młody TECHNIK
Istnieje od 1932 roku

CHERCHEZ LA FEMME: Katharine Blodgett
Kazała szybie przestać odbijać

grudzień • 12/2026
www.mlodytechnik.pl

Tu przejrzysz i kupisz ten numer

NEWS 24/7
Oglądaj codziennie na swoim smartfonie

młody m.technik

Ciekawi świata są zawsze młodzi



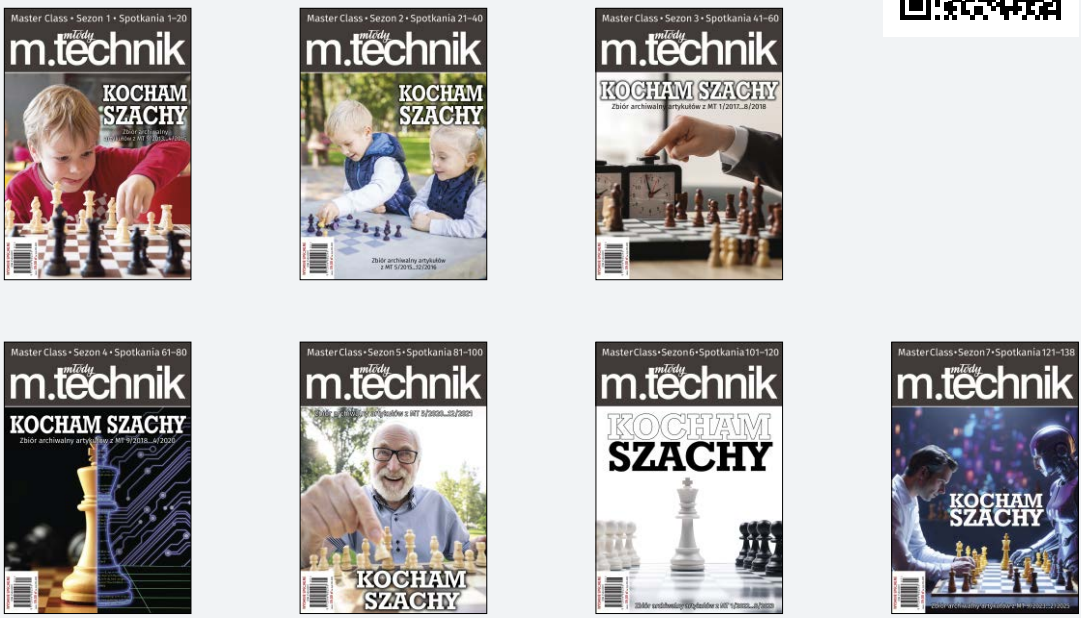
STARLINK

Jak Elon Musk stał się bogiem wojny

ISSN 0462–9760 Indeks 365408
9 770462 976267 12
cena: 19,90 zł (w tym 8% VAT)

Science fiction w „Młodym Techniku”
Wojciech Moska: W pół drogi

pakiet promocyjny KOCHAM SZACHY
7 e-booków z rabatem 50%



pakiet promocyjny NA WARSZTACIE
9 e-booków z rabatem 50%



Dla prenumeratorów – 30% rabatu!

Promocja Internetowa – w formularzu zamówienia online zaznacz pole
„Jestem prenumeratorem wydawnictwa AVT, kupuję ze zniżką”
i podaj swój numer prenumeraty.

www.UlubionyKiosk.pl

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Kto trzyma wyłącznik?



W listopadowym numerze pisaliśmy, że kosmos stał się rzeczą pospolitą wszystkich narodów. Pamiętam pierwszego Sputnika z 1957 r. Wtedy orbita była sprawą dwóch państw, a dziś korzystają z niej wszyscy: z nawigacji, prognoz pogody i łączności. Ten numer pokazuje drugą stronę tej historii. Większość czynnych satelitów krążących dziś wokół Ziemi należy do jednej prywatnej firmy, a o tym, jak działa jej sieć, decyduje w praktyce jeden człowiek.

Jako fizyk półprzewodników najbardziej podziwiam w Starlinku nie rakiety, choć ich lądowanie robi wrażenie, lecz płaską antenę na dachu. Ponad tysiąc małych elementów, sterowanych przez układy scalone, kieruje wiązkę na satelitę, który przelatuje po niebie w kilka minut. Antena nie ma ani jednej ruchomej części. Kiedyś anteny fazowane budowano dla radarów wojskowych. Były ogromne i kosztowały fortunę. Dziś taką antenę można kupić w sklepie, a abonament kosztuje mniej niż rachunek za telefon w wielu rodzinach. Za tą zmianą stoi kilkadziesiąt lat postępu w mikroelektronice: coraz mniejsze tranzystory, coraz tańsze układy i produkcja w milionach sztuk.

A sama technika ma jednak drugie oblicze. Terminal Starlinka nie może nadawać, kiedy chce. Sieć musi mu przydzielić satelitę, wiązkę i czas, bo inaczej miliony urządzeń zakłócałyby się nawzajem. To wymaganie czysto inżynierskie. Z niego wynika jednak władza: kto układa ten rozkład jazdy, ten może komuś łączność ograniczyć albo ją odebrać. W październiku żołnierze w Ukrainie przekonali się o tym w praktyce. Nikt nie zestrzelił żadnego satelity, nikt nie zniszczył żadnej anteny. Zmieniono tylko reguły w oprogramowaniu sieci i drony przestały działać tak, jak powinny. Do dziś nie wiadomo na pewno, kto o tym zdecydował. Fizyka i tu jest prosta. Sieć może rozpoznać, że terminal szybko się porusza, na przykład dzięki zjawisku Dopplera, które każdy zna z syreny przejeżdżającej karetki: dźwięk zbliżającego się pojazdu jest wyższy, a oddalającego się niższy. Z falami radiowymi jest tak samo. Ruch satelity zmienia częstotliwość sygnału o setki kiloherców, a ruch drona o niespełna dwa kiloherce. Współczesna elektronika mierzy tę różnicę bez trudu. Wiedza z lekcji fizyki wystarcza, by zrozumieć, jak można odebrać łączność dronowi nad frontem.

Nie chcę robić z Elona Muska czarnego charakteru. Zbudował coś, czego nie potrafiły zbudować ani agencje kosmiczne, ani rządy. Dzięki jego sieci Ukraina ma łączność od pierwszych dni wojny, a szpitale, szkoły i ludzie w punktach niezłomności mogli się kontaktować ze światem, gdy rosyjskie rakiety niszczyły elektrownie. Problemem nie jest jeden człowiek, tylko zależność od jednego dostawcy. Państwo, które w czasie wojny opiera łączność swojej armii na usłudze prywatnej firmy z innego kraju, przestaje być w pełni panem swoich decyzji.

Dotyczy to także nas. Polska przekazała Ukrainie prawie 30 tysięcy terminali i płaci za ich abonamenty. Starlinki zapewniały łączność w naszych lokalach wyborczych i podczas powodzi. Dobrze, że przystąpiliśmy do europejskiego systemu IRIS² i budujemy własne satelity rozpoznawcze. Trudno jednak nie zauważyć, że część tych satelitów poleciała na orbitę rakietą SpaceX. Własna sieć wymaga rakiet, fabryk satelitów i częstotliwości, a tego nie da się kupić z dnia na dzień. Dogonić lidera będzie trudno i potrwa to lata. Największe szanse mają Chiny, co nie jest szczególnie radosną perspektywą dla cywilizacji państw demokratycznych.

Do młodych czytelników mam jedną prośbę. Zanim wyrobicie sobie zdanie o Musku, Starlinku i wojnie, zrozumcie, jak to działa. Dlatego zaczęliśmy opowieść o Starlinku od prędkości światła i od prostych rachunków w ramkach „Policz sam”. Kto rozumie, skąd biorą się opóźnienie, pojemność i rozkład jazdy w sieci, ten łatwiej odróżni fakty od emocji. Na końcu materiału zostawiliśmy kilka pytań. Nie ma na nie jednej dobrej odpowiedzi, warto więc o nich porozmawiać w domu i w szkole.

Niebo nad nami powinno pozostać wspólne. Wolałbym, żeby kluczy do niego było więcej niż jeden i żeby wszyscy znali zasady, według których się ich używa.

