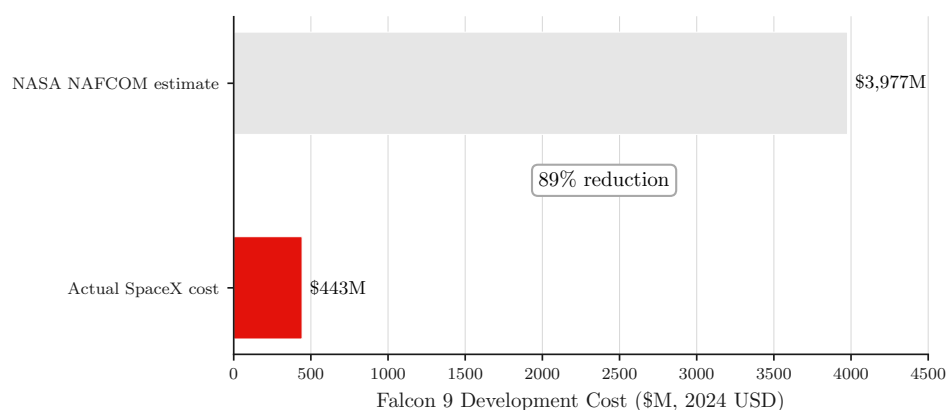
⁹⁶Berger (2021).

⁹⁷Berger (2021).

⁹⁸Berger (2021).

⁹⁹Berger (2021).

¹⁰⁰NASA (2014). *Commercial Orbital Transportation Services: A New Era in Spaceflight*. NASA/SP-2014-617.



Rysunek 2.7. Porównanie szacunków kosztu rozwoju rakiety Falcon 9 według NASA i SpaceX

Źródło: opracowanie własne na podstawie NASA (2011).

Skalowanie i lądowanie (2010–2015) Rakieta Falcon 9 osiągnęła status operacyjny pierwszym udanym lotem w czerwcu 2010 roku.¹⁰¹ Pierwsze udane lądowanie członu nastąpiło 21 grudnia 2015 roku w Landing Zone 1 na Cape Canaveral.¹⁰² Żaden człon orbitalny nie dokonał tego wcześniej. Pierwszy ponowny lot nastąpił w marcu 2017 roku,¹⁰³ gdy odzyskany pierwszy stopień rakiety Falcon 9 wystartował po raz drugi. Te kamienie milowe wymagały pewności, jaką mogła zapewnić tylko zgromadzona wewnętrznie wiedza.

Starlink i wolumen (2019–obecnie) Misje Starlink rozpoczęły się w 2019 roku. Do 2021 roku zdominowały harmonogram SpaceX. SpaceX produkuje sprzęt systemu Starlink wewnętrznie po około 2500 dol./kg, w porównaniu z 14 000 dol./kg u konkurentów korzystających z tradycyjnego kontraktowania.¹⁰⁴ W 2025 roku 122 ze 165 startów ракет Falcon miały charakter wewnętrzny.¹⁰⁵ Niższe koszty satelitów umożliwiły szybkie rozmieszczanie, co stworzyło popyt na starty i poprawiło opłacalność wielorazowości. W ten sposób pętla wzmacniająca staje się operacyjnie możliwa.

Podsumowanie Integracja poprzedziła wielorazowość. System Starlink poprzedził wielorazowość o wysokim wolumenie. Kolejność jest zgodna z interpretacją przyczynową, ale jej nie dowodzi. Wizja Elona Muska, dostęp SpaceX do kapitału i korzystne decyzje kontraktowe NASA również mogły mieć znaczenie. Dane dokumentują współwystępowanie i kolejność czasową.

¹⁰¹NASA (2014).

¹⁰²SpaceX (2025).

¹⁰³SpaceX (2025).

¹⁰⁴Gatti i D'Ottavio (2025).

¹⁰⁵Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

2.6.2. Arianespace: ograniczenia instytucjonalne

Profil ilościowy: VI = 60%, ~10 000 dol./kg (Ariane 5), jednorazowa, ~6 startów rocznie.

Od lat 80. do wczesnych lat 2010. rakiety Ariane miały około 60 procent komercyjnego rynku orbity geostacjonarnej.¹⁰⁶ Pozycja ta uległa jednak osłabieniu.

Zwrot geograficzny Polityka ESA wymaga, aby państwa członkowskie otrzymywały kontrakty proporcjonalnie do swoich wkładów. Francja wnosi 55,3 procent budżetu Ariane 6; produkcja silników pozostaje we Francji. Niemcy wnoszą 21 procent; zbiorniki i struktury produkuje się tam. Włochy wnoszą 7,6 procent; obudowy silników na paliwo stale buduje się we Włoszech.¹⁰⁷ Są to uzasadnione cele polityczne i przemysłowe, ale nie są to cele ukierunkowane przede wszystkim na minimalizację kosztów.

Koszty koordynacji okazują się znaczne. Olivier Andries, dyrektor generalny Safran, wskazał zwrot geograficzny jako „główną przyczynę” trudności z podwykonawcami: „podwykonawcy zostali narzuceni ArianeGroup przez ich kraje i... ci partnerzy chowają się za zwrotem geograficznym, aby nie podejmować żadnych wysiłków na rzecz konkurencyjności”.¹⁰⁸ Niektórzy podwykonawcy Ariane 6 podnieśli ceny o niemal 60 procent po pierwszych 15 pojazdach; ArianeGroup nie mogła ich zmienić.¹⁰⁹

Ograniczenia wdrożenia wielorazowości Arianespace wykonuje około sześciu startów rocznie,¹¹⁰ czyli na poziomie zbliżonym do prognozy rentowności lub niższym. Bruno Le Maire, francuski minister gospodarki, przyznał: „W 2014 roku byliśmy na rozdrożu i nie wybraliśmy właściwej ścieżki”.¹¹¹ Odnosił się do wielorazowości. Bez wewnętrznego wolumenu startów ekonomika wielorazowości jest trudna do utrzymania.

Cena Ariane 6 przekracza obecnie 100 milionów euro za start.¹¹² Nawet jako system jednorazowy pozostaje powyżej aktualnej ceny 74 milionów dolarów za start rakiety Falcon 9.¹¹³ Arianespace wymaga europejskich dotacji rządowych, aby kontynuować działalność.

Zależność od ścieżki Zwrot geograficzny tworzy fragmentację. Fragmentacja podnosi koszty koordynacji. Wyższe koszty redukują konkurencyjność komercyjną. Zmniejszona konkurencyjność zwiększa zależność od klientów rządowych. Klienci rządowi mają polityczne bodźce do utrzymania zwrotu geograficznego.

¹⁰⁶Gatti i D'Ottavio (2025).

¹⁰⁷ESA (2024).

¹⁰⁸European Spaceflight (2024), *CNES Boss Blames Contractors for Ariane 6 Being Too Expensive*.

¹⁰⁹European Spaceflight (2024), *CNES Boss Blames Contractors for Ariane 6 Being Too Expensive*.

¹¹⁰Gatti i D'Ottavio (2025).

¹¹¹POLITICO (2024), *How Europe's Rocket Program Lost Big to Elon Musk: The Inside Story*.

¹¹²European Spaceflight (2024), *CNES Boss Blames Contractors for Ariane 6 Being Too Expensive*.

¹¹³SpaceX, *Capabilities & Services*, 2026.

Przerwanie tego cyklu wymagałoby znacznej woli politycznej po stronie państw uczestniczących.

2.6.3. United Launch Alliance: ograniczenia struktury właścicielskiej

Profil ilościowy: VI = 30–50%, 7958–13 893 dol./kg (Atlas V – Delta IV Heavy), jednorazowe, ~6 startów rocznie.

ULA powstało w 2006 roku jako *joint venture* 50-50 między Boeing i Lockheed Martin, uzyskując zgodę FTC w październiku tego roku.¹¹⁴ Stało się jedynym amerykańskim dostawcą startów dla bezpieczeństwa narodowego, dopóki SpaceX nie przerwał tego monopolu w 2016 roku.¹¹⁵ Monopol zapewnia stabilność popytu, ale ogranicza presję adaptacyjną.

Struktura i dziedzictwo Kontrakty EELV płaciły za zapewniony dostęp: utrzymywanie personelu, infrastruktury i gotowości niezależnie od tempa startów. Jones (2018, s. 7) identyfikuje główny problem: „brak konkurencji” służył jako „fundamentalna przyczyna dawnych wysokich komercyjnych kosztów startów”.¹¹⁶

Żadna ze spółek dominujących nie przekazała produkcji silników do ULA. Atlas V używał rosyjskiego RD-180. Delta IV używała RS-68 od Rocketdyne.¹¹⁷ ULA montuje rakiety z komponentów pozyskiwanych zewnątrz, co odróżnia ją od modelu SpaceX.

Reakcja na SpaceX Certyfikacja SpaceX w 2015 roku zakończyła monopol. Do 2018 roku Bruno raportował 36-procentową redukcję kosztów poprzez konsolidację personelu i usprawnienia procesów.¹¹⁸ ULA ogłosiło rakietę Vulcan z silnikiem BE-4 Blue Origin: wciąż pozyskiwanym zewnątrz, ale przynajmniej amerykańskim.

Konkurencja wymusiła więc reakcję. Struktura *joint venture* ograniczała jednak zakres możliwych zmian. Boeing i Lockheed Martin zachowują odrębne działalności lotnicze. Przekazanie produkcji silników do ULA mogłoby kanibalizować istniejące jednostki biznesowe.

Był to realny, choć ograniczony postęp. Bruno wyjaśnił, dlaczego ULA nie rozwinęła silników wewnątrz: „jeśli chcesz zupełnie nowy ciekły silnik raketowy, przygotuj się na wydanie od jednego do dwóch miliardów dolarów”.¹¹⁹ Ta sama logika, która czyni integrację atrakcyjną dla jednego przedsiębiorstwa, może czynić ją kosztowną dla innego.

¹¹⁴W. E. Kovacic, *Competition Policy Retrospective: The Formation of the United Launch Alliance and the Ascent of SpaceX*, „George Mason Law Review”, Vol. 27, No. 3, 2020, s. 863–912.

¹¹⁵Kovacic (2020).

¹¹⁶Jones (2018), s. 7.

¹¹⁷C. H. Murphy, *Evolved Expendable Launch Vehicle System: RS-68 Main Engine Development*, *Acta Astronautica*, 53(4–10), 2003, s. 787–795.

¹¹⁸Smithsonian (2018).

¹¹⁹Bruno (2019).

2.6.4. Blue Origin: test podwójnej VI

Analiza tej sekcji uwzględnia stan wiedzy na 6 czerwca 2026 r., ponieważ wydarzenia dotyczące New Glenn miały miejsce bezpośrednio przed finalizacją pracy.

Profil ilościowy, stan na 6 czerwca 2026 r.: VI = 80%, 1 511 dol./kg (New Glenn, szacunek na podstawie ogłoszeń przedsiębiorstwa i cen kontraktów NASA), wczesnooperacyjny ponowny lot pierwszego stopnia, 3 starty do kwietnia 2026 r.; kolejny egzemplarz utracony podczas testu statycznego 28 maja 2026 r.

Blue Origin stanowi użyteczny przypadek porównawczy dla hipotezy podwójnej VI. Przedsiębiorstwo zostało założone w 2000 roku,¹²⁰ wcześniej niż SpaceX. Jeff Bezos zainwestował ponad 10 miliardów dolarów własnego kapitału.¹²¹ Blue Origin buduje silniki BE-4 wewnętrznie, demonstrując integrację po stronie podaży porównywalną z programem silnika Merlin w SpaceX. Pierwszy stopień rakiety New Glenn wylądował pomyślnie w listopadzie 2025 roku podczas drugiego lotu i poleciał ponownie w kwietniu 2026 roku, czyniąc Blue Origin dopiero drugim przedsiębiorstwem, które odzyskało i ponownie wykorzystało człon orbitalny.¹²² Nie jest to jeszcze dowód dojrzałej ekonomiki systemu: liczba lotów pozostaje mała, cena jest szacunkiem, obserwacja dotyczy przede wszystkim pierwszego stopnia, a test statyczny kolejnego egzemplarza w maju 2026 r. zakończył się utratą rakiety.¹²³

Jednocześnie Blue Origin wykonało dwa starty w 2025 roku i trzy do kwietnia 2026 roku, a więc pozostawało daleko poniżej wolumenu SpaceX. Zapowiedziany powrót do lotu przed końcem 2026 r. może dostarczyć kolejnych danych, ale na moment pisania pracy pozostaje planem przedsiębiorstwa. Dlatego New Glenn powinien być traktowany jako wczesny test mechanizmu, nie jako ustalona obserwacja równoważna rakiecie Falcon 9.