Wiesław Marciniak

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Prenumerata
Z RABATEM 15% tylko na
UlubionyKiosk.pl

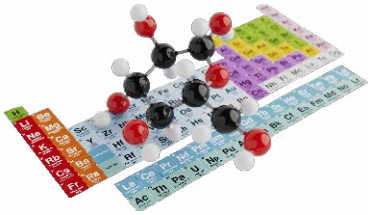
AVT-Korporacja sp. z o.o., ul. Leszczynowa 11, 03–197 Warszawa
prenumerata@avt.pl | 22 257 84 22 (godz. 10.00–14.00)
rachunek bankowy: ING Bank Śląski 18 1050 1012 1000 0024 3173 1013

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Spis treści









Temat numeru

Starlink. Jak Elon Musk stał się bogiem wojny 28
Elementarz: dlaczego internet z kosmosu był tak słaby. Daleko, czyli wolno 30
Droga jednego pakietu danych 35
Fabryka na orbitę: rakieta i produkcja seryjna 42
Starlink w cywilu: od farmy do telefonu 46
Wojna na łączu: co Starlink zmienił na froncie 50
Bóg z wyłącznikiem: pięć momentów władzy 54
Polska w tej historii 58
Kto zbuduje drugą sieć: wyścig o suwerenność 60
Rachunek za niebo 63
Finał: czy jedna firma może trzymać rękę na łączu? 65

B&R – badania i rozwój

Info Zoom 8
Dodaj do obserwowanych 12
Horyzonty mgłą spowite: Ile humanoidów naprawdę pracuje?
Rewolucja, której nikt nie policzył 13
Cherchez la femme: Czterdzieści warstw mydła.
Jak Katharine Blodgett kazała szybie przestać odbijać 21
Koniec i co dalej: Koniec radia UKF. Ogłoszony, odwołany 71
Nasi idole – liderzy innowacji:
Sto pięter ze stali dla pięćdziesięciu – Fazlur Rahman Khan 78

m.technik

Cyfrowy front: Domek z kart podłączony do sieci 84
Mobilne aplikacje. Test aplikacji 88

Fantastyka naukowa w „Młodym Techniku”

W pół drogi 90
„Wiadro powietrza” – koniec świata widziany oczami dziecka 93

Szkoła

Matematyka z ludzką twarzą: Gawęda noworoczna 96
Chemia inna niż w szkole: Chemia chrupiącej skórki 102
MT studiuje: Kierunek „Rzeczywistość”. W poszukiwaniu chemii budowlanej 106
Jak to odkryli? Ładunek elementarny 109
Fizyka bez granic: Gwiezdne wojny pod lupą fizyka, część 2 114
Pomysły genialne, zwariowane i takie sobie 117
Klub i Szkoła Wynalazców 118
Na warsztacie: Latawiec szkolny „Super Fest ZPT” 126
Odkryj historię wynalazków: Hamulce 134

Od wydawcy 3
Prenumerata 4
Poczta 6
Sędziwy Technik – 100 lat temu prasa pisała 95

Miesięcznik „Młody Technik” (11 numerów w roku) wydawany przez Wydawnictwo AVT

Adres wydawnictwa:
03–197 Warszawa, ul. Leszczynowa 11,
tel. 22 257 84 99, faks: 22 257 84 00,
http://www.avt.pl, avt@avt.pl

Redaktor Naczelny:
Wiesław Marciniak
wieslaw.marciniak@avt.pl

Sekretarz redakcji:
Dariusz Welik
dariusz.welik@avt.pl

Kontakt z redakcją:
mt@mt.com.pl
http://www.mlodytechnik.pl
http://facebook.com/magazynMlodyTechnik

Dział Reklamy:
reklama@mt.com.pl

DTP: MAD Sp. z o.o.

Prenumerata:
www.ulubionykiosk.pl
tel. 22 257 84 22 (godz. 10.00–14.00)
e-mail: prenumerata@avt.pl

Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treści reklam i ogłoszeń zamieszczonych w numerze.

Copyright © Wydawnictwo AVT-Korporacja sp. z o.o.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Poczta

Coś Cię poruszyło? Chcesz podzielić się z Redakcją i Czytelnikami MT swoją opinią, wiedzą, komentarzem? Wyślij e-mail na adres: **redakcja@mt.com.pl** lub list na adres: **ul. Leszczynowa 11, 03–197 Warszawa**.

Widziałem go na własne oczy. A raczej nie jego

Szanowna Redakcjo,

z wielkim wzruszeniem przeczytałem otwarcie listopadowego numeru. Też pamiętam październik 1957 roku. Miałem wtedy jedenaście lat i z ojcem oraz sąsiadami wychodziliśmy wieczorem na podwórko, żeby wypatrywać sputnika. Ktoś zawsze krzyczał „jest!”i rzeczywiście po niebie przesuwał się jasny punkt.

Dopiero wiele lat później przeczytałem, że to, co widzieliśmy, nie było samym satelitą. Kulka o średnicy niecałych 60 cm była zbyt mała, żeby ją dostrzec gołym okiem. Widzieliśmy centralny człon rakiety nośnej, który krążył po podobnej orbicie i świecił odbitym światłem słońca. Nie umniejsza to w niczym tamtych wieczorów. Dziś mój telefon wie, gdzie jestem, dzięki kilkudziesięciu satelitom, a ja nadal pamiętam tamten jeden punkt na niebie. Dziękuję za ten numer.

Tadeusz Wróblewski

Pięćdziesiąt stron? Litości

Kupuję MT od czterdziestu lat dla elektroniki i majsterkowania. W listopadzie dostałem pięćdziesiąt stron o rakietach. Rozumiem, że kosmos jest modny, ale ja na Marsa nie polecę, a lutownicę mam w szufladzie. Proszę pamiętać o czytelnikach, którzy wolą coś zbudować, niż o czymś poczytać.

Z. M., Bielsko-Biała

Red. Dziękujemy za wierność przez cztery dekady. Temat numeru zmienia się co miesiąc i nie zawsze trafi w zainteresowania każdego czytelnika. Zapewniamy jednak, że nie zapominamy o tych, którzy wolą budować, niż czytać. Wydajemy też miesięcznik dla pasjonatów elektroniki – „Elektronika dla Wszystkich”. Polecamy.

GPS na lekcji fizyki

Szanowni Państwo,

uczę fizyki w liceum i wykorzystałam listopadowy numer na lekcjach o ruchu po okręgu. Uczniowie najbardziej ożywili się przy części o nawigacji satelitarnej. Jeden z nich zapytał, czy to prawda, że zegary w satelitach GPS chodzą inaczej niż na Ziemi. To prawda: z powodu efektów względności zegar na orbicie śpieszy się o około 38 mikrosekund na dobę w porównaniu z zegarem na powierzchni. Gdyby tego nie korygować, błąd pozycji rósłby o kilka do kilkunastu kilometrów dziennie.

Pierwszy raz widziałam, żeby szesnastolatkowie zainteresowali się teorią względności, bo dotyczy ich telefonu. Proponuję, żeby kiedyś napisać o tym osobny artykuł. Taki tekst bardzo przydałby się w szkole.

Małgorzata Sowińska

Odebrałem obrazek z ISS

Witam całą redakcję.

Jestem krótkofalowcem od 30 lat. Po lekturze bloku o łączności satelitarnej postanowiłem pokazać synowi, że kosmos da się „usłyszeć” bez żadnych wielkich pieniędzy. Załoga ISS co jakiś czas nadaje obrazki w emisji SSTV na częstotliwości 145,800 MHz FM. Wystarczy zwykły ręczny radiotelefon na pasmo 2 m, antena kierunkowa zrobiona z miarki krawieckiej i kawałka rurki PCV oraz telefon z darmową aplikacją do dekodowania.

Pierwszy obrazek był zaszumiony, połowa w paski. Drugi wyszedł prawie czysty. Syn (12 l.) powiesił go nad biurkiem i od tygodnia sprawdza, kiedy stacja będzie nad Polską. Polecam wszystkim czytelnikom. 73!

Andrzej, SP9-xxx
(znak do wiadomości Redakcji)

Satelita w ciągniku

Dzień dobry,

piszę z gospodarstwa pod Siedlcami. Czytałem w listopadowym numerze, że dzisiaj z kosmosu korzysta każdy naród. Zgadzam się, bo z kosmosu korzysta też każdy rolnik, tylko o tym nie myśli. Mam ciągnik z prowadzeniem po GPS z poprawkami RTK i opryskiwacz, który sam wyłącza sekcje na uwrociach, żeby nie lać dwa razy w to samo miejsce. Oszczędność środków ochrony roślin liczę na kilkanaście procent. Do tego zdjęcia satelitarne pola, na których widać, gdzie zboże słabiej rośnie.

Mój dziadek siał z ręki, ojciec z siewnika, a ja sieję z satelitą. Tylko jak padnie sygnał, to i tak muszę umieć jechać prosto sam. I to bym radził młodym.

Grzegorz K.

Kto posprząta orbitę?

Szanowna Redakcjo,

po lekturze części o ciemnej stronie orbity nie mogę przestać o tym myśleć. Na orbicie krążą dziesiątki tysięcy śledzonych obiektów i niezliczone mniejsze odłamki, z których każdy porusza się z prędkością kilku kilometrów na sekundę, a kolejne państwa i firmy wynoszą następne satelity, jakby miejsca było bez końca. Czytałem o zjawisku

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Kesslera, czyli o lawinie zderzeń, w której każde zderzenie tworzy chmurę odłamków powodujących kolejne zderzenia, aż niektóre orbity staną się bezużyteczne na dziesięciolecia.

Skoro kosmos jest „Rzeczą Pospolitą wszystkich narodów,"to kto odpowiada za sprzątanie? Na Ziemi za zaśmiecanie płaci się mandat. W kosmosie, z tego co rozumiem, właściwie nikt nikogo nie karze. Uważam, że zanim będziemy mówić o koloniach na Marsie, powinniśmy nauczyć się nie śmiecić we własnym sąsiedztwie.

Ewa Lipińska

Smugi na moich zdjęciach

Hej MT!

Fotografuję niebo od 3 lat (Sony z obiektywem 14 mm, montaż paralaktyczny z drugiej ręki). Przeczytałam numer kosmiczny i wszystko super, satelity są potrzebne, rozumiem. ALE. Na co drugim zdjęciu Drogi Mlecznej mam teraz smugi, czasem po kilkanaście, bo nad horyzontem przelatuje sznurek satelitów. Muszę robić po 40 klatek i usuwać smugi programem do składania zdjęć. Kiedyś wystarczało 20.

Nie piszę, żeby narzekać (no dobra, trochę). Piszę, bo w numerze było o korzyściach i o śmieciach, a o tym, że znika nam ciemne niebo, było mało. Dla astronomów zawodowych to też problem, nie tylko dla takich amatorów jak ja.

Ola, 19 lat, Bieszczady
(tu jeszcze jest ciemno)

Córka chce być astronautką

Szanowni Państwo,

moja dziesięcioletnia córka przeczytała w listopadowym MT część o Polsce w kosmosie i od tego czasu twierdzi, że poleci na orbitę jak Sławosz Uznański. Kupiliśmy jej plakat stacji kosmicznej, a teraz pyta, czego musi się uczyć. Nie wiem, co jej odpowiedzieć, bo sama jestem księgową. Czy redakcja może coś doradzić?

Anna Dobrowolska

Red. Proszę przekazać córce, że jest na dobrej drodze. Astronauci Europejskiej Agencji Kosmicznej to najczęściej inżynierowie, fizycy, lekarze lub piloci, więc podstawą są matematyka, fizyka i języki obce, przede wszystkim angielski. Liczą się też zdrowie, kondycja i umiejętność pracy w zespole. Sławosz Uznański jest z wykształcenia inżynierem elektronikiem. Do tego warto zachęcać córkę do zajęć praktycznych: kółka robotyki, modelarstwa, a z czasem studenckich zespołów budujących łaziki i rakiety. Takie zespoły działają w Polsce i odnoszą sukcesy na świecie.

Rzeczpospolita, owszem, ale pamiętajmy, jak się skończyła

Szanowna Redakcjo,

z przyjemnością odnotowałem tytuł listopadowego tematu numeru. Porównanie kosmosu do Rzeczypospolitej Obojga Narodów jest zręczne i pochlebia każdemu, kto lubi historię. Pozwolę sobie jednak, jako emerytowany nauczyciel historii, przypomnieć, że tamta Rzeczpospolita miała wolną elekcję, liberum veto i sąsiadów, którzy w końcu podzielili ją między siebie.

Patrząc na to, co czytam w części o militaryzacji orbity, mam wrażenie, że analogia może okazać się trafniejsza, niż autorzy zamierzali. Wolna elekcja to dzisiaj każdy, kogo stać na rakietę. Liberum veto to rezolucje ONZ, które jedno państwo potrafi zablokować. A sąsiedzi już szykują się do zaborów. Oby historia nie zatoczyła koła. Z wyrazami szacunku.

dr Henryk Zawadzki

Policzyłem rakietę w Excelu i wyszło mi źle

Dzień dobry

mam 14 lat i pierwszy raz piszę do gazety. po przeczytaniu listopadowego numeru wziąłem ten wzór Ciołkowskiego z ramki i chciałem policzyć ile paliwa trzeba żeby polecieć na orbitę. wpisałem do excela prędkość 9,4 km/s (tyle znalazłem w internecie razem ze stratami) i prędkość gazów 3,5 km/s i wyszło mi że rakieta musi być w 93% paliwem!!! to znaczy że zbiornik, silnik i astronauta mają ważyć razem 7%. tata mówi że to niemożliwe i że się pomyliłem. czy ja się pomyliłem czy tata? bo jak ja mam rację to jak oni w ogóle latają

Pozdrawiam
Kuba z Tczewa

Red. Kuba, rachunek jest dobry i tata też ma rację. Rakieta jednostopniowa z dzisiejszych materiałów takiego stosunku mas praktycznie nie osiągnie. Dlatego rakiety mają kilka stopni: gdy pierwszy stopień wypali paliwo, odrzuca się go razem z pustym zbiornikiem i silnikiem, a dalej leci już znacznie lżejsza rakieta. Wzór Ciołkowskiego liczy się wtedy osobno dla każdego stopnia, a przyrosty prędkości się sumują. Spróbuj policzyć w swoim arkuszu rakietę dwustopniową, a zobaczysz, jak bardzo to pomaga.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Kilka stron rubryki Info Zoom to zaledwie czubek góry lodowej. Świat stoi u progu gwałtownego przyspieszenia, a każda godzina przynosi mnóstwo fascynujących doniesień o nowościach. Żaden redaktor nie



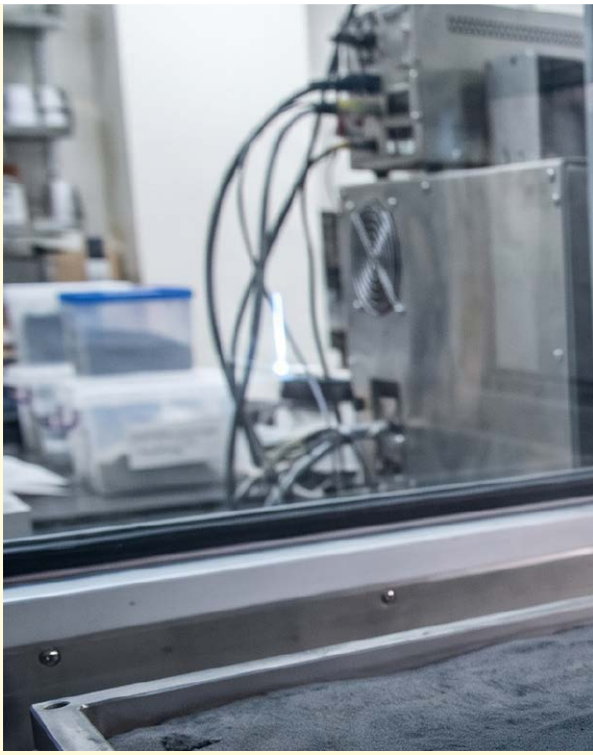
KOSMOS

Dzień świetlny od Ziemi. Rekordowy dystans sondy Voyager 1

18 listopada 2026 roku o godzinie 10.16.07 UTC amerykańska sonda Voyager 1 osiągnie odległość jednego dnia świetlnego od Ziemi, co odpowiada 25 902 068 356 kilometrom. Urządzenie wystrzelone przez NASA w 1977 roku pozostaje pod nadzorem inżynierów z Jet Propulsion Laboratory (JPL), a pracami zespołu kieruje Suzanne Dodd. Voyager 1 jest pierwszym w historii obiektem stworzonym przez człowieka, który pokona ten symboliczny dystans, przemieszczając się obecnie w przestrzeni międzygwiezdnej z prędkością około 61 tysięcy kilometrów na godzinę w kierunku konstelacji Wężownika.

Dzień świetlny to jednostka odległości odpowiadająca dystansowi, jaki światło lub fale radiowe pokonują w próżni w ciągu 24 godzin. Komunikacja z aparaturą odbywa się za pośrednictwem sieci anten Deep Space Network rozmieszczonych w Kalifornii, Hiszpanii i Australii. Ze względu na dystans dzielący sondę od nadajników, sygnał radiowy wysłany z Ziemi dotrze do odbiorników Voyagera dokładnie po dobie. Oznacza to, że każda operacja techniczna wymaga obecnie dwudniowego oczekiwania na potwierdzenie wykonania zadania – 24 godziny na dotarcie komendy do sondy oraz kolejne 24 godziny na powrót odpowiedzi.