Ramy teoretyczne są zgodne z tym wynikiem. Integracja po stronie podaży bez integracji po stronie popytu może nie wystarczyć do rentownego przekroczenia progów wielorazowości. Blue Origin nie ma odpowiednika systemu Starlink. Program Amazon Project Kuiper zakontaktował 12 startów z opcjami na 15 kolejnych,¹²⁴ lecz Amazon jest klientem, nie spółką zależną. Blue Origin ponosi część niepewności popytowej, którą SpaceX ograniczyło, budując własną konstelację. Zamówienia związane z programem Kuiper mogą być opóźniane, renegocjowane lub przenoszone do konkurentów; wewnętrzne cele produkcyjne są pod tym względem bardziej stabilne.

Ten kontrast doprecyzowuje tezę. Integracja po stronie podaży wydaje się ważna, ale może nie być wystarczająca. Pętla wzmacniająca wymaga zarówno integracji po stro-

¹²⁰Swope (2025).

¹²¹Swope (2025).

¹²²Swope (2025); Blue Origin (2026).

¹²³Associated Press (2026); Berger (2026).

¹²⁴Swope (2025).

nie podaży do przechwytywania uczenia się, jak i integracji po stronie popytu lub równoważnie stabilnego popytu do zapewnienia wolumenu. Blue Origin osiągnęło integrację po stronie podaży bez porównywalnej integracji po stronie popytu. Czy program Kuiper zmieni ten rachunek, pozostaje pytaniem empirycznym.

2.6.5. Analiza porównawcza

Tabela 2.17. Podsumowanie porównawcze przypadków

Wymiar	SpaceX	Arianespace	ULA	Blue Origin
Poziom VI	80%	60%	30–50%	80%
Cena za kg	3 364 dol.	~10 000 dol.	7 958–13 893 dol.	1 511 dol.
Źródło silników	Wewnętrzne (Merlin, Raptor)	Wielokrajowe	Zewnętrzne (Rosja, Blue Origin)	Wewnętrzne (BE-4)
Wielorazowość	Dojrzała od 2017	od Jednorazowa	Planowana częściowo	Wczesna od 2025
Częstotliwość startów	165 startów rakiet Falcon (2025)	~6	~6	3 (do IV 2026)
Popyt wewnętrzny	we- 122 (2025)	wewn. Brak	Brak	Brak (Kuiper kontraktowo)
VI po stronie popytu	Tak (Starlink)	Nie	Nie	Nie
Główne ograniczenie	o- Koncentracja decyzji	Polityka zwrotu geograficznego	Struktura <i>joint venture</i>	Niepewność popytu
Dziedzictwo kontraktowe	Stała cena (<i>fixed-price</i> , COTS)	Rządowe finansowanie rozwoju	Koszt plus marża (<i>cost-plus</i>), potem stała cena (<i>fixed-price</i>)	Prywatne kontrakty NASA

Źródła: Jones (2018); Gatti i D'Ottavio (2025); ESA (2024); SpaceX (2026); Bruno (2019); Swope (2025); Blue Origin (2026).

Najniższa dobrze udokumentowana dojrzała cena operacyjna w próbie należy do zintegrowanego dostawcy wielorazowego. Spółka z wewnętrznym popytem przekroczyła próg wielorazowości przy wysokim wolumenie. Przedsiębiorstwa bez wewnętrznego popytu dotychczas nie dokonały tego w porównywalnej skali. Wzorzec jest zgodny z ramami teoretycznymi, choć rakieta New Glenn pozostaje obserwacją wczesnooperacyjną, a rakieta Starship projekcją.

2.7. Dokumentacja danych

Pełny zbiór danych, dokumentację źródeł cenowych oraz szczegółowe uzasadnienie poziomów jakości źródeł przeniesiono do Załącznika A. W tekście głównym pozostawiono syntetyczne zestawienia niezbędne do interpretacji wyników empirycznych. Rozwiązanie to pozwala zachować przejrzystość metodologiczną bez nadmiernego obciążania głównej argumentacji rozdziału.

Podsumowanie rozdziału

Trzy mechanizmy wchodzą tu w interakcję. Integracja pionowa zatrzymuje wiedzę ułatwiającą wielorazowość, wielorazowość zwiększa wolumen startów, a wewnętrzny popyt stabilizuje wykorzystanie systemu. Regresja wykazuje, że VI przewiduje cenę za kilogram z istotnością statystyczną ($p < 0,001$), podczas gdy wielorazowość nie może być oddzielnie zidentyfikowana, ponieważ nie zmienia się niezależnie od VI. Wynik pozostaje stabilny po wyłączeniu rakiety Starship oraz po jednoczesnym wyłączeniu rakiet Starship i New Glenn. Wszystkie cztery systemy sklasyfikowane jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne w próbie mają VI 80% lub wyższą, przy czym rakiet New Glenn jest obserwacją wczesnooperacyjną, a rakiet Starship projekcją. Ograniczenia instytucjonalne pomagają wyjaśnić odmienne reakcje tradycyjnych dostawców: kontrakty typu koszt plus marża (*cost-plus*), zwrot geograficzny i struktura właścicielska ULA tworzyły odmienne funkcje celu. Rozdział 3 bada implikacje tych wyników.

ROZDZIAŁ 3. IMPLIKACJE WYNIKÓW I OGRANICZENIA ANALIZY

3.1. Implikacje dla przemysłu i polityki

Rozdział omawia implikacje wyników, ale należy je traktować jako wnioski warunkowe. Analiza empiryczna dotyczy sektora usług startowych, dlatego przenoszenie jej rezultatów na politykę przemysłową, zamówienia publiczne lub inne branże kapitałochłonne ma charakter hipotezy wymagającej dalszej weryfikacji. Celem rozdziału jest wskazanie możliwych konsekwencji zaobserwowanych mechanizmów, a nie formułowanie gotowych rekomendacji regulacyjnych.

3.1.1. Implikacje dla struktury rynku

Z Rozdziału 2 wyłania się następujący wniosek: przemysł startowy może premiować przedsiębiorstwa zintegrowane pionowo. Ponowne wykorzystanie wymaga wolumenu, wolumen wymaga stabilnego popytu, a stabilny popyt jest łatwiejszy do osiągnięcia przy posiadaniu własnego segmentu ładunkowego. SpaceX zbudowało system Starlink. Żaden konkurent nie powielił dotychczas tej sekwencji w porównywalnej skali.

Oszacowania regresji stanowią ilościowy punkt odniesienia, choć mają istotne ograniczenia. Zmniejszenie luki w integracji pionowej między Arianespace (60%) a SpaceX (80%) prognozuje 43% niższą cenę za kilogram przy stałym poziomie ponownego wykorzystania. Jest to jednak scenariusz kontrfaktyczny, który nie występuje w danych. Utrzymanie ponownego wykorzystania na stałym poziomie jest problematyczne, ponieważ jego osiągnięcie może wymagać właśnie wysokiej integracji, jaką zbudowało SpaceX. Niezintegrowany system wielokrotnego użytku pozostaje konstrukcją teoretyczną.

Ocena tej koncentracji wymaga rozróżnienia między efektywnością a ryzykiem rynkowym. Weinzierl (2018) argumentuje, że „komplementarność tworzą presję w kierunku koncentracji: technologie niezbędne dla komercjalizacji kosmosu generują znaczące zwroty jedynie wtedy, gdy są zintegrowane”.¹²⁵ Zgodnie z tym poglądem dominacja SpaceX może odzwierciedlać cechy zbliżone do monopolu naturalnego. Jest to interpre-

¹²⁵M. Weinzierl, *Space, the Final Economic Frontier*, „Journal of Economic Perspectives”, Vol. 32, No. 2, 2018, s. 173–192.

tacja spójna z wynikami pracy, choć nie jedyna możliwa.

Laffont i Tirole (1993) identyfikują pokrewny mechanizm. Krzywe uczenia tworzą asymetrię informacyjną dotyczącą przyszłych kosztów: przedsiębiorstwo znajdujące się najdalej na krzywej doświadczenia posiada wiedzę, której konkurenci nie są w stanie szybko zdobyć.¹²⁶ Ponad 400 lądowań pierwszych stopni rakiet SpaceX¹²⁷ reprezentuje skumulowaną wiedzę, której replikacja zajęłaby nowym podmiotom lata i wymagałaby znacznego kapitału.

Doświadczenie Blue Origin (omówione w Sekcji 2.6.4) ilustruje to ograniczenie. Integracja po stronie podaży i 10 miliardów dolarów inwestycji nie przełożyły się jeszcze na konkurencyjne tempo startów. Bariera wydaje się mieć charakter organizacyjny: integracja po stronie popytu wymaga posiadania własnego segmentu ładunkowego, a nie jedynie zawierania kontraktów z klientami po stronie ładunku. Jest to problem trudniejszy niż samo finansowanie rozwoju.

Dominujące przedsiębiorstwo z tak silną pozycją rynkową mogłoby przechwytywać renty monopolowe; takie jest standardowe przewidywanie teorii. SpaceX utrzymało jednak ceny na poziomie około 4,4 raza niższym od średniej dla rakiet jednorazowych ($14\,759 / 3364 = 4,39$).¹²⁸ Sugeruje to, że potencjalne wejście dyscyplinuje ceny, SpaceX priorytetowo traktuje wolumen nad marżę albo oba mechanizmy zachodzą jednocześnie. Dostępne dane nie pozwalają rozstrzygnąć, który z nich dominuje.

3.1.2. Europejski dylemat strategiczny

Europejski dylemat strategiczny polega na tym, że wielokrajowa struktura produkcji utrudnia osiągnięcie cen i kosztów porównywalnych ze zintegrowanym przedsiębiorstwem.

Sekcja 2.6.2 udokumentowała fragmentację produkcji wynikającą z zasady zwrotu geograficznego. Luka cenowa względem SpaceX nie zmniejsza się, a jeśli już, to się powiększa. Kluczowym problemem pozostaje więc polityczna wykonalność reformy.

Taka reforma wymagałaby oczywiście zgody beneficjentów obecnego systemu. Przemysł lotniczo-kosmiczny każdego państwa członkowskiego zależy od gwarantowanych kontraktów. Politycy głoszący za zakończeniem zwrotu geograficznego głosowaliby za ograniczeniem miejsc pracy w swoich okręgach wyborczych. Ekonomia polityczna jest zatem samowzmacniająca: fragmentacja podnosi koszty, wyższe koszty wymagają subsydiów, subsydia wymagają poparcia politycznego, a poparcie polityczne wymaga

¹²⁶J.-J. Laffont, J. Tirole, *A Theory of Incentives in Procurement and Regulation*, MIT Press, Cambridge 1993, s. 164–165.

¹²⁷SpaceX, *Falcon 9 Launch and Landing Statistics*, SpaceX Mission Updates, 2025, <https://www.spacex.com/launches/>.

¹²⁸Średnia 14 759 USD/kg dla rakiet jednorazowych obliczona na podstawie 36 rakiet jednorazowych z Tabeli 2.8; wartość 3364 USD/kg dla rakiety Falcon 9 pochodzi z katalogowej ceny SpaceX obowiązującej do 2026 roku.

dystrybucji kontraktów między państwami.

Z przedstawionej analizy wynika, że europejski sektor startowy mierzy się z napięciem między utrzymaniem obecnego modelu instytucjonalnego a próbą głębszej konsolidacji produkcji. Pierwszy wariant sprzyja zachowaniu suwerennej zdolności startowej poprzez dalsze subsydiowanie i akceptację ograniczonej konkurencyjności cenowej. Drugi wymagałby reformy instytucji, które przez dekady podtrzymywały europejską współpracę kosmiczną, przy ryzyku osłabienia koalicji politycznej. Osiągnięcie konkurencyjności cenowej przy niezminionej zasadzie zwrotu geograficznego wydaje się najmniej prawdopodobnym scenariuszem.