Dane przesyłane przez magnetometr i przyrząd do fal plazmowych dostarczają unikalnych informacji o środowisku poza heliopauzą, wyznaczając granice bezpośredniej ludzkiej obecności w kosmosie. Choć Voyager 1 minie najbliższą gwiazdę dopiero za 40 tysięcy lat, jego obecna pozycja stanowi ostateczny test dla technologii komunikacji dalekosiężnej. ■



Budowa stałej bazy na Srebrnym Globie napotyka fundamentalną barierę ekonomiczną: wyniesienie na orbitę każdego kilograma materiałów kosztuje fortunę. Inżynierowie z University of Arkansas udowodnili właśnie, że księżycowe cegły można drukować bezpośrednio z lokalnego gruntu – bez konieczności przywożenia z Ziemi chemicznych lepiszczy.

Dotychczasowe koncepcje pozaziemskiego budownictwa przypominały produkcję zaawansowanego betonu. Zakładały one mieszanie regolitu – drobnego, ostrego pyłu pokrywającego powierzchnię Księżyca – ze specjalnymi polimerami lub spoiwami. Problem w tym, że każdy litr takiego kleju musiałby przylecieć z Ziemi. Zespół pod kierunkiem dr Wenchao Zhou postanowił wyeliminować to ogniwo, wykorzystując technologię laserowego spiekania w złożu proszkowym (ang. *Laser Powder Bed Fusion*, LPBF).

Proces przypomina klasyczny druk 3D z proszków metali, ale zamiast stopu tytanu czy aluminium w komorze roboczej znalazł się symulant księżycowego regolitu (LHS-1), wiernie odwzorowujący skład mineralny wyżyn naszego satelity. Skupiona wiązka lasera precyzyjnie topi kolejne warstwy ziaren pyłu, które po ostygnięciu łączą się w litą, wytrzymałą strukturę.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

jest w stanie śledzić ich przez całą dobę 24/7 – robią to za nas algorytmy. Nasz system co tydzień selekcjonuje 20 najważniejszych newsów, które po opracowaniu redakcyjnym trafiają na stronę www.mlodytechnik.pl. Warto tam zaglądać systematycznie, aby zawsze być na bieżąco → www.mlodytechnik.pl



DRUK 3D

Klocki LEGO z księżycowego pyłu

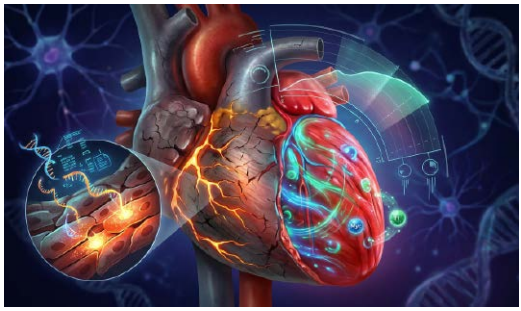
Przełom w druku 3D bez ani jednej kropli kleju

Największym wyzwaniem okazało się okiełznanie fizyki samego materiału. Regolit słabo przewodzi ciepło, a jego składniki topią się w różnych temperaturach. Zbyt duża moc lasera powodowała powstawanie pęknięć naprężeniowych i odkształceń, zbyt mała – dawała kruche, porowate wydruki. Badacze opracowali jednak optymalny profil energetyczny wiązki oraz strategię skanowania, dzięki czemu wydrukowali w pełni funkcjonalne, zazębiające się elementy przypominające klocki LEGO.

Taka geometria nie jest przypadkowa. Zazębiające się moduły pozwalają wznosić ściany, kopuły czy osłony radiacyjne całkowicie bez zaprawy murarskiej, a uszkodzone elementy można w przyszłości łatwo wymienić lub ponownie przetopić.

Osiągnięcie wpisuje się w ideę ISRU (*In-Situ Resource Utilization*), czyli wykorzystywania zasobów dostępnych na miejscu. Zamiast wozić cegły w ładowniach lądowników, na Księżyc wystarczy wysłać kompaktową drukarkę laserową oraz panele słoneczne zasilające jej układ optyczny. Surowca do budowy pierwszych lądowisk, dróg i schronów leży tam pod dostatkiem – dosłownie pod nogami astronautów. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



MEDYCYNA

mRNA zmusza serce do odbudowy po zawale

Dorosłe serca ssaków praktycznie nie posiadają zdolności regeneracyjnych, co po zawale prowadzi do nieodwracalnego bliznowacenia tkanki i postępującej niewydolności organu. Zespół naukowców pod kierownictwem dr Catherine H. Wilson z Uniwersytetu w Cambridge oraz Jamesa E. Hudsona z QIMR Berghofer Medical Research Institute, we współpracy z AstraZeneca, opracował metodę aktywacji podziałów komórkowych przy użyciu zmodyfikowanego mRNA (modRNA).

Badacze podali myszom bezpośrednio do mięśnia sercowego 100 µg modRNA kodującego białko Myc oraz cyklinę T1. Krótkotrwała ekspresja tych czynników – zanikająca całkowicie po 24 godzinach – wystarczyła, by uruchomić program proliferacji kardiomiocytów. Wyniki opublikowane w listopadzie 2026 roku w „Nature Cardiovascular Research" wykazały, że frakcja wyrzutowa lewej komory u leczonych gryzoni była o ok. 10% wyższa niż w grupie kontrolnej, a efekt utrzymał się przez 12 tygodni. Kluczowe okazało się jednoczesne dostarczenie obu białek, co pozwoliło kardiomiocytom skutecznie wejść w cykl komórkowy i wytworzyć nową tkankę mięśniową zamiast blizny.

Sukces na modelu mysim dowodzi, że platforma mRNA może służyć nie tylko do produkcji szczepionek, ale i do precyzyjnej medycyny regeneracyjnej. Dzięki przejściowemu działaniu modRNA naukowcy wyeliminowali ryzyko niekontrolowanego wzrostu komórek i transformacji nowotworowej. Kolejnym etapem prac będą badania na większych zwierzętach, które mają potwierdzić skalowalność metody przed ewentualnymi testami klinicznymi u ludzi. ■