3.1.3. Reforma zamówień publicznych jako polityka przemysłowa

Sposób, w jaki rząd płaci za rakiety kosmiczne, silnie wpływa na to, jakie rakiety otrzymuje. Wniosek ten wydaje się prosty, ale jego implikacje są istotne.

Sekcja 1.2.1 udokumentowała mechanizm *cost-plus* z jego odwróconymi bodźcami: efektywność może zmniejszać przychód wykonawcy. Sekcja 2.3.3 pokazała skalę różnicy: NASA oszacowała koszt rozwoju rakiety Falcon 9 na 4 miliardy dolarów przy tradycyjnym kontraktowaniu; SpaceX ukończyło go za 390–443 miliony dolarów.¹²⁹ Luka ta jest bardzo duża, choć łączy wpływ wielu mechanizmów.

Kluczowy problem polityki dotyczy tego, dlaczego kontrakty stałocenowe (*fixed-price*) były skuteczne w tym przypadku oraz czy ten wzorzec można przenieść do innych sektorów.

Schemat analityczny Laffonta i Tirole’a (1993) identyfikuje kompromis: kontrakty stałocenowe motywują do efektywności, ale wymagają od przedsiębiorstw ponoszenia ryzyka. COTS przerzucił ryzyko na SpaceX i uzyskał korzyści efektywnościowe. Każdy zaoszczędzony dolar zwiększał zysk, co oznaczało prostą, ale istotną zmianę bodźców.

Autry (2018) identyfikuje drugi mechanizm: COTS wymagał prywatnego współinwestowania. „Wymaganie prywatnych inwestycji było kluczowym czynnikiem różnicującym”, argumentuje Autry.¹³⁰ Prywatni inwestorzy weryfikowali komercyjną opłacalność, ponieważ ich kapitał był zagrożony. NASA uzyskała zewnętrzną weryfikację, której zamówienia *cost-plus* zwykle nie wymagały.

Scenariusz kontrfaktyczny widoczny jest w programach *cost-plus*. Rozwój promu kosmicznego zakładał 40 lotów rocznie przy koszcie 118 dolarów za funt. Zrealizowano cztery loty rocznie przy koszcie 10 000–20 000 dolarów za funt.¹³¹ Skala różnicy dobrze pokazuje znaczenie struktury bodźców.

¹²⁹NASA, *Commercial Market Assessment for Crew and Cargo Systems*, 2011.

¹³⁰G. Autry, *Commercial Orbital Transportation Services: A Case Study for National Industrial Policy*, „New Space”, Vol. 6, No. 3, 2018, s. 191–200.

¹³¹G. Autry, *Commercial Orbital Transportation Services: A New Era in Spaceflight*, w: *Handbook of Space Security*, Springer, 2018; M. Weinzierl, *Space, the Final Economic Frontier*, „Journal of Economic Perspectives”, Vol. 32, No. 2, 2018, s. 177.

Możliwość uogólnienia modelu na inne sektory pozostaje otwartym pytaniem empirycznym. Budownictwo okrętowe, energetyka jądrowa i zamówienia obronne dzielą pewne cechy z przemysłem lotniczo-kosmicznym sprzed programu COTS: kontraktowanie *cost-plus*, fragmentacja dostawców i polityczne ograniczenia konsolidacji. Struktura kontraktu, nie tylko charakterystyka sektora, może wpływać na to, czy zamówienia prowadzą do redukcji czy inflacji kosztów. Możliwość przeniesienia pozostaje jednak nieprzetestowana, a niniejsza praca dostarcza pojedynczego przypadku. Hipoteza zasługuje na badanie, nie na automatyczne stosowanie.

3.1.4. Wnioski dla innych branż kapitałochłonnych

Trzy warunki definiują przypadek raket: wysoka specyficzność aktywów, strome krzywe uczenia oraz zamówienia rządowe kształtujące strukturę rynku. Produkcja samolotów, budownictwo okrętowe i budowa elektrowni jądrowych częściowo dzielą te warunki. Możliwość transferu ma jednak istotne ograniczenia.

Rakiety SpaceX startują często; elektrownie jądrowe nie cechują się porównywalnie wysokim wolumenem produkcji lub operacyjności. SpaceX osiągnęło 134 starty w 2024 roku,¹³² ograniczając deprecjację doświadczenia udokumentowaną w Sekcji 1.1.2. Branże o z natury niskim tempie produkcji nie mogą łatwo utrzymać progu wolumenowego, który czyni ponowne wykorzystanie ekonomicznie opłacalnym i zachowuje efekty uczenia. Przy produkcji realizowanej raz na dekadę utrzymanie wiedzy organizacyjnej jest znacznie trudniejsze.

Niemniej jednak Terzi i Nicoli (2024) zauważają, że redukcje kosztów wynoszenia w kosmos przewyższają te wynikające z przejścia na żeglugę parową, która umożliwiła pierwszą falę globalizacji.¹³³ Hipotetyczne przeniesienie integracji i kontraktowania stałocennego do sektorów morskiego lub jądrowego mogłoby więc mieć istotne konsekwencje, ale nie wynika bezpośrednio z przeprowadzonej estymacji. Model raketowy wymaga nie tylko odpowiedniej struktury kosztów, lecz także trwałego popytu do jej wykorzystania.

3.2. Ograniczenia i kierunki przyszłych badań

3.2.1. Ograniczenia identyfikacji

Centralne wyzwanie empiryczne jest następujące: integracja pionowa i ponowne wykorzystanie są bardzo silnie skorelowane wśród systemów sklasyfikowanych jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne. Wszystkie cztery takie obserwacje w pró-

¹³²SpaceX, *op. cit.*

¹³³A. Terzi, F. Nicoli, *Economists Should Point Their Attention to the Stars*, „Intereconomics”, Vol. 59, No. 2, 2024, s. 108–114.

bie mają VI na poziomie co najmniej 80%, przy czym rakieta New Glenn jest obserwacją wczesnooperacyjną, a rakieta Starship projekcją. Regresja dokumentuje związek wśród 42 rakiet, lecz nie może oddzielnie zidentyfikować wkładu integracji i ponownego wykorzystania, ponieważ w obecnych danych nie zmieniają się one niezależnie.

Współczynnik VI ($-0,029$) jest identyfikowany głównie przez wariancję wśród rakiet jednorazowych, gdzie VI waha się od 10% do 95%. Systemy sklasyfikowane jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne skupiają się przy 80–85%. Dlatego ostrożny wniosek brzmi: VI prognozuje niższą cenę za kilogram ($p < 0,001$), a systemy z tej kategorii są opisowo około 8,4 razy tańsze od jednorazowych. Łączna różnica jest ekonomicznie duża, ale obecne dane nie pozwalają rozstrzygnąć, który mechanizm wnosi większy wkład.

3.2.2. Nieprecyzyjność oszacowania wielorazowości

Współczynnik ponownego wykorzystania nie osiąga istotności statystycznej ($p = 0,148$). Nie oznacza to, że wielorazowość jest nieistotna ekonomicznie. Powód jest prostszy: obecna próba zawiera zbyt mało systemów z ponownym lotem pierwszego stopnia, aby oddzielić ich efekt od wysokiej integracji pionowej.

Przy obserwowanym błędzie standardowym 0,298 konwencjonalny test rozróżniałby od zera dopiero efekt około 0,86 punktu logarytmicznego. Współczynnik $-0,86$ odpowiadałby cenom niższym o około 58%, czyli relacji cenowej około $2,4\times$. Obserwowane oszacowanie $-0,430$ jest mniejsze, dlatego przy tej liczbie obserwacji nie można oszacować go precyzyjnie.

Aby oszacować współczynnik $-0,430$ z typową precyzją oczekiwaną w badaniach empirycznych, potrzeba byłoby około 166 obserwacji, w tym mniej więcej 15 systemów wielorazowych zamiast czterech. Obecna próba zawiera tylko cztery takie systemy, wszystkie skupione przy poziomach VI 80–85%.

Ograniczenie dotyczy więc precyzji estymacji, a nie ekonomicznego znaczenia ponownego wykorzystania. Więcej systemów wielorazowych może wejść do eksploatacji w nadchodzących latach, w tym rakieta Neutron przedsiębiorstwa Rocket Lab i potencjalnie wielorazowe warianty z Chin. Przyszłe próby mogą zapewnić zróżnicowanie potrzebne do oddzielnej identyfikacji wkładu wielorazowości.

3.2.3. Ograniczenia danych

Na moment pisania tej pracy SpaceX jest spółką prywatną i mimo prospektu S-1/A nie publikuje czystych kosztów krańcowych startu ani kosztów za kilogram, a jedynie ceny oraz dane segmentowe.¹³⁴ Ceny odzwierciedlają popyt, konkurencję i pozycjonowanie strategiczne, nie tylko koszty. Gdy ceny startu rakiety Falcon 9 wzrosły z 56,5 miliona

¹³⁴Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

dolarów w 2013 roku do 74 milionów dolarów w 2026 roku,¹³⁵ koszty mogły spaść, pozostać na stałym poziomie lub rosnać wolniej niż ceny. Marża pozostaje nieobserwowalna, co ogranicza precyzję analizy.

Szersza branża jest również mało przejrzysta. Ani ULA, ani Arianespace nie publikują szczegółowych zestawień kosztów. Kontrakty rządowe łączą rozwój, koszty ogólne i produkcję w sposób trudny do dekompozycji.

Wskaźniki VI są oszacowane na podstawie źródeł publicznych, w tym ujawnień spółek, raportów branżowych i dokumentacji łańcucha dostaw; nie zostały zweryfikowane audytowo. Wartość 80–85% dla SpaceX pochodzi od Bergera (2021) i oświadczeń przedsiębiorstwa.¹³⁶ Wartość 60% dla Arianespace wywodzi się z uwagi Faury’ego „Wytwarzamy 20%, kupujemy 80%”, odwróconej dla dostawcy usług startowych. Te oszacowania są przybliżone. Błąd pomiaru może osłabiać współczynniki regresji.

Istotny jest również problem subsydiów państwowych. Rosyjskie i chińskie ceny mogą odzwierciedlać subsydia nieujęte w oficjalnych wartościach. Bez danych o subsydiach porównania cen i kosztów między systemami narodowymi pozostają nieprecyzyjne.

Wartość 1 511 USD/kg dla rakiety New Glenn przedsiębiorstwa Blue Origin to skonstruowany wskaźnik cenowy, obliczony na podstawie szacowanej ceny startu i maksymalnej ładowności LEO. Zakłada on udaną wielorazowość pierwszego stopnia i wystarczający wolumen startów do przekroczenia progu zidentyfikowanego przez Lionnet i Cuellar (2021).¹³⁷ Pierwszy stopień został odzyskany i ponownie użyty, lecz podczas misji NG-3 ładunek trafił na niższą niż planowana orbitę, a 28 maja 2026 r. kolejny egzemplarz rakiety New Glenn eksplodował podczas testu statycznego.¹³⁸ Cena pozostaje więc szacunkiem, a nie obserwowaną katalogową ceną operacyjną dojrzałego systemu.

3.2.4. Selekcja i endogeniczność

Powody integracji SpaceX mają duże znaczenie dla interpretacji wyników. Integracja nie została losowo przydzielona. Musk wybrał integrację pionową po tym, jak rosyjscy dostawcy zażądali cen, które uznał za wygórowane.¹³⁹ Wybór odzwierciedlał jego ocenę, że łańcuchy dostaw w przemyśle lotniczo-kosmicznym przechwytywały nadmierne renty. Ocena ta mogła być trafna, ale mogła też wynikać z cech założyciela: wysokiej tolerancji ryzyka, technicznej pewności siebie i osobistego kapitału.

¹³⁵SpaceX, *Capabilities & Services*, 2026, <https://www.spacex.com/assets/media/Capabilities%26Services.pdf>.

¹³⁶E. Berger, *Liftoff: Elon Musk and the Desperate Early Days That Launched SpaceX*, William Morrow, New York 2021.

¹³⁷P. Lionnet, A. Cuellar, *The Economics of Reusable Launch Vehicles*, Eurospace, Paris 2021.

¹³⁸S. O’Kane, *Blue Origin Successfully Reuses a New Glenn Rocket for the First Time Ever*, TechCrunch, 19 kwietnia 2026; Associated Press, *Blue Origin investigates rocket explosion as public is warned about possible wreckage washing ashore*, 29 maja 2026; E. Berger, *Blue Origin has set a very aggressive return-to-flight timeline*, *Ars Technica*, 2 czerwca 2026.

¹³⁹E. Berger, *op. cit.*, s. 45–52.

Stwarza to problem selekcji. Przedsiębiorstwa wybierające integrację mogą systematycznie różnić się od przedsiębiorstw, które jej nie wybierają. Jeśli te różnice niezależnie powodują niższe koszty lub ceny, to korelacja między integracją a ceną zawyża efekt przyczynowy samej integracji. Rozważmy nieobserwowalne cechy, które mogły napędzać zarówno wybory organizacyjne SpaceX, jak i jego wyniki cenowe i kosztowe:

Tolerancja ryzyka. Elon Musk zainwestował osobisty majątek i według niektórych relacji wielokrotnie zbliżył się do jego utraty. Tradycyjni menedżerowie lotniczo-kosmiczni, odpowiedzialni przed akcjonariuszami i zarządami, mieli mniejsze możliwości podejmowania równoważnego ryzyka. Tolerancja ryzyka może niezależnie umożliwiać redukcję kosztów poprzez eksperymenty, z którymi integracja jedynie koreluje.

Kontrola technicznego założyciela. Elon Musk podejmował decyzje inżynierskie bezpośrednio, czasem kontrowersyjnie. W Boeing czy Lockheed warstwy zarządzania oddzielają menedżerów od produkcji. Kontrola założyciela może umożliwiać szybką iterację niezależnie od poziomu integracji, choć jej bilans organizacyjny jest dyskusyjny.

Normy Doliny Krzemowej. SpaceX rekrutowało programistów przyzwyczajonych do iteracyjnego rozwoju i akceptowalnych porażek. Tradycyjny przemysł lotniczo-kosmiczny funkcjonował w kulturze, w której porażka mogła oznaczać przesłuchania kongresowe. Różnice kulturowe mogą redukować koszty niezależnie od struktury organizacyjnej, choć kwantyfikacja kultury jest bardzo trudna.

Dostęp do kapitału. SpaceX pozyskało kapitał wysokiego ryzyka, a później działało rentownie. ULA i Arianespace zależą od kontraktów rządowych z przypisanymi ograniczeniami politycznymi. Elastyczność kapitałowa może umożliwiać korzyści efektywnościowe, których sama integracja nie wyjaśnia.

Moment wejścia na rynek. SpaceX weszło na rynek, gdy NASA pilnie potrzebowała komercyjnych alternatyw po katastrofie *Columbia* i gdy popyt na komercyjne satelity dojrzywał. Przedsiębiorstwo wchodzące pięć lat wcześniej mogłoby nie mieć wsparcia instytucjonalnego; pięć lat później mogłoby napotkać ugruntowaną konkurencję. Okno czasowe miało znaczenie. Nie wiadomo, czy integracja odniosłaby sukces w innej epoce.

Kierunek obciążenia jest przewidywalny. Jeśli tolerancja ryzyka, kontrola założyciela i czynniki kulturowe powodują zarówno integrację, jak i niskie koszty oraz ceny, to przypisywanie luki cenowej wyłącznie integracji zawyża efekt oddziaływania. Część przewagi cenowej SpaceX może odzwierciedlać cechy założyciela, a nie samą strukturę organizacyjną. Dostępne dane nie pozwalają tego rozstrzygnąć.

Niniejsza praca nie może twierdzić, że integracja *spowodowała* przewagę cenową SpaceX w sensie ścisłej identyfikacji przyczynowej. Dowody wspierają słabsze twierdzenie: integracja jest związana z niższymi cenami, mechanizmy są spójne z teorią kosztów transakcyjnych, a porządek czasowy jest zgodny z interpretacją przyczynową. Spójność ta nie jest jednak dowodem.

Porównanie z Blue Origin częściowo adresuje problem selekcji. Bezos dzieli

pewne cechy z Muskiem: kontrolę założyciela, osobisty kapitał, tolerancję ryzyka i długie horyzonty czasowe. Blue Origin zintegrowało jednak stronę podaży bez osiągnięcia wolumenu i pozycji cenowej SpaceX. Sugeruje to, że sama integracja po stronie podaży, nawet przy korzystnych cechach założyciela, może nie wystarczać. Integracja po stronie popytu może być wiążącym ograniczeniem. Porównanie jest jednak niedoskonałe: Bezos i Musk różnią się w sposób, który może mieć znaczenie, a New Glenn pozostaje wczesnooperacyjną obserwacją, nie dojrzałym kontrfaktycznym odpowiednikiem rakiety Falcon 9.

3.2.5. Wielkość próby i możliwość generalizacji

Próba zawiera 42 rakiety, lecz centralny przypadek ma w praktyce charakter $N = 1$: SpaceX jest jedynym przedsiębiorstwem z integracją zarówno po stronie podaży, jak i po stronie popytu. SpaceX wyłonił się z unikalnego zbiegu okoliczności: potrzeb NASA po zakończeniu programu promu kosmicznego, kontraktów COTS finansujących rozwój zdolności oraz komercyjnego popytu, który zmaterializował się we właściwym momencie. To ogranicza możliwość generalizacji wyników.

3.2.6. Kierunki przyszłych badań

Oszacowanie krzywej uczenia wymaga lepszych danych niż obecnie dostępne. Wiarygodne parametry prawa Wrighta wymagają jednostkowych rekordów produkcyjnych, których SpaceX nie publikuje. Gdyby przedsiębiorstwo kiedykolwiek stanęło przed wymogami ujawnień, badacze mogliby oszacować, czy trajektoria kosztów programu Falcon 9 podąża za normami lotniczo-kosmicznymi, czy reprezentuje odmienny wzorzec.

Nowe przypadki porównawcze dopiero się kształtują. Blue Origin przeprowadziło pierwszy start rakiety New Glenn w styczniu 2025 roku, odzyskało pierwszy stopień w listopadzie 2025 roku i ponownie poleciało tym samym członem w kwietniu 2026 roku. Ponowny lot członu był sukcesem technologicznym, ale problem górnego stopnia podczas NG-3 oraz eksplozja kolejnego egzemplarza rakiety w teście statycznym z 28 maja 2026 r. pokazują, że system nie dokumentuje jeszcze niezawodności całej rakiety w dojrzałej eksploatacji. Rakieta Neutron przedsiębiorstwa Rocket Lab pozostaje natomiast w fazie rozwoju.¹⁴⁰ W przyszłości ich struktury cenowe mogą pomóc oddzielić rolę integracji pionowej od stylu zarządzania i warunków wejścia na rynek.

Transfer polityki pozostaje nieprzetestowany. COTS odniósł sukces w pojazdach startowych. Czy podobne stałocenowe kontrakty etapowe przyspieszyłyby wdrażanie reaktorów jądrowych, budownictwo okrętowe lub wychwytywanie dwutlenku węgla, po-

¹⁴⁰C. Swope, *How Important Is Blue Origin's Second New Glenn Launch?*, CSIS Critical Questions, 14 listopada 2025; Blue Origin, *New Glenn Mission NG-3*, 19 kwietnia 2026; S. O'Kane, op. cit.; Associated Press (2026); Berger (2026); Rocket Lab, *Neutron*, 2024.

zostaje pytaniem otwartym. Terzi i Nicoli (2024) argumentują, że ekonomiści w dużej mierze zignorowali kosmos jako laboratorium polityki przemysłowej.¹⁴¹ Wzorzec zasługuje na rygorystyczną ocenę, zanim zostanie przeniesiony do innych sektorów.

Dwa testy w bliskiej perspektywie mogą dostarczyć informacji na temat schematu integracja-wielorazowość. Blue Origin zakontraktowało 12 startów dla programu Kuiper z opcją na 15 kolejnych,¹⁴² co mogłoby przesunąć wolumen startów rakiety New Glenn w kierunku progu 6–9 startów rocznie wskazywanego przez Lionnet i Cuellar (2021), jeśli loty zostaną wykonane w wystarczająco krótkim okresie. Prognozowana cena Blue Origin wynosząca 1 511 USD/kg zakłada, że ten wolumen się zmaterializuje i wielorazowość stanie się opłacalna. Jeśli Blue Origin osiągnie ceny zbliżone do poziomu cenowego rakiety Falcon 9 poprzez zewnętrzne kontrakty związane z programem Kuiper, a nie wewnętrzny popyt, sugerowałoby to, że zewnętrzne kontrakty mogą zastąpić integrację po stronie popytu, osłabiając tezę o konieczności posiadania własnego segmentu ładunkowego. Jeśli nie osiągnie tych cen pomimo zakontraktowanego wolumenu, wspierałoby to argument, że wewnętrzny popyt zapewnia elastyczność harmonogramowania, pewność popytu i ograniczenie ryzyka renegocjacji.

Istotnym testem będzie również Ariane 6. ESA ogłosiła cele redukcji kosztów, zachowując jednocześnie zwrot geograficzny. Gdyby Arianespace osiągnęło poziomy cenowe rakiety Falcon 9 do 2030 roku bez reformy strukturalnej, oznaczałoby to, że fragmentaryczna produkcja może umożliwiać konkurencyjność cenową poprzez mechanizmy, których niniejsza praca nie identyfikuje.

¹⁴¹A. Terzi, F. Nicoli, *Economists Should Point Their Attention to the Stars*, „Intereconomics”, Vol. 59, No. 2, 2024, s. 109.

¹⁴²Swope, *op. cit.*

ZAKOŃCZENIE

Celem pracy było zidentyfikowanie mechanizmów ekonomicznych, które pomagają wyjaśnić przewagę cenową SpaceX nad tradycyjnymi dostawcami usług wynoszenia ładunków na orbitę okołozemską. Przeprowadzona analiza wskazuje, że przewaga ta nie wynika z pojedynczej innowacji technologicznej, lecz z komplementarnego układu organizacyjnego: integracji po stronie podaży, integracji po stronie popytu oraz wolumenu startów umożliwiającego ekonomiczne wykorzystanie wielorazowości. Po stronie podaży przedsiębiorstwo zachowało wiedzę inżynierską, utrzymując projektowanie i produkcję wewnątrz organizacji. Po stronie popytu system Starlink zapewnił stabilny wolumen startów, którego rynek zewnętrzny nie dostarczał w porównywalnej skali.

Hipoteza pracy została potwierdzona w zakresie, w jakim pozwalają na to dostępne dane. Wyniki wskazują, że przewaga cenowa SpaceX jest spójna z komplementarnym oddziaływaniem integracji pionowej po stronie podaży, integracji po stronie popytu oraz wysokiego wolumenu startów. Nie oznacza to jednak pełnego potwierdzenia przyczynowego: analiza dokumentuje silną zgodność zależności empirycznych z przyjętymi ramami teoretycznymi, ale nie pozwala odseparować wpływu każdego mechanizmu w sensie ścisłej identyfikacji ekonometrycznej.

Skala różnicy jest znacząca. Systemy sklasyfikowane jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub projekcyjne mają średni wskaźnik cenowy rzędu 1 766 dolarów za kilogram, czyli około jednej ósmej ceny alternatyw jednorazowych wynoszących 14 759 dolarów/kg. W modelu przekrojowym wzrost integracji pionowej o 10 punktów procentowych wiąże się z ceną za kilogram niższą o około 25% ($p < 0,001$). Efekty te są jednak splecione: wszystkie cztery takie obserwacje w 42-elementowej próbie wykazują integrację pionową na poziomie 80% lub wyższym, przy czym rakieta New Glenn pozostaje obserwacją wczesnooperacyjną, a rakieta Starship projekcją. Regresja nie jest więc w stanie czysto rozdzielić wkładu integracji, wielorazowości i skali.