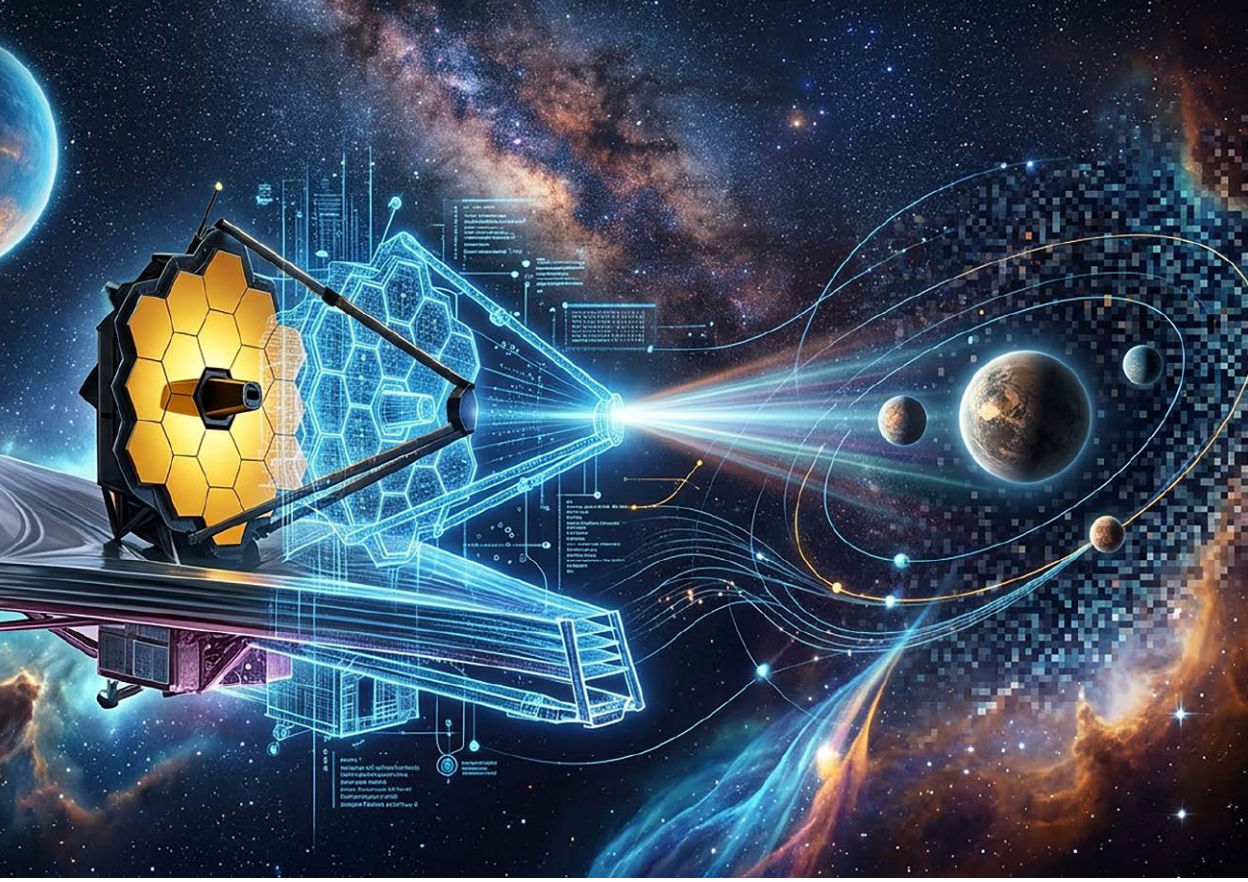
NAUKA

17 tysięcy ton ciekłego argonu 1,5 km pod ziemią

Międzynarodowy zespół badawczy rozpoczął w Dakocie Południowej budowę kriostatów dla eksperymentu DUNE, który zbada asymetrię materii i antymaterii we Wszechświecie.

W kopalni Sanford Underground Research Facility (SURF) w Dakocie Południowej, na głębokości ponad 1,5 kilometra, inżynierowie z Fermilab i CERN rozpoczęli montaż stalowych szkieletów dla dwóch gigantycznych kriostatów eksperymentu DUNE. Konstrukcje o masie 6200 ton pomieszczą po 17 tysięcy ton ciekłego argonu schłodzonego do –184 stopni Celsjusza. Każdy detektor, o wymiarach porównywalnych z Boeingiem 747, wykorzystuje technologię ciekłoargonowej komory z projekcją czasu (LArTPC). Wiązka neutrin wytwarzana w akceleratorze PIP-II w oddalonym o 1300 kilometrów laboratorium Fermilab przeniknie przez skały, by wewnątrz detektora wywołać jonizację argonu. Powstałe elektrony dryfują do paneli anodowych dostarczanych przez brytyjskie laboratorium Daresbury, co pozwala na rekonstrukcję torów cząstek w 3D. Badania mają wyjaśnić asymetrię między materią a antymaterią oraz umożliwić detekcję neutrin z supernowych. Zakończenie instalacji aparatury zaplanowano na 2030 rok, a pierwsza wiązka cząstek trafi do detektorów rok później, inicjując program badawczy przewidziany na dwie dekady. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



KOSMOS

Cyfrowy bliźniak teleskopu Webba wykrywa ukryte egzoplanety

Zespół badaczy z Northwestern University i Caltech, pod kierunkiem Rodrigo Ferrera-Chaveza, opracował metodę FLIP (*Physics-based Learning for Imaging Planets*), która znacząco zwiększa czułość detekcji egzoplanet w danych z teleskopu Jamesa Webba (JWST). Wyniki opublikowane 4 listopada 2026 roku w czasopiśmie „Nature" wykazują, że nowe podejście pozwala wykryć obiekty od 2 do 15 razy skuteczniej niż dotychczasowe standardy obliczeniowe. Wykorzystując dane archiwalne, naukowcy po raz pierwszy zarejestrowali planetę 51 Eridani b na długości fali 4,3 µm – sygnał ten wcześniej pozostawał całkowicie ukryty w blasku gwiazdy macierzystej.

FLIP działa jako „cyfrowy bliźniak" kamery NIRCam, symulując fizyczną propagację fali światła przez układ optyczny teleskopu. Model uwzględnia miliony parametrów, w tym mikroskopijne zniekształcenia zwierciadeł, dryft termiczny oraz błędy celowania, co pozwala matematycznie odtworzyć i odjąć blask gwiazdy z niespotykaną precyzją. Mechanizm ten przypomina działanie słuchawek z aktywną redukcją szumu, które generują falę odwrotną, by wyciszyć otoczenie – tutaj algorytm precyzyjnie „wymazuje" światło gwiazdy, odsłaniając słaby sygnał krążącej wokół niej planety.

Zastosowanie modelu FLIP umożliwia odkrywanie mniejszych i chłodniejszych planet w istniejących już zbiorach danych bez konieczności modyfikacji sprzętowych teleskopu. Metoda ta pozwala na dokładniejsze badanie atmosfer obcych światów, w tym poszukiwanie dwutlenku węgla, oraz wyznacza nowe standardy dla przyszłych misji kosmicznych, takich jak Habitable Worlds Observatory. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Dodaj do obserwowanych

ASTRONOMIA

◆ Badacze z kolaboracji CHIME, w tym z Uniwersytetu Kolumbii Brytyjskiej, po raz pierwszy zarejestrowali poświatę neutralnego wodoru z okresu, gdy wszechświat miał około 5 miliardów lat. Odkrycie opisane w Astrophysical Journal pozwala na tańsze badanie ciemnej energii przy wykorzystaniu faktu, że w tamtej epoce około 2% wodoru pozostawało w stanie neutralnym. ◆ Zespół pod kierownictwem Uniwersytetu Yale odkrył dwie nowe satelitarne struktury Drogi Mlecznej: galaktykę Aquarius IV oraz gromadę gwiazd Rubin-GC1. Dane z Obserwatorium Very C. Rubin wskazują, że te odległe o 355 tysięcy lat świetlnych obiekty to dopiero początek fali odkryć setek słabych towarzyszy naszej Galaktyki. ◆

EKSPLORACJA KOSMOSU

◆ Obserwatorium Very C. Rubin namierzyło obiekt transneptunowy 2026 ED138 o średnicy od 600 do 1500 kilometrów, znajdujący się 46 jednostek astronomicznych od Słońca. Międzynarodowa Unia Astronomiczna nadała mu status kandydata na szóstą planetę karłowatą naszego układu, co potwierdza ogromny potencjał nowych przeglądów nieba. ◆ Badacze z Uniwersytetu Maryland, korzystając z Teleskopu Jamesa Webba, wykryli wodę, metan i amoniak w atmosferze planety HATS-6 b oddalonej o 500 lat świetlnych. To dopiero drugie w historii wykrycie amoniaku na egzoplanecie, a zebrane dane pokazują, że obiekt ten jest znacznie chłodniejszy, niż przewidywały dotychczasowe modele klimatyczne. ◆

POSZUKIWANIE ŻYCIA

◆ Według doniesień opublikowanych pod koniec października 2026 roku astronomowie wykryli sygnał sugerujący istnienie pierwszego egzoksiężyca krążącego wokół brązowego karła. Obiekt o masie zbliżonej do Jowisza okrąża swojego gospodarza w 170 dni, co stanowi przełom w poszukiwaniach satelitów poza Układem Słonecznym. ◆

SZTUCZNA INTELIGENCJA

◆ Firma OpenAI ogłosiła, że jej nowe modele sztucznej inteligencji udowodniły hipotezę lokalnego wygładzania w analizie harmonicznej oraz obaliły hipotezę czasu wykładniczego. Algorytmy dostarczyły również rygorystycznych dowodów matematycznych dla aspektów chromodynamiki kwantowej, co obecnie poddawane jest szczegółowej weryfikacji przez ekspertów. ◆

KOMPUTERY KWANTOWE

◆ Fizycy z Uniwersytetu w Adelajdzie usprawnili kwantowe czujniki SQUID, zastępując część pętli ze złączami Josephsona zwykłymi pętlami, co wyeliminowało błędy wynikające z różnic w rozmiarach elementów. Rozwiązanie to znacząco poprawia czułość urządzeń wykorzystywanych w obrazowaniu mózgu oraz w zaawansowanych systemach obliczeniowych. ◆

NOWE MATERIAŁY

◆ Inżynierowie z Uniwersytetu Queensland opracowali membrany o 44% wyższej przepuszczalności wody i dziesięciokrotnie większej precyzji w oddzielaniu cząsteczek. Nowy materiał niemal całkowicie blokuje przenikanie etanolu, co pozwoli na drastyczne obniżenie kosztów produkcji paliw ekologicznych oraz procesów chemicznych. ◆

ENERGIA/EKO-TECHNOLOGIE

◆ Zespół z Narodowego Uniwersytetu Seulskiego odkrył, że precyzyjna kontrola kwasowości przy elektrodach podnosi selektywność pożądanych produktów chemicznych z 16% do aż 97%. Metoda ta umożliwia ekologiczną syntezę laktonów bez użycia szkodliwych nadtlenków, co czyni przemysł chemiczny znacznie czystszym i wydajniejszym. ◆

BIOTECHNOLOGIE

◆ Publikacja w magazynie Nature opisuje pierwszy na świecie komputer DNA wielokrotnego użytku, zbudowany przez naukowców z Uniwersytetu Maynooth. Urządzenie wykonuje operacje dodawania i mnożenia w wodzie dzięki interakcjom molekularnym, pozwalając na przeprowadzenie do 25 obliczeń bez konieczności ciągłego zasilania zewnętrznego. ◆ Agencja Żywności i Leków zatwierdziła Daraxonrasib, pierwszy lek znacząco wydłużający życie pacjentów z najczęstszą formą raka trzustki. Preparat opracowany na podstawie badań z UCSF uderza bezpośrednio w mutacje genu KRAS i został uznany przez magazyn TIME za jeden z najważniejszych wynalazków 2026 roku. ◆

FIZYKA

◆ Naukowcy zderzyli jądra tlenu z prędkością bliską prędkości światła, aby odtworzyć pierwotną plazmę kwarkowo-gluonową istniejącą tuż po Wielkim Wybuchu. Eksperyment przeprowadzony pod koniec października 2026 roku pozwolił zbadać egzotyczne właściwości materii, z której uformował się wczesny wszechświat. ◆ Według badań opublikowanych w serwisie ScienceDaily odkryto mechanizm zapobiegający pękaniu niektórych metali w skrajnie niskich temperaturach sięgających -253°C. To odkrycie ma kluczowe znaczenie dla rozwoju technologii kosmicznych oraz budowy stabilnych urządzeń kwantowych pracujących w warunkach kriogenicznych. ■

Źródła: NSF, Nature, ScienceDaily, MIT Physics, Yale News, Linköping University, Adelaide University, University of Queensland, SciTechDaily.
Okres: 4 października 2026 – 1 listopada 2026.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Ile humanoidów naprawdę pracuje?

Rewolucja, której nikt nie policzył

Zadałem wyszukiwarce Google pytanie: ile jest na świecie robotów humanoidalnych pracujących w przemyśle? Odpowiedź brzmiała tak:
Na świecie pracuje obecnie około 16 000 robotów humanoidalnych, z czego większość została wdrożona w przemyśle i logistyce. Rok 2025 okazał się przełomowy dla tej branży – to właśnie wtedy maszyny te wyszły z fazy projektów laboratoryjnych i zaczęły realizować realne zadania komercyjne.

Odpowiedź jest gładka, konkretna i opatrzona przypisami. Nie jest zmyślona: liczba szesnastu tysięcy rzeczywiście pochodzi z opracowania istniejącej firmy analitycznej. A mimo to nie znaczy tego, co czytelnik z niej wyczyta. Ten artykuł jest właśnie o tej różnicy.

Weźmy inną wiadomość z tej samej dziedziny. W listopadzie 2025 roku obiegło świat zdanie, że roboty humanoidalne pomogły zbudować ponad trzydzieści tysięcy samochodów BMW. Ono również jest prawdziwe. Trzeba tylko dołożyć do niego trzy szczegóły, których w nagłówkach nie było: robot był jeden, wykonywał jedną czynność i przepracował tysiąc dwieście pięćdziesiąt godzin.

To nie jest artykuł o tym, że humanoidy są oszustwem ani że wyszukiwarki kłamią. Jest o czymś trudniejszym: jak odróżnić robota zbudowanego od sprzedanego, sprzedanego od zainstalowanego, a zainstalowanego od pracującego.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Co się kryje za nagłówkiem

„Roboty humanoidalne pomogły zbudować ponad 30 000 samochodów BMW”

Robotów **1**	jeden egzemplarz Figure 02
Czynność **1**	wyjmowanie blach i układanie ich w zgrzewarce
Czas pracy **1250 godzin**	na 2150 godzin zmianowych, czyli 58 procent
Części **ponad 90 000**	przez dziesięć miesięcy, pięć dni w tygodniu
Cykl **84 sekundy**	w tym 37 sekund na założenie części

Zdanie z nagłówka jest prawdziwe. Opisuje pracę jednej maszyny przy jednej operacji na linii, na której powstaje samochód.

Rysunek 1. Co się kryje za nagłówkiem. Dane o wdrożeniu robota Figure 02 w zakładzie BMW w Spartanburgu za komunikatem prasowym BMW Group oraz opisem wdrożenia ogłoszonym przez producenta robota. Udział czasu pracy w czasie zmianowym policzono w redakcji, przyjmując dwieście piętnaście dni roboczych po dziesięć godzin. Pilotaż zakończono; od czerwca 2026 roku w tym samym zakładzie miał ruszyć projekt z modelem Figure 03, dla którego BMW nie podało liczby maszyn

Te liczby bywają różne o rząd wielkości, a w streszczeniu zlewają się w jedną.

Trzy liczby, które prawie nigdy nie oznaczają tego samego

Kiedy czytamy, że jakaś firma „wprowadza dziesięć tysięcy humanoidów”, warto zapytać, co dokładnie znaczy „wprowadza”. Możliwości są trzy i różnią się zasadniczo.

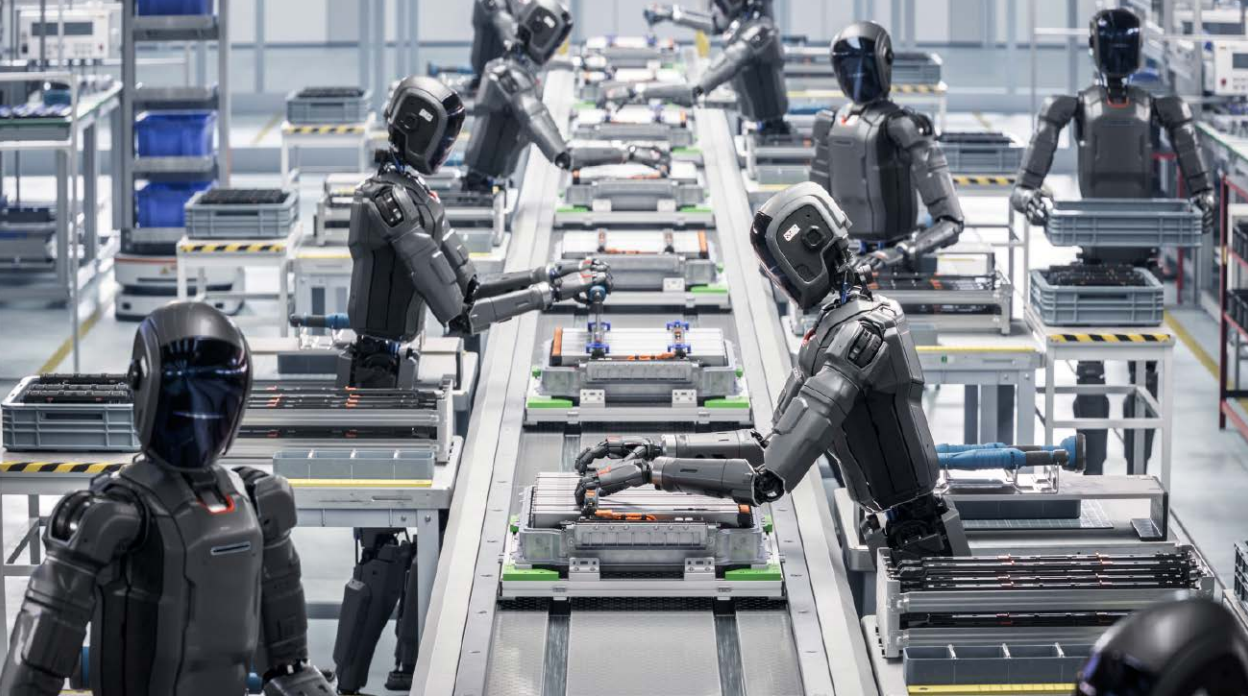
Pierwsza: tyle sztuk zbudowano. Druga: na tyle sztuk podpisano zamówienia, zwykle wieloletnie, płatne w ratach, z dostawą rozłożoną na kilka lat. Trzecia: tyle sztuk stoi dziś w zakładzie i pracuje na zmianie.

Między pierwszą a trzecią liczbą mija zwykle rok albo dwa, a często nie mija nic, bo część zbudowanych egzemplarzy nigdy nie opuszcza laboratorium producenta. We wrześniu 2026 roku amerykańska firma Agility Robotics ogłosiła, że ma zamówienia na ponad trzysta milionów dolarów, co odpowiada mniej więcej tysiącowi robotów. Ta sama firma podała jednocześnie, że model, którego zamówienia dotyczą, trafi do pierwszych klientów w połowie 2027 roku, a do sprzedaży powszechnej pod jego koniec. Zamówienie na tysiąc sztuk i tysiąc pracujących robotów to więc dwie rzeczy oddalone od siebie o ponad rok.