Mechanizm działa sekwencyjnie. Integracja po stronie podaży pojawiła się pierwsza i pozwoliła zatrzymać wiedzę ukrytą wewnątrz organizacji. Sama integracja nie wystarcza jednak do opłacalności ponownego wykorzystania: potrzebny jest wolumen startów powyżej progu sześciu do dziewięciu lotów rocznie wskazywanego przez Lionnet

i Cuellara.¹⁴³ System Starlink zapewnił ten wolumen w skali, której Blue Origin, mimo integracji po stronie podaży i pierwszego ponownego lotu członu rakiety New Glenn w kwietniu 2026 roku, jeszcze nie osiągnęło. Ponowny lot był sukcesem technologicznym, lecz problem górnego stopnia podczas NG-3 oraz eksplozja kolejnego egzemplarza rakiety w teście statycznym z 28 maja 2026 r. oznaczają, że rakieta New Glenn nie dokumentuje jeszcze niezawodności całego systemu w dojrzałej eksploatacji.¹⁴⁴

Barierę przyjęcia podobnego modelu przez dotychczasowych graczy wynikają przede wszystkim z uwarunkowań instytucjonalnych. Kontrakty typu koszt plus marża (*cost-plus*) osłabiały bodźce do oszczędzania, europejski zwrot geograficzny utrzymywał rozproszenie produkcji, a struktura *joint venture* ULA ograniczała tempo adaptacji. Instytucje te były racjonalne w swoim pierwotnym kontekście, lecz gorzej dostosowane do sytuacji, w której konkurencja zaczęła zależeć od szybkiej iteracji, integracji i wysokiego wolumenu startów. Program COTS pokazał zmianę bodźców w praktyce: kamienie milowe w systemie stałej ceny (*fixed-price*) zastąpiły zwrot kosztów, a SpaceX ponosiło ryzyko kosztowe i zachowywało korzyści z efektywności.

Należy wskazać kilka ograniczeń przedstawionej analizy. W momencie pisania tej pracy SpaceX nie publikuje czystych kosztów krańcowych startu ani kosztów za kilogram, mimo że prospekt S-1/A zawiera dane segmentowe. Obserwowalne są przede wszystkim ceny. Praca dokumentuje związek, a nie przyczynowość w ścisłym sensie. Sekwencja czasowa jest zgodna z interpretacją przyczynową, ale jej nie przesądza, ponieważ praktyki przywódcze, moment wejścia, dostęp do kapitału i tolerancja ryzyka mogą niezależnie wpływać na wyniki. Wielkość próby jest również ograniczona: centralny przypadek to w praktyce jedno przedsiębiorstwo, a rakiety komercyjne New Glenn i Neutron dopiero zaczynają dostarczać przyszłych przypadków porównawczych.

Dowody wspierają ostrożniejsze twierdzenie: najniższe dojrzałe ceny katalogowe w próbie należą do zintegrowanych systemów wielorazowych, a najmniej zintegrowane systemy znajdują się bliżej górnego krańca rozkładu cen. Jedyne przedsiębiorstwo łączące integrację po stronie podaży i popytu przekroczyło próg, przy którym ponowne wykorzystanie staje się ekonomiczne w skali. Przedsiębiorstwa takie jak Blue Origin, które posiadają integrację po stronie podaży bez komponentu popytowego, nie przekroczyły jeszcze tego progu w porównywalnej skali. W analizowanych przypadkach brak obu typów integracji wiąże się ze strukturą kosztów i wolumenu, która utrudnia opłacalność ponownego wykorzystania niezależnie od możliwości inżynierskich.

¹⁴³P. Lionnet, A. Cuellar, *Launch Services Economics: Break-Even Analysis for Reusable Systems*, Eurospace, 2021.

¹⁴⁴C. Swope, *How Important Is Blue Origin's Second New Glenn Launch?*, CSIS Critical Questions, 14 listopada 2025; Blue Origin, *New Glenn Mission NG-3*, 19 kwietnia 2026; S. O'Kane, *Blue Origin Successfully Reuses a New Glenn Rocket for the First Time Ever*, *TechCrunch*, 19 kwietnia 2026; Associated Press, *Blue Origin investigates rocket explosion as public is warned about possible wreckage washing ashore*, 29 maja 2026; E. Berger, *Blue Origin has set a very aggressive return-to-flight timeline*, *Ars Technica*, 2 czerwca 2026.

Różnica między SLS przy 43 158 dolarów/kg a rakieta Falcon 9 przy 3 364 dolarach/kg, czyli współczynnik 13, ilustruje skrajny wariant wniosków z niniejszej analizy. W tym porównaniu rakiet Falcon 9 osiąga cenę za kilogram niższą o rząd wielkości od rozdrobnionego programu rządowego. W szerszej próbie przewaga cenowa systemów sklasyfikowanych jako wielorazowe jest mniejsza, lecz pozostaje ekonomicznie znacząca. Najważniejszy wniosek jest jednak systemowy: wielorazowość obniża ceny dopiero wtedy, gdy organizacja potrafi utrzymać wiedzę techniczną i zapewnić wystarczający popyt na częste loty swoich systemów. W tym sensie system Starlink nie jest zaledwie dodatkiem do historii rakiety Falcon 9, a raczej częścią mechanizmu, który uczynił wielorazowość ekonomicznie trwałą.

ZAŁĄCZNIK A.

ZBIÓR DANYCH I DOKUMENTACJA ŹRÓDŁOWA

Załącznik zawiera pełny zbiór danych wykorzystany w analizie empirycznej, dokumentację źródeł cenowych oraz uzasadnienie przypisania obserwacji do poziomów jakości źródeł. Materiał ten ma charakter dokumentacyjny: stanowi podstawę replikowalności obliczeń, lecz nie jest konieczny do śledzenia głównej argumentacji w Rozdziale 2.

A.1. Pełny zbiór danych

Tabela A.1. Zbiór danych rakiet nośnych (42 rakiety)

Rakieta	Kraj	Operator	Cena/kg (USD 2024)	Wielokr.	VI%	Starty	Źr.
Ponowny lot pierwszego stopnia i projekcje wielorazowości							
Starship	USA	SpaceX	667 dol.	Tak	85%	12	4
New Glenn	USA	Blue Origin	1 511 dol.	Tak	80%	3	3
Falcon Heavy	USA	SpaceX	1 520 dol.	Tak	80%	11	1
Falcon 9	USA	SpaceX	3 364 dol.	Tak	80%	~620	1
Częściowa wielorazowość							
Electron	USA/NZ	Rocket Lab	26 667 dol.	Częśc.	85%	71	1
Space Shuttle	USA	NASA	78 436 dol.	Częśc.	20%	135	2
Jednorazowe							
Proton-M	Rosja	Roscosmos	3 522 dol.	Nie	90%	430	2
Long March 8	Chiny	CASC	3 553 dol.	Nie	95%	8	2
Vulcan Centaur	USA	ULA	3 676 dol.	Nie	40%	3	3
Long March 5	Chiny	CASC	4 000 dol.	Nie	95%	16	3
Long March 2D	Chiny	CASC	4 000 dol.	Nie	95%	85	2
Angara A5	Rosja	Roscosmos	4 082 dol.	Nie	90%	5	3
Soyuz-2	Rosja	Roscosmos	5 488 dol.	Nie	90%	157	2
LVM3	Indie	ISRO	5 500 dol.	Nie	90%	8	3
Gravity-1	Chiny	Orienspace	5 538 dol.	Nie	70%*	2	2
Zenit-3SL	Ukraina	Sea Launch	5 823 dol.	Nie	85%	36	3

Kontynuacja na następnej stronie

Tabela A.1 – kontynuacja z poprzedniej strony

Rakieta	Kraj	Operator	Cena/kg (USD 2024)	Wielokr.	VI%	Starty	Źr.
H-IIA	Japonia	JAXA/MHI	6 000 dol.	Nie	60%	50	3
Long March 3B	Chiny	CGWIC	6 087 dol.	Nie	95%	112	2
Ariane 64	Europa	Arianespace	6 235 dol.	Nie	60%	0	3
H3	Japonia	JAXA/MHI	6 923 dol.	Nie	60%	7	2
PSLV	Indie	ISRO	7 105 dol.	Nie	90%	62	2
Atlas V	USA	ULA	7 958 dol.	Nie	30%	100	2
SSLV	Indie	ISRO	8 000 dol.	Nie	90%	3	2
Angara 1.2	Rosja	Roscosmos	8 857 dol.	Nie	90%	6	3
ABL RS1	USA	ABL Space	8 889 dol.	Nie	80%	1	1
GSLV Mk II	Indie	ISRO	9 400 dol.	Nie	90%	18	3
Terran 1	USA	Relativity	9 600 dol.	Nie	90%	1	1
Ariane 62	Europa	Arianespace	9 662 dol.	Nie	60%	4	3
Ariane 5	Europa	Arianespace	10 095 dol.	Nie	60%	117	2
Antares 230+	USA	Northrop	10 625 dol.	Nie	30%	5	2
Ceres-1	Chiny	Galactic En.	10 950 dol.	Nie	85%	22	1
Firefly Alpha	USA	Firefly	12 821 dol.	Nie	80%	7	1
Delta IV Heavy	USA	ULA	13 893 dol.	Nie	50%	16	2
Hyperbola-1	Chiny	iSpace	16 667 dol.	Nie	80%	7	3
Vega C	Europa	Avio	17 391 dol.	Nie	60%	4	2
Kuaizhou-1A	Chiny	CASIC	20 000 dol.	Nie	80%*	27	2
Minotaur IV	USA	Northrop	24 207 dol.	Nie	30%	7	2
Nuri (KSLV-II)	Korea Pld.	KARI	30 769 dol.	Nie	70%*	4	2
Epsilon	Japonia	JAXA	31 667 dol.	Nie	60%*	6	2
Titan IV	USA	USAF	36 303 dol.	Nie	20%	39	2
SLS Block 1	USA	NASA	43 158 dol.	Nie	10%	2	2
Pegasus XL	USA	Northrop	112 867 dol.	Nie	60%	45	2

Uwagi i źródła:

Źródło: opracowanie własne na podstawie dokumentacji źródeł cenowych w Tabeli A.2 oraz źródeł wymienionych w Bibliografii.

- 42 rakiety z 13 krajów (USA, Rosja, Chiny, Europa, Indie, Japonia, Ukraina, Nowa Zelandia, Korea Południowa)
- Wielorazowość oznacza odzyskanie i ponowny lot pierwszego stopnia; w przypadku rakiety Starship oznacza projekcję, a nie dojrzałą eksploatację. Oznaczenie „Część.” dla programu Space Shuttle i rakiety Electron jest kategorią porządkową dla niepełnego ponownego użycia, a nie twierdzeniem, że oba systemy są technologicznie porównywalne.
- Wszystkie systemy sklasyfikowane jako wielorazowe, wczesnooperacyjne lub pro-

jekcyjne mają $VI \geq 80\%$

- VI% oznaczone gwiazdką (*) = szacunek własny na podstawie analizy struktury organizacyjnej i publicznych informacji o relacjach z dostawcami
- 65-krotna różnica między SLS (43 158 dol./kg) a rakieta Starship (667 dol./kg) opiera się na projekcji rakiety Starship i ma charakter ilustracyjny
- Wartość 1511 dol./kg dla rakiety New Glenn jest szacunkiem wczesnooperacyjnym poziomu 3; wartość 667 dol./kg dla rakiety Starship = 100 mln dol. ÷ 150 000 kg (projekcja poziomu 4); SpaceX celuje w 2–10 mln dol. za start, co implikuje 13–67 dol./kg¹⁴⁵ Prospekt S-1/A opisuje wariant Starship V3 jako system projektowany do wyniesienia 100 ton w konfiguracji wielorazowej, a przyszłe generacje jako potencjalnie dwukrotnie większe;¹⁴⁶ przyjęte 150 000 kg pozostaje więc scenariuszem pośrednim.
- Kolumna „Źr.” przypisuje każdemu wierszowi poziom najbliższego źródła ceny: 1 = publikacja przedsiębiorstwa, 2 = kontrakt rządowy lub oficjalna dokumentacja publiczna, 3 = szacunek branżowy, 4 = projekcja. Dokładne źródło ceny dla każdej rakiety podaje Tabela A.2.
- Ceny rosyjskie i chińskie mogą odzwierciedlać dotacje państwowe; należy traktować z ostrożnością
- **Główne źródła danych:** H. W. Jones (2018) dla historycznych kosztów amerykańskich; dokumenty kontraktowe NASA i audyty GAO dla programów rządowych; opublikowane ceny SpaceX (aktualizacja ceny rakiety Falcon 9 do 2026 r.); prospekt S-1/A SpaceX dla aktualizacji liczby startów rakiet Falcon i testów rakiety Starship; raporty ESA dla rakiet europejskich; ujawnienia JAXA, ISRO i CASC dla rakiet azjatyckich; BryceTech (2024) dla pozostałych liczby startów.¹⁴⁷
- **Zakres źródeł cenowych:** Ceny rakiet Falcon 9 i Falcon Heavy oparto na cennikach SpaceX; cenę rakiety Starship przyjęto jako projekcję poziomu 4, a cenę rakiety New Glenn zrekonstruowano na podstawie publicznych informacji Blue Origin oraz szacunków branżowych. Historyczne systemy amerykańskie oparto przede wszystkim na Jonesie, dokumentach NASA, kontraktach rządowych i audytach GAO. Systemy europejskie oparto na źródłach ESA, Arianespace i literaturze branżowej, a

¹⁴⁵M. Davis, *Starship: The Economics of Full Reusability*, Australian Strategic Policy Institute, 2024.

¹⁴⁶Space Exploration Technologies Corp. (2026), *Form S-1/A Registration Statement*.

¹⁴⁷Pełna dokumentacja źródeł dostępna w Bibliografii. Wszystkie ceny przeliczone na USD z 2024 r. przy użyciu kalkulatora inflacji CPI U.S. Bureau of Labor Statistics, z wyjątkiem aktualnej ceny katalogowej rakiety Falcon 9, podanej nominalnie według dokumentu SpaceX obowiązującego do 2026 r.

systemy rosyjskie, chińskie, indyjskie, japońskie i koreańskie na ujawnieniach operatorów, dokumentach instytucjonalnych i szacunkach branżowych wskazanych w Bibliografii.

Tabela A.2. Dokumentacja źródeł cenowych w zbiorze danych

Rakiet	Obliczenie ceny/kg	Źródło ceny i uwagi metodologiczne
Starship	100 mln USD / 150 000 kg	Davis (2024) oraz publiczne projekcje SpaceX dotyczące docelowej ekonomiki rakiety Starship. Prospekt S-1/A wskazuje 100 ton dla wariantu Starship V3 w konfiguracji wielorazowej oraz możliwe 200 ton dla przyszłych generacji. Wartość ma charakter projekcyjny i służy wyłącznie jako scenariusz porównawczy poziomu 4.
New Glenn	68 mln USD / 45 000 kg	Szacunek branżowy zestawiony z publicznymi informacjami Blue Origin, kontraktami NASA VADR/ESCAPADE oraz obserwacjami Swope’a (2025). Nie jest to dojrzała cena katalogowa; test statyczny 28 maja 2026 r. dodatkowo potwierdza wczesnooperacyjny status obserwacji.
Falcon Heavy	97 mln USD / 63 800 kg	Cennik SpaceX <i>Capabilities & Services</i> (2026); przyjęto standardową cenę katalogową i maksymalną deklarowaną ładowność LEO.
Falcon 9	74 mln USD / 22 000 kg	Cennik SpaceX <i>Capabilities & Services</i> (2026); aktualna cena katalogowa obowiązująca do 2026 r. i deklarowana maksymalna ładowność LEO.
Electron	8 mln USD / 300 kg	Rocket Lab, raport SEC Form 10-K za 2024 r. oraz materiały relacji inwestorskich; przyjęto aktualną cenę kontraktową około 8 mln USD.
Space Shuttle	2 157 mln USD / 27 500 kg	Jones (2018), Appendix A; wartość kosztu za kilogram przeliczona na USD z 2024 r. przy użyciu CPI-U.
Proton-M	81 mln USD / 23 000 kg	CSIS Aerospace Security Project, ILS Proton Breeze M oraz dane Roscosmos dla cen przed 2022 r.; ceny rosyjskie traktowane jako mniej przejrzyste po 2022 r.
Long March 8	27 mln USD / 7 600 kg	Publiczne informacje CASC/CALT oraz zestawienia chińskich usług startowych; cena przeliczona z CNY na USD według kursu 2024 r.
Vulcan Centaur	100 mln USD / 27 200 kg	ULA RocketBuilder, komunikaty ULA i szacunki branżowe dotyczące docelowej ceny rakiety Vulcan Centaur.
Long March 5	100 mln USD / 25 000 kg	Szacunki branżowe i dokumentacja CASC dla ciężkiego wariantu Long March 5; cena ma poziom 3 ze względu na ograniczoną przejrzystość.

Kontynuacja na następnej stronie

Tabela A.2 – kontynuacja z poprzedniej strony

Rakieta	Obliczenie ceny/kg	Źródło ceny i uwagi metodologiczne
Long March 2D	16 mln USD / 4 000 kg	Kontrakty Changguang/CASC i publiczne informacje o komercyjnych usługach Long March; cena zaokrąglona do pełnych milionów USD.
Angara A5	100 mln USD / 24 500 kg	Roscosmos/Khrunichev oraz TASS (2020) dla kosztu startu ciężkiego wariantu; szacunek branżowy poziomu 3.
Soyuz-2	45 mln USD / 8 200 kg	Glavkosmos/Roscosmos oraz historyczne kontrakty komercyjne; cena traktowana jako przybliżenie ze względu na sankcje i ograniczenia rynku po 2022 r.
LVM3	55 mln USD / 10 000 kg	ISRO oraz raport roczny NSIL 2024–25 dotyczący komercyjnych usług LVM3; wartość przyjęta jako środek przedziału szacunkowego.
Gravity-1	36 mln USD / 6 500 kg	Publiczne wypowiedzi Orienspace o cenie 5–6 tys. USD/kg oraz China in Space (2024); przyjęto środek przedziału.
Zenit-3SL	80 mln USD / 13 740 kg	Historyczne dane Sea Launch i szacunki branżowe dla misji komercyjnych Zenit-3SL; wartość poziomu 3.
H-IIA	90 mln USD / 15 000 kg	JAXA/MHI oraz historyczne zestawienia cen H-IIA; kwota wyrażona w USD z 2024 r. dla porównywalności z pozostałą próbą.
Long March 3B	70 mln USD / 11 500 kg	Kontrakty ChinaSat/CGWIC i publiczne dane o usługach Long March 3B; cena przeliczona na USD z 2024 r.
Ariane 64	135 mln USD / 21 650 kg	ESA, Arianespace i European Spaceflight; przyjęto aktualny szacunek ceny wariantu z czterema boosterami.
H3	45 mln USD / 6 500 kg	JAXA/MHI; docelowa cena około 5 mld JPY, przeliczona na USD i zestawiona z deklarowaną ładownością LEO.
PSLV	27 mln USD / 3 800 kg	ISRO oraz raport roczny NSIL 2024–25; przyjęto komercyjną cenę startu, nie niższy wewnętrzny koszt produkcji.
Atlas V	150 mln USD / 18 850 kg	Kontrakty NASA/USAF oraz ULA RocketBuilder; przyjęto reprezentatywną wartość dla cięższego wariantu Atlas V.
SSLV	4 mln USD / 500 kg	ISRO oraz raport roczny NSIL 2024–25; deklaracje kosztu usługi małej rakiety SSLV po zakończeniu fazy rozwoju.
Angara 1.2	31 mln USD / 3 500 kg	ILS Angara 1.2, Roscosmos/Khrunichev i szacunki branżowe; szacunek ceny lekkiego wariantu.
ABL RS1	12 mln USD / 1 350 kg	Materiały ABL Space Systems i zestawienia komercyjnych cen małych raket; publikacja przedsiębiorstwa poziomu 1.
GSLV Mk II	47 mln USD / 5 000 kg	ISRO oraz dane instytucjonalne o misjach GSLV Mk II; cena przybliżona dla porównywalności z innymi raketami.

Kontynuacja na następnej stronie

Tabela A.2 – kontynuacja z poprzedniej strony

Rakieta	Obliczenie ceny/kg	Źródło ceny i uwagi metodologiczne
Terran 1	12 mln USD / 1 250 kg	Relativity Space, materiały inwestorskie i komunikaty przedsiębiorstwa przed wycofaniem Terran 1.
Ariane 62	100 mln USD / 10 350 kg	ESA, Arianespace i European Spaceflight; przyjęto aktualny szacunek dla wariantu z dwoma boosterami.
Ariane 5	212 mln USD / 21 000 kg	ESA/Arianespace oraz historyczne zestawienia CSIS/Jones; cena przeliczona na USD z 2024 r.
Antares 230+	85 mln USD / 8 000 kg	Kontrakty NASA CRS oraz dane Northrop Grumman dotyczące programu Antares; wartość kontraktowa poziomu 2.
Ceres-1	4,38 mln USD / 400 kg	Galactic Energy oraz Jones (2020) w <i>SpaceNews</i> o programie Ceres-1; cena deklarowana przedsiębiorstwa.
Firefly Alpha	15 mln USD / 1 170 kg	Firefly Aerospace, kontrakty NASA VADR i materiały przedsiębiorstwa; cena katalogowa małej rakiety.
Delta IV Heavy	400 mln USD / 28 790 kg	Kontrakty USAF/NRO i zestawienia CSIS/Jones; przyjęto reprezentatywną cenę późnego okresu eksploatacji.
Hyperbola-1	5 mln USD / 300 kg	iSpace oraz Payload (2024) dla statusu programu Hyperbola; szacunek ceny komercyjnej chińskiej małej rakiety.
Vega C	40 mln USD / 2 300 kg	Avio, ESA i Arianespace; przyjęto górny punkt szacunku 35–40 mln EUR po przeliczeniu na USD.
Kuaizhou-1A	6 mln USD / 300 kg	CASIC/Expace, China Daily (2017) oraz Space.com (2020) opisujący aukcję Taobao na start Kuaizhou-1A; wartość zaokrąglona do 6 mln USD.
Minotaur IV	42 mln USD / 1 735 kg	Northrop Grumman, NASA Launch Services Program i kontrakty rządowe USA; cena kontraktowa poziomu 2.
Nuri (KSLV-II)	80 mln USD / 2 600 kg	Korea Times oraz materiały KASA/KARI; przyjęto publicznie raportowany koszt startu Nuri.
Epsilon	38 mln USD / 1 200 kg	JAXA, w tym wywiad Yasuhiro Mority dotyczący kosztu 3,8 mld JPY, przeliczony na USD.
Titan IV	787 mln USD / 21 680 kg	CSIS/Jones oraz historyczne kontrakty USAF; koszt przeliczony na USD z 2024 r.
SLS Block 1	4 100 mln USD / 95 000 kg	NASA OIG i GAO dla kosztu pojedynczej misji SLS/Orion oraz infrastruktury; nie jest to cena komercyjna.
Pegasus XL	50 mln USD / 443 kg	Northrop Grumman, NASA Launch Services Program i kontrakty rządowe dla misji Pegasus XL.