Wróćmy teraz do odpowiedzi, od której zaczęliśmy. Firma analityczna Counterpoint Research ogłosiła w styczniu 2026 roku, że w ciągu 2025 roku zainstalowano na świecie około szesnastu tysięcy humanoidów, z czego ponad osiemdziesiąt procent w Chinach. Wyszukiwarka przełożyła to na zdanie: „na świecie pracuje obecnie około 16 000 robotów humanoidalnych”. Te dwa zdania nie znaczą tego samego. Pierwsze mówi, ile sztuk w ciągu jednego roku trafiło do odbiorców. Drugie mówi, ile sztuk stoi dziś na stanowisku i wykonuje pracę. Robot zainstalowany w marcu mógł do grudnia wrócić do producenta, trafić z powrotem do laboratorium albo po prostu stać wyłączony.

Jest jeszcze różnica drugiego rodzaju i ona jest ważniejsza. Roboty przemysłowe liczy Międzynarodowa Federacja Robotyki – organizacja branżowa, która od dziesięcioleci zbiera dane od producentów, ogłasza je raz do roku w sprawozdaniu World Robotics i opisuje, w jaki sposób je zbiera. Dzięki temu liczbę z 2024 roku da się

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



porównać z liczbą z 2014. Humanoidów nie liczy nikt taki. Szacunki firm analitycznych są płatnym produktem, ich metoda nie jest jawna, a różne firmy podają różne wartości. Nie znaczy to, że są bezwartościowe. Znaczy, że są szacunkiem, a nie spisem – i że jednego z drugim nie należy mylić.

W tej samej odpowiedzi wyszukiwarka przypisała Federacji prognozę, według której do 2035 roku miałoby pracować ponad piętnaście milionów humanoidów. Szukałem tej prognozy w materiałach Federacji i nie znalazłem jej. Znalazłem natomiast jej tegoroczne stanowisko, w którym prezes organizacji mówi, że masowe upowszechnienie humanoidów jako uniwersalnych pomocników nie nastąpi ani w bliskiej, ani w średniej perspektywie. Przypis nie prowadził zresztą do Federacji, tylko do serwisu, który się na nią powoływał. Warto klikać w przypisy.

Co naprawdę zrobił robot w fabryce BMW

Najlepiej udokumentowane wdrożenie humanoida w przemyśle opisała sama firma BMW, i właśnie dlatego warto mu się przyjrzeć dokładnie – bo pokazuje zarówno skalę osiągnięcia, jak i skalę tego, co zostało do zrobienia.

W zakładzie w Spartanburgu w Stanach Zjednoczonych przez dziesięć miesięcy 2025 roku pracował jeden robot Figure 02. Zajmował się wyjmowaniem blach i układaniem ich w stanowisku zgrzewania – czynnością wymagającą jednocześnie szybkości i dokładności, a przy tym dla człowieka męczącą. Pracował na dziesięciogodzinnych zmianach od poniedziałku do piątku. Przez ten czas przełożył ponad dziewięćdziesiąt tysięcy części, wykonał około miliona dwustu tysięcy kroków i przebył w sumie jakieś trzysta dwadzieścia kilometrów, nie opuszczając stanowiska.

Wymagania były ostre: cały cykl miał się zamknąć w osiemdziesięciu czterech sekundach, z czego trzydzieści siedem przypadało na samo założenie części. Skuteczność ułożenia miała przekraczać dziewięćdziesiąt dziewięć procent na zmianę, a liczba interwencji człowieka miała wynosić zero.

I teraz rzecz, którą trzeba policzyć samemu, bo nikt jej w komunikatach nie podał. Dziesięć miesięcy pracy od poniedziałku do piątku to około dwustu piętnastu dni roboczych, czyli jakieś dwa tysiące sto pięćdziesiąt godzin zmianowych. Robot przepracował z tego tysiąc dwieście pięćdziesiąt godzin – niecałe sześćdziesiąt procent czasu, w którym stanowisko było czynne. Reszta to ładowanie, przezbrojenia, przestoje i to wszystko, co składa się na różnicę między maszyną uruchomioną a maszyną pracującą.

Pilotaż zakończył się powodzeniem i miał ciąg dalszy. W czerwcu 2026 roku BMW ogłosiło, że w Spartanburgu rusza projekt z nowszym modelem, Figure 03, który zajmie się sekwencjonowaniem części: wybieraniem ich z pojemników i układaniem na wózku. W komunikacie nie

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

podano, ile robotów weźmie w tym udział. Liczby krążące w sieci – kilkadziesiąt sztuk – pochodzą z serwisów branżowych, nie od BMW. Rzecz, którą warto zauważyć, jest taka: firma, która o swoim pilotażu podała czas pracy co do godziny i liczbę części co do sztuki, o wielkości nowej floty milczy.

Dodajmy jeszcze jedną rzecz, drobną, ale pouczającą. BMW pisze o dziesięciu miesiącach, producent robota o jedenastu. Rozbieżność jest zapewne kwestią tego, co liczyć jako początek: dzień dostarczenia robota czy dzień, w którym wszedł na linię. Nie jest to błąd żadnej ze stron – jest to przykład na to, że nawet w jednej dobrze udokumentowanej sprawie dwa rzetelne źródła podają dwie różne liczby.

Dlaczego bateria okazała się trudniejsza od sztucznej inteligencji

We wrześniu 2026 roku firma Agility Robotics pokazała model Digit 5 i podała jego parametry. Robot ma metr osiemdziesiąt wzrostu, sięga na wysokość dwóch metrów i dwudziestu centymetrów, waży sto dwadzieścia dziewięć kilogramów i unosi dwadzieścia trzy kilogramy. Udźwig stanowi więc mniej więcej osiemnaście procent jego własnej masy.

Najciekawsza jest jednak inna para liczb. Bateria wystarcza na dziewięćdziesiąt minut pracy, a ładuje się dziewięć minut. Producent podaje na tej podstawie, że robot może pracować ponad dwadzieścia godzin na dobę – i ma rację, choć zdanie to trzeba rozumieć dosłownie. Robot nie pracuje dwudziestu godzin bez przerwy. Pracuje półtorej godziny, ładuje się dziewięć minut, znowu pracuje półtorej godziny i tak w kółko. Przy takim rytmie w ciągu doby faktycznie zbiera się ponad dwadzieścia godzin pracy.

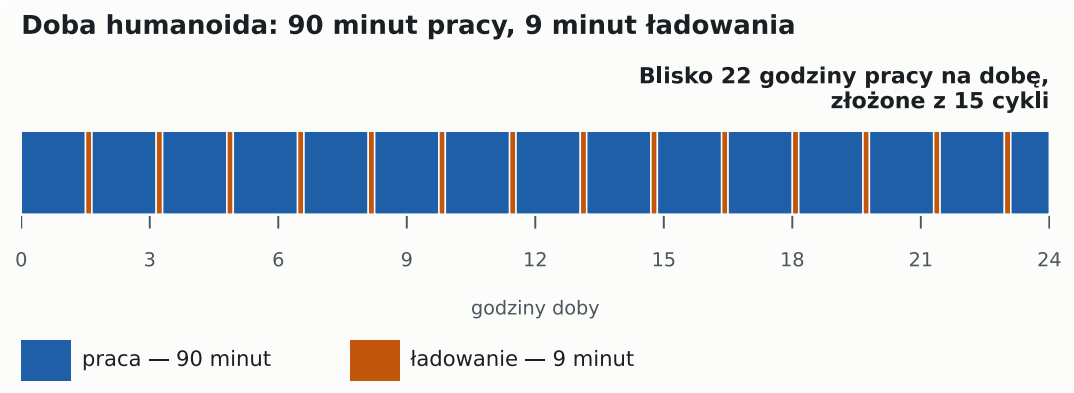
Warto to zestawić z tym, co pisze Międzynarodowa Federacja Robotyki w swoim stanowisku, wydanym w tym roku pod tytułem, który sam w sobie jest komentarzem: „Roboty humanoidalne: wizja i rzeczywistość". Federacja stwierdza wprost, że jeden cykl baterii nie wystarcza na pełną zmianę roboczą. Nie ma tu sprzeczności z liczbami producenta – obie wypowiedzi mówią o czym innym. Federacja mówi o jednym ładowaniu, producent o dobie złożonej z kilkunastu ładowań. Gdy następnym razem przeczytacie, że jakiś robot „pracuje cały dzień", sprawdźcie, o którą z tych dwóch rzeczy chodzi.