A.1.1. Uzasadnienie jakości źródeł i kodowania VI

Tabela A.3. Uzasadnienie poziomów jakości źródeł cenowych

Rakieta	Poziom	Uzasadnienie przypisania
Starship	4	Cena oparta na publicznej projekcji docelowej ekonomiki rakiety Starship, nie na dojrzałej cenie katalogowej ani kontrakcie operacyjnym. Prospekt S-1/A potwierdza 12 testów i zakres 100–200 ton ładowności w zależności od generacji, ale nie podaje ceny operacyjnej.
New Glenn	3	Cena zrekonstruowana z informacji Blue Origin, kontraktów NASA i szacunków branżowych; obserwacja pozostaje wczesnooperacyjna.
Falcon Heavy	1	Cena katalogowa i parametry ładowności pochodzą z dokumentu usługowego SpaceX.
Falcon 9	1	Cena katalogowa i ładowność pochodzą z dokumentu usługowego SpaceX obowiązującego do 2026 r.; liczba startów została zaktualizowana według prospektu S-1/A.
Electron	1	Cena wynika z raportowania Rocket Lab i materiałów przedsiębiorstwa dla usług Electron.
Space Shuttle	2	Wartość historyczna oparta na opracowaniu Jonesa i dokumentach NASA, po korekcie inflacyjnej.
Proton-M	2	Cena oparta na historycznych danych ILS/Roscosmos i publicznych zestawieniach instytucjonalnych, z zastrzeżeniem ograniczonej przejrzystości rynku rosyjskiego.
Long March 8	2	Wartość pochodzi z publicznych informacji CASC/CALT i zestawień usług startowych.
Vulcan Centaur	3	Cena jest szacunkiem docelowym zestawionym z ULA RocketBuilder i źródłami branżowymi, bez stabilnej ceny katalogowej dojrzałej eksploatacji.
Long March 5	3	Cena ciężkiego wariantu jest szacunkiem branżowym przy ograniczonej przejrzystości publicznych cen chińskich.
Long March 2D	2	Wartość oparto na publicznych informacjach CASC/CGWIC i komercyjnych komunikatach startowych.
Angara A5	3	Cena rekonstruowana z danych Roscosmos/Khrunichev i doniesień branżowych, bez przejrzystej ceny katalogowej.
Soyuz-2	2	Wartość oparta na historycznych kontraktach i informacjach Roscosmos/Glavkosmos, z ostrożnością po 2022 r.
LVM3	3	Cena przyjęta jako środek publicznego przedziału szacunkowego NSIL/ISRO dla misji komercyjnych.
Gravity-1	2	Wartość oparta na publicznych wypowiedziach operatora i specjalistycznym monitoringu China in Space.
Zenit-3SL	3	Cena historyczna zrekonstruowana z danych Sea Launch i szacunków branżowych.
H-IIA	3	Cena oparta na zestawieniach JAXA/MHI i szacunkach branżowych, bez jednolitej ceny katalogowej.

Kontynuacja na następnej stronie

Tabela A.3 – kontynuacja z poprzedniej strony

Rakieta	Poziom	Uzasadnienie przypisania
Long March 3B	2	Wartość oparta na kontraktach i komunikatach CGWIC dotyczących usług Long March.
Ariane 64	3	Cena jest aktualnym szacunkiem ESA/Arianespace i źródeł branżowych dla wariantu z czterema boosterami.
H3	2	Cena oparta na publicznym celu kosztowym JAXA/MHI i deklarowanej ładowności.
PSLV	2	Wartość wynika z informacji ISRO oraz raportu rocznego NSIL 2024–25 o komercyjnych usługach startowych.
Atlas V	2	Cena oparta na kontraktach NASA/USAF i narzędziu ULA RocketBuilder.
SSLV	2	Wartość pochodzi z publicznych informacji ISRO oraz raportu rocznego NSIL 2024–25 o komercyjnych usługach SSLV.
Angara 1.2	3	Cena lekkiego wariantu jest szacunkiem opartym na Roscosmos i źródłach branżowych.
ABL RS1	1	Cena pochodzi z komunikatu ABL o poziomie 10 000 USD/kg oraz dokumentu użytkownika ładunku RS1.
GSLV Mk II	3	Cena jest przybliżeniem z danych instytucjonalnych ISRO, stosowanym dla porównywalności z innymi systemami.
Terran 1	1	Cena oparta na materiałach przedsiębiorstwa i publicznej dokumentacji komercyjnej przed wycofaniem rakiety.
Ariane 62	3	Cena jest szacunkiem dla wariantu Ariane 6 z dwoma boosterami, opartym na ESA/Arianespace i źródłach branżowych.
Ariane 5	2	Cena oparta na historycznych danych ESA/Arianespace i publicznych zestawieniach instytucjonalnych.
Antares 230+	2	Wartość wynika z kontraktów NASA CRS i danych Northrop Grumman.
Ceres-1	1	Cena oparta na deklaracjach Galactic Energy i publicznych materiałach komercyjnych.
Firefly Alpha	1	Cena oparta na materiałach Firefly i kontraktach NASA VADR dla usług startowych.
Delta IV Heavy	2	Cena oparta na kontraktach USAF/NRO i publicznych zestawieniach historycznych.
Hyperbola-1	3	Cena jest szacunkiem dla chińskiej małej rakiety, opartym na iSpace i źródłach branżowych.
Vega C	2	Wartość pochodzi z publicznych informacji Avio, ESA i Arianespace.
Kuaizhou-1A	2	Cena oparta na informacjach CASIC/Expace oraz publicznie opisanej sprzedaży usług startowych.
Minotaur IV	2	Wartość pochodzi z kontraktów rządowych USA i programu NASA Launch Services.
Nuri (KSLV-II)	2	Cena oparta na publicznych informacjach KARI/KASA, Hanwha i prasie gospodarczej Korei Południowej.

Kontynuacja na następnej stronie

Tabela A.3 – kontynuacja z poprzedniej strony

Rakiet	Poziom	Uzasadnienie przypisania
Epsilon	2	Wartość oparta na informacjach JAXA, w tym wywiadzie Yasuhiro Mority wskazującym koszt pierwszego startu około 3,8 mld JPY.
Titan IV	2	Cena oparta na historycznych kontraktach USAF i publicznych zestawieniach kosztów.
SLS Block 1	2	Wartość oparta na raportach NASA OIG i GAO dotyczących kosztów misji Artemis/SLS.
Pegasus XL	2	Cena oparta na Northrop Grumman, NASA Launch Services Program i kontraktach rządowych.

Tabela A.4. Składowe kodowania integracji pionowej według rakiety

Rakiet	Siln.	Strukt.	Awion.	Int.	Oper.	Dost.	VI%
Starship	22	13	13	17	8	12	85
New Glenn	20	12	12	16	8	12	80
Falcon Heavy	20	12	12	16	8	12	80
Falcon 9	20	12	12	16	8	12	80
Electron	22	13	13	17	8	12	85
Space Shuttle	3	3	3	4	3	4	20
Proton-M	23	14	13	18	9	13	90
Long March 8	25	15	14	19	9	13	95
Vulcan Centaur	8	6	6	8	5	7	40
Long March 5	25	15	14	19	9	13	95
Long March 2D	25	15	14	19	9	13	95
Angara A5	23	14	13	18	9	13	90
Soyuz-2	23	14	13	18	9	13	90
LVM3	23	14	13	18	9	13	90
Gravity-1	16	10	10	14	7	13	70
Zenit-3SL	22	13	13	17	8	12	85
H-IIA	12	9	9	12	7	11	60
Long March 3B	25	15	14	19	9	13	95
Ariane 64	12	9	9	12	7	11	60
H3	12	9	9	12	7	11	60
PSLV	23	14	13	18	9	13	90
Atlas V	5	4	4	6	5	6	30
SSLV	23	14	13	18	9	13	90
Angara 1.2	23	14	13	18	9	13	90
ABL RS1	20	12	12	16	8	12	80
GSLV Mk II	23	14	13	18	9	13	90
Terran 1	23	14	13	18	9	13	90
Ariane 62	12	9	9	12	7	11	60
Ariane 5	12	9	9	12	7	11	60
Antares 230+	5	4	4	6	5	6	30

Kontynuacja na następnej stronie

Tabela A.4 – kontynuacja z poprzedniej strony

Rakietą	Siln.	Strukt.	Awion.	Int.	Oper.	Dost.	VI%
Ceres-1	22	13	13	17	8	12	85
Firefly Alpha	20	12	12	16	8	12	80
Delta IV Heavy	10	8	8	10	6	8	50
Hyperbola-1	20	12	12	16	8	12	80
Vega C	12	9	9	12	7	11	60
Kuaizhou-1A	20	12	12	16	8	12	80
Minotaur IV	5	4	4	6	5	6	30
Nuri (KSLV-II)	16	10	10	14	7	13	70
Epsilon	12	9	9	12	7	11	60
Titan IV	3	3	3	4	3	4	20
SLS Block 1	1	1	1	2	2	3	10
Pegasus XL	12	9	9	12	7	11	60

Uwaga: Maksymalne wartości składowych wynoszą odpowiednio 25 punktów za silniki i napęd, 15 za struktury, 15 za awionikę i oprogramowanie, 20 za integrację systemową i testy, 10 za operacje startowe oraz 15 za kontrolę nad dostawcami krytycznymi. Suma składowych daje wskaźnik VI użyty w Tabeli A.1.

BIBLIOGRAFIA

ABL Space Systems. (2022). *ABL Space Systems payload user's guide: RS1 launch vehicle*. <https://ablspaceystems.com/wp-content/uploads/2022/06/ABL-Payload-Users-Guide-2022-V1.pdf>

ABL Space Systems. (2019, 29 stycznia). *ABL Space Systems announces \$10,000 per kilogram pricing of the RS1 launch vehicle*. PR Newswire. <https://www.prnewswire.com/news-releases/abl-space-systems-announces-10-000-per-kilogram-pricing-of-the-rs1-launch-vehicle-300787743.html>

Arianespace. (2024). *Ariane 6 launch services*. <https://www.arianespace.com/vehicle/ariane-6/>

Avio. (2024). *Vega C launch services*. <https://www.avio.com/vega-c>

Associated Press. (2026, 29 maja). *Blue Origin investigates rocket explosion as public is warned about possible wreckage washing ashore*. <https://apnews.com/article/a69e249784c277b0d08ac8c246b21a6d>

Associated Press. (2026, 2 czerwca). *Blue Origin says rocket explosion spared fuel tanks and key launch pad parts*. <https://apnews.com/article/9d7ea73d581ba15d1fe0f9f6e948b663>

Arrow, K. J. (1962). The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, 29(3), 155–173. <https://doi.org/10.2307/2295952>

Autry, G. (2018). Commercial orbital transportation services: A case study for national industrial policy. *New Space*, 6(3), 191–200. <https://doi.org/10.1089/space.2017.0043>

Benkard, C. L. (2000). Learning and forgetting: The dynamics of aircraft production. *American Economic Review*, 90(4), 1034–1054. <https://doi.org/10.1257/aer.90.4.1034>

Berger, E. (2021). *Liftoff: Elon Musk and the desperate early days that launched SpaceX*. William Morrow.

- Berger, E. (2026, 2 czerwca). *Blue Origin has set a very aggressive return-to-flight timeline*. *Ars Technica*. <https://arstechnica.com/space/2026/06/blue-origin-vow-s-to-fly-its-new-glenn-rocket-before-the-end-of-this-year/>
- Blue Origin. (2026, 19 kwietnia). *New Glenn Mission NG-3*. <https://www.blueorigin.com/missions/ng-3>
- Bruno, T. (2019, lipiec). Is there really money in space tourism? (P. Jarley, prowadzący) [Wywiad]. UCF Business. <https://business.ucf.edu/tory-bruno-is-there-really-money-in-space-tourism/>
- Bruno, T. (2021, 5 sierpnia). Tory Bruno says the challenges with BE-4 are real but the engine is moving forward (S. Erwin, prowadzący) [Wywiad]. SpaceNews. <https://spacenews.com/tory-bruno-says-the-challenges-with-be-4-are-real-but-the-engine-is-moving-forward/>
- BryceTech. (2024). *2024 global space launch activity*. Bryce Space and Technology. <https://brycetech.com/reports/report-documents/global-space-launch-activity-2024/>
- Center for Strategic and International Studies Aerospace Security Project. (2024). *Space launch to low Earth orbit: How much does it cost?* <https://aerospace.csis.org/data/space-launch-to-low-earth-orbit-how-much-does-it-cost/>
- China Great Wall Industry Corporation. (2024). *Launch service*. <https://www.cgwic.com/Launchservice/index.html>
- China in Space. (2024). *Orienspace's Gravity-1 to fly again*. <https://www.china-in-space.com/p/orienspaces-gravity-1-to-fly-again>
- China Daily. (2017, 10 stycznia). *Rocket to cut cost of missions*. https://www.chinadaily.com.cn/china/2017-01/10/content_27907691.htm
- Clark, S. (2016, 7 marca). ULA's candidates to replace RD-180 engine win Air Force funding. *Spaceflight Now*. <https://spaceflightnow.com/2016/03/07/ulas-candidates-to-replace-rd-180-engine-win-air-force-funding/>
- Coase, R. H. (1937). The nature of the firm. *Economica*, 4(16), 386–405. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x>
- Columbia Accident Investigation Board. (2003). *Columbia Accident Investigation Board report* (t. 1). Government Printing Office. <https://www.nasa.gov/columbia-accident-investigation-board/>
- Davis, M. (2024, 16 października). The Starship revolution in space. Australian Strategic Policy Institute, *The Strategist*. <https://www.aspi.org.au/strategist-posts/page/124/>

- Erwin, S. (2014, 17 września). ULA to invest in Blue Origin engine as RD-180 replacement. *SpaceNews*. <https://spacenews.com/41901ula-to-invest-in-blue-origin-engine-as-rd-180-replacement/>
- European Space Agency. (2024, 22 marca). *Ariane 6 joint update report*. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Ariane/Ariane_6_joint_update_report_22_March_2024
- European Space Agency. (2024, czerwiec). *Ariane 6: who makes what*. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2024/06/Ariane_6_who_makes_what_infographic
- European Spaceflight. (2023, 6 listopada). *CNES Boss on Damage Control for Ariane-Group on Ariane 6 Failures*. <https://europeanspaceflight.com/cnes-boss-on-damage-control-for-arianegroup-on-ariane-6-failures/>
- European Spaceflight. (2024, 29 marca). *CNES Boss Blames Contractors for Ariane 6 Being Too Expensive*. <https://europeanspaceflight.com/cnes-boss-blames-contractors-for-ariane-6-being-too-expensive/>
- Farmer, J. D. i Lafond, F. (2016). How predictable is technological progress? *Research Policy*, 45(3), 647–665. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.11.001>
- Firefly Aerospace. (2024). *Alpha launch vehicle*. <https://fireflyspace.com/launch-alpha/>
- Foust, J. (2021, 1 marca). Rocket Lab unveils Neutron medium-lift reusable rocket. *SpaceNews*. <https://spacenews.com/rocket-lab-unveils-neutron-medium-lift-reusable-rocket/>
- Glavkosmos. (2024). *Rideshare launch services*. <https://www.glavkosmos.com/en/rideshare-launches/>
- IEEE Spectrum. (2019, 11 stycznia). *Galactic Energy prepares Ceres-1 rocket for first launch*. <https://spectrum.ieee.org/galactic-energy-prepares-ceres1-rocket-first-launch>
- Gatti, M. i D'Ottavio, A. (2025). The missing rocket: An economic and engineering analysis of the reusability dilemma in the European space sector. *Intereconomics*, 60(2), 88–95. <https://doi.org/10.2478/ie-2025-0018>
- Government Accountability Office. (2007). *NASA Supplier Base: Challenges Exist in Transitioning from the Space Shuttle Program to the Next Generation of Human Space Flight Systems* (GAO-07-940). <https://www.gao.gov/products/gao-07-940>
- Grossman, S. J. i Hart, O. D. (1986). The costs and benefits of ownership: A theory of vertical and lateral integration. *Journal of Political Economy*, 94(4), 691–719. <https://doi.org/10.1086/2613881>

[//doi.org/10.1086/261404](https://doi.org/10.1086/261404)

Indian Space Research Organisation. (2024). *Launch vehicles*. <https://www.isro.gov.in/Launchers.html>

International Launch Services. (2024a). *Angara 1.2*. <https://www.ilslaunch.com/launch-vehicle/angara-1-2/>

International Launch Services. (2024b). *Proton Breeze M*. <https://www.ilslaunch.com/launch-vehicle/proton-breeze-m/>

Japan Aerospace Exploration Agency. (2013). *Yasuhiro Morita, a new type of launch vehicle: A rocket with artificial intelligence*. https://global.jaxa.jp/article/interview/vol58/index_e.html

Japan Aerospace Exploration Agency. (2024). *H3 launch vehicle*. <https://global.jaxa.jp/projects/rockets/h3/>

Jones, H. W. (2018). The recent large reduction in space launch cost. 48th International Conference on Environmental Systems, ICES-2018-81. <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/74082>

Jones, A. (2020, 9 stycznia). Chinese launch firm Galactic Energy raises \$21.5 million. *SpaceNews*. <https://spacenews.com/chinese-launch-firm-galactic-energy-raises-21-5-million/>

Klein, B., Crawford, R. G. i Alchian, A. A. (1978). Vertical integration, appropriable rents, and the competitive contracting process. *Journal of Law and Economics*, 21(2), 297–326. <https://doi.org/10.1086/466922>

Korea Times. (2025, 29 lipca). Hanwha on mission to private space era with Nuri rocket legacy. <https://www.koreatimes.co.kr/business/tech-science/20250729/hanwha-on-mission-to-private-space-era-with-nuri-rocket-legacy>

Kuhr, J. (2024, 6 września). Chinese launch startup iSpace raises \$99M Series C. *Payload*. <https://payloadspace.com/chinese-launch-startup-ispaceraises-99m-series-c/>

Kovacic, W. E. (2020). Competition policy retrospective: The formation of the United Launch Alliance and the ascent of SpaceX. *George Mason Law Review*, 27(3), 863–912. https://scholarship.law.gwu.edu/faculty_publications/1501/

Laffont, J.-J. i Tirole, J. (1993). *A theory of incentives in procurement and regulation*. MIT Press.

Lafontaine, F. i Slade, M. E. (2007). Vertical integration and firm boundaries: The evidence. *Journal of Economic Literature*, 45(3), 629–685. <https://doi.org/10.1257/jel.45.3.629>

- Lionnet, P. i Cuellar, A. (2021). *Launch services economics: Break-even analysis for reusable systems*. Eurospace Research Paper PL/AC-2021–Revision 1, cyt. za Gatti i D'Ottavio (2025). <https://www.intereconomics.eu/contents/year/2025/number/2/article/the-missing-rocket-an-economic-and-engineering-analysis-of-the-reusability-dilemma-in-the-european-space-sector.html>
- Masten, S. E. (1984). The organization of production: Evidence from the aerospace industry. *Journal of Law and Economics*, 27(2), 403–417. <https://doi.org/10.1086/467072>
- Monteverde, K. i Teece, D. J. (1982). Supplier switching costs and vertical integration in the automobile industry. *Bell Journal of Economics*, 13(1), 206–213. <https://doi.org/10.2307/3003441>
- Murphy, C. H. (2003). Evolved expendable launch vehicle system: RS-68 main engine development. *Acta Astronautica*, 53(4–10), 787–795. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009457650380019X>
- NASA. (2011). *Falcon 9 launch vehicle NAFCOM cost estimates*. NASA Cost Estimating Division. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/01/586023main_8-3-11_nafcom.pdf
- NASA. (2014). *Commercial orbital transportation services: A new era in spaceflight* (NASA SP-2014-617). https://www.nasa.gov/directorates/heo/home/COTS_project.html
- NASA Office of Inspector General. (2022). *NASA's management of the Artemis missions* (IG-22-003). <https://oig.nasa.gov/office-of-inspector-general-oig/ig-22-003/>
- NewSpace India Limited. (2025). *Annual report 2024–25*. <https://www.nsilindia.co.in/sites/default/files/NSIL-Annual-Report-2024-25.pdf>
- Northrop Grumman. (2024). *Pegasus, Minotaur and Antares launch vehicles*. <https://www.northropgrumman.com/space/space-launch-vehicles>
- O'Kane, S. (2026, 19 kwietnia). *Blue Origin successfully reuses a New Glenn rocket for the first time ever*. TechCrunch. <https://techcrunch.com/2026/04/19/blue-origin-successfully-re-uses-a-new-glenn-rocket-for-the-first-time-ever/>
- POLITICO. (2024). *How Europe's Rocket Program Lost Big to Elon Musk: The Inside Story*. <https://www.politico.eu/article/how-europe-screwed-up-its-rocket-program/>
- Reuters. (2024, 14 listopada). *Airbus CEO says SpaceX would not pass anti-trust test in Europe*. <https://www.investing.com/news/stock-market-news/airbus-ceo-s>

ays-spacex-would-not-pass-antitrust-test-in-europe-3723978

Relativity Space. (2024). *Terran 1*. <https://www.relativityspace.com/terran-1-2024>

Rocket Lab. (2024). *Neutron*. <https://rocketlabcorp.com/launch/neutron/>

Rocket Lab USA. (2025). *Full year and fourth quarter 2024 financial results*. <https://investors.rocketlabcorp.com/news-releases/news-release-details/rocket-lab-announces-full-year-fourth-quarter-2024-financial>

Rocket Lab USA. (2025, 27 lutego). *Form 10-K for fiscal year 2024*. U.S. Securities and Exchange Commission. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1819994/000162828025008724/0001628280-25-008724-index.htm>

Rogerson, W. P. (1994). Economic incentives and the defense procurement process. *Journal of Economic Perspectives*, 8(4), 65–90. <https://doi.org/10.1257/jep.8.4.65>

Space Exploration Technologies Corp. (2026, 3 czerwca). *Form S-1/A Registration Statement*. U.S. Securities and Exchange Commission, file no. 333-296070, accession no. 0001628280-26-040364. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1181412/000162828026040364/spaceexplorationtechnologib.htm>

SpaceX. (2025). *Falcon 9 launch and landing statistics*. SpaceX Mission Updates. <https://www.spacex.com/launches/>

SpaceX. (2026). *Capabilities & services*. <https://www.spacex.com/assets/media/Capabilities%26Services.pdf>

Smithsonian Magazine. (2018). Tory Bruno, the other rocket man. *Air & Space Magazine*. <https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/tory-bruno-profile-180968983/>

Swope, C. (2025, 14 listopada). How important is Blue Origin's second New Glenn launch? *CSIS Critical Questions*. <https://www.csis.org/analysis/how-important-blue-origins-second-new-glenn-launch>

TASS. (2020, 24 grudnia). *One launch of heavy rocket Angara-A5 still close to \$100 million, says designer*. <https://tass.com/defense/1239497>

Terzi, A. i Nicoli, F. (2024). Economists should point their attention to the stars. *Intereconomics*, 59(2), 108–114. <https://doi.org/10.2478/ie-2024-0022>

Wall, M. (2020, 2 kwietnia). Chinese rocket sells for \$5.6 million in livestreamed auction: Report. *Space.com*. <https://www.space.com/chinese-expace-rocket-sold-for-millions-auction.html>

United Launch Alliance. (2024). *RocketBuilder and Vulcan launch services*. <https://ww>

w.ulalaunch.com/rocketbuilder/

Weinzierl, M. (2018). Space, the final economic frontier. *Journal of Economic Perspectives*, 32(2), 173–192. <https://doi.org/10.1257/jep.32.2.173>

Williamson, O. E. (1979). Transaction-cost economics: The governance of contractual relations. *Journal of Law and Economics*, 22(2), 233–261. <https://doi.org/10.1086/466942>

Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122–128. <https://doi.org/10.2514/8.155>

Zapata, E. (2017). *An assessment of cost improvements in the NASA COTS/CRS program and implications for future NASA missions*. NASA Kennedy Space Center. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170008895.pdf>

SPIS TABEL

2.1	Kryteria kodowania zmiennych organizacyjnych	27
2.2	Integracja pionowa według podsystemu	30
2.3	Statystyki opisowe ($n = 42$)	33
2.4	Statystyki opisowe bez projekcji	33
2.5	Wrażliwość projekcji rakiety Starship	34
2.6	Korelacje z logarytmem ceny	35
2.7	Średnie ceny według poziomu VI	36
2.8	Średnie ceny według wielorazowości	36
2.9	Progresywne specyfikacje MNK	38
2.10	Rakiety z ponownym lotem pierwszego stopnia	40
2.11	Macierz VI i wielorazowości	40
2.12	Tylko rakiety jednorazowe ($n = 36$)	41
2.13	Testy odporności współczynnika VI	41
2.14	Heterogeniczność współczynnika VI	43
2.15	Roczne starty SpaceX	45
2.16	Macierz podwójnej integracji pionowej	49
2.17	Podsumowanie porównawcze przypadków	55
A.1	Zbiór danych rakiet nośnych	69
A.2	Dokumentacja źródeł cenowych	72
A.3	Uzasadnienie poziomów jakości źródeł	75
A.4	Składowe kodowania VI	77

SPIS RYSUNKÓW

2.1	Ewolucja ceny za kilogram na LEO	34
2.2	Integracja pionowa a logarytm ceny	35
2.3	Rozkład cen według poziomu integracji pionowej	37
2.4	Siła wyjaśniająca modelu	39
2.5	Stabilność współczynnika VI	42
2.6	Roczny wolumen startów SpaceX	46
2.7	Koszt rozwoju rakiety Falcon 9 według NASA	51