Kabel jest tu istotą sprawy. Robot przemysłowy przykręcony do podłogi jest zasilany z sieci i nie ma baterii w ogóle. Humanoid ma chodzić tam, gdzie chodzi człowiek, więc kabla mieć nie może – i całą energię musi wozić ze sobą. To jest cena, jaką płaci się za nogi.

Nogi są drogie, a ręka jest trudna

Nogi mają jeszcze jedną cenę, mniej oczywistą. Robot na dwóch nogach nie stoi – on się nieustannie nie przewraca. Każdą sekundę, także wtedy, gdy wygląda na nieruchomego, spędza na drobnych korektach równowagi. Ma to dwa skutki. Zużywa energię nawet wtedy, gdy nic nie robi. I gdy zabraknie zasilania albo zawiedzie sterowanie, nie zatrzymuje się – przewraca się, a waży sto kilkadziesiąt kilogramów.

Dlatego właśnie przepisy bezpieczeństwa dla takich maszyn dopiero powstają. Komitet techniczny numer 299 Międzynarodowej Organizacji



Rysunek 2. Doba humanoida. Czas pracy na jednym ładowaniu i czas ładowania podano za danymi producenta dla modelu Digit 5, ogłoszonymi we wrześniu 2026 roku. Rozkład cykli w dobie policzono w redakcji

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Normalizacyjnej opracowuje normy dla robotów kroczących, czyli takich, które nie mają wewnętrznej stateczności. Dotychczasowe normy tego przypadku nie obejmowały, bo dotychczasowe roboty przemysłowe stoją przykręcone i nie mają jak upaść. Pierwszym humanoidem, który przeszedł ocenę w warunkach rzeczywistych, na czynnej linii klienta, przeprowadzoną przez laboratorium uznane przez amerykański urząd bezpieczeństwa pracy, był poprzedni model Digita – i było to wydarzenie na tyle świeże i rzadkie, że producent ogłasza je jako osiągnięcie.

Jeszcze trudniejsza od nóg jest ręka – i to jest twierdzenie, które brzmi odwrotnie do zdrowego rozsądku, bo chodzenie wygląda na skomplikowane, a chwytanie kubka na czynność, której uczy się roczne dziecko. Właśnie o to chodzi.

Paradoks Moraveca, czyli dlaczego łatwe jest trudne

W 1988 roku Hans Moravec, robotyk z uniwersytetu Carnegie Mellon, wydał książkę „Mind Children", w której sformułował spostrzeżenie noszące dziś jego nazwisko. Brzmiało ono tak: stosunkowo łatwo jest sprawić, żeby komputer osiągnął poziom dorosłego człowieka w testach na inteligencję albo w warcabach, a niezwykle trudno albo wręcz niemożliwe – dać mu umiejętności rocznego dziecka w postrzeganiu i poruszaniu się.

Trzydzieści osiem lat później zdanie to sprawdza się aż nazbyt dobrze. Program pokonał mistrza świata w szachach w 1997 roku. Dziś program pisze poprawny kod, zdaje egzaminy prawnicze i tłumaczy z chińskiego. A maszyna, która wyjmuje z pudła nieznany przedmiot i odkłada go na półkę, nadal jest tematem prac badawczych.

Moravec podał też wyjaśnienie, dlaczego tak jest, i warto je przytoczyć jego słowami, bo jest to jedno z tych zdań, które zmieniają sposób patrzenia. W dużych, wysoko rozwiniętych czuciowych i ruchowych częściach ludzkiego mózgu – pisał – zakodowany jest miliard lat doświadczenia o tym, jaki jest świat i jak w nim przetrwać. Rozmyślny proces, który nazywamy rozumowaniem, jest, jak sądzę, najcieńszą warstewką ludzkiej myśli, skuteczną tylko dlatego, że wspiera ją owa znacznie starsza i znacznie potężniejsza, choć zwykle nieuświadomiona, wiedza czuciowo-ruchowa.

Inaczej mówiąc: ewolucja pracowała nad chwytaniem setki milionów lat i wykonała tę robotę tak



dobrze, że przestaliśmy ją zauważać. Nad liczeniem i rozumowaniem pracowała kilkadziesiąt tysięcy lat i wykonała ją byle jak – dlatego rachunki nas męczą, a ich wykonywanie uważamy za dowód inteligencji. Maszyna ma odwrotnie: dostaje od nas gotowe reguły rachunku i nie dostaje nic z tamtego miliarda lat. Psycholog Steven Pinker ujął to w 1994 roku w zdaniu, które trudno zapomnieć: główną nauką z trzydziestu pięciu lat badań nad sztuczną inteligencją jest to, że trudne problemy są łatwe, a łatwe problemy są trudne.

Dla humanoida ma to skutek bardzo praktyczny. Ta część maszyny, która budzi największe emocje – sztuczna inteligencja sterująca zachowaniem – potaniała w ostatnich latach gwałtownie i jest tym składnikiem, który postępuje najszybciej. Ta część, która emocji nie budzi – dłoń i to, co ona czuje – postępuje wolno, bo nie da się jej wytrenować na tekście z internetu. Trzeba ją zbudować, dotknąć nią rzeczy i policzyć, ile razy upuściła.

Co takiego jest w ręce

Zejdźmy teraz na poziom konstrukcji. Trudność ręki składa się z pięciu rzeczy i żadna z nich nie jest kwestią oprogramowania.

Pierwsza to liczba stopni swobody, czyli liczba niezależnych ruchów, jakie dana konstrukcja potrafi wykonać. Ludzka ręka ma ich około dwudziestu siedmiu. Chwytak przemysłowy, ten przykręcony do ramienia w fabryce, ma jeden: otwiera się i zamyka. Dzisiejsze ręce humanoidów mieszczą się pomiędzy – szesnaście do dwudziestu dwóch. Każdy dodatkowy staw to jednak osobny silnik, przekładnia i cięgno, które trzeba zmieścić w objętości palca, a potem serwisować.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Druga jest najważniejsza i najrzadziej wymieniana: kontakt jest nieciągły. Gdy ramię robota porusza się w powietrzu, opisujące je równania są gładkie – niewielka zmiana położenia daje niewielką zmianę siły. W chwili, gdy palec dotyka przedmiotu, pojawia się nowe ograniczenie i równania zmieniają się skokowo. Każde dotknięcie i każde puszczenie jest takim skokiem, a przy chwytaniu zdarzają się dziesiątki razy na sekundę. Do tego tarcie nie zachowuje się proporcjonalnie: trzyma, trzyma, a potem nagle puszcza. Ramię spawalnicze prowadzi punkt wzdłuż toru i nigdy niczego nie dotyka – dlatego jest łatwe.

Jest w tym jeszcze jedna subtelność, którą warto znać. Gdy przedmiot dotykają więcej niż trzy punkty, rozkład sił między nimi nie ma jednego rozwiązania – można trzymać tak samo mocno na wiele różnych sposobów. Matematyka nie powie, który wybrać. Nasz układ nerwowy tego nie rozwiązuje; on po prostu próbuje i poprawia.

Trzecia rzecz to regulacja siły chwytu w trakcie trzymania. Człowiek ściska przedmiot z siłą o kilkanaście do kilkudziesięciu procent większą od tej, przy której zacząłby się ześlizgiwać – margines jest mały, bo mocniejsze ściskanie męczy i niszczy to, co trzymamy. Skąd wiadomo, gdzie jest granica? Nie wiadomo z góry: zależy od ciężaru, od gładkości powierzchni, od tego, czy przedmiot jest wilgotny. Ręka więc nie oblicza, tylko mierzy. Kiedy przedmiot zaczyna się ześlizgiwać, poprawka siły przychodzi po siedemdziesięciu czterech milisekundach – zmierzono to w klasycznym doświadczeniu szwedzkich fizjologów z lat osiemdziesiątych. Jest to odruch automatyczny i około dwa razy szybszy od zamierzonej zmiany siły chwytu. Zanim zdążymy pomyśleć, ręka już poprawiła.

Czwarta to czucie, które ten odruch umożliwia. Opuszek palca ma około stu zakończeń jednego typu i stu pięćdziesięciu drugiego na centymetr kwadratowy, rozstawionych co mniej więcej milimetr. Typów jest w sumie cztery i dzielą się pracą: jedne odczytują nacisk stały i kształt, inne krawędzie i ruch, jeszcze inne drgania do ośmiuset herców – i to właśnie te ostatnie wyłapują ledwie zaczynający się poślizg, bo poślizg jest drganiem.

I tu czeka niespodzianka, bo intuicja podpowiada, że robotom brakuje czucia – a brakuje im czegoś innego. Ogłoszona w 2025 roku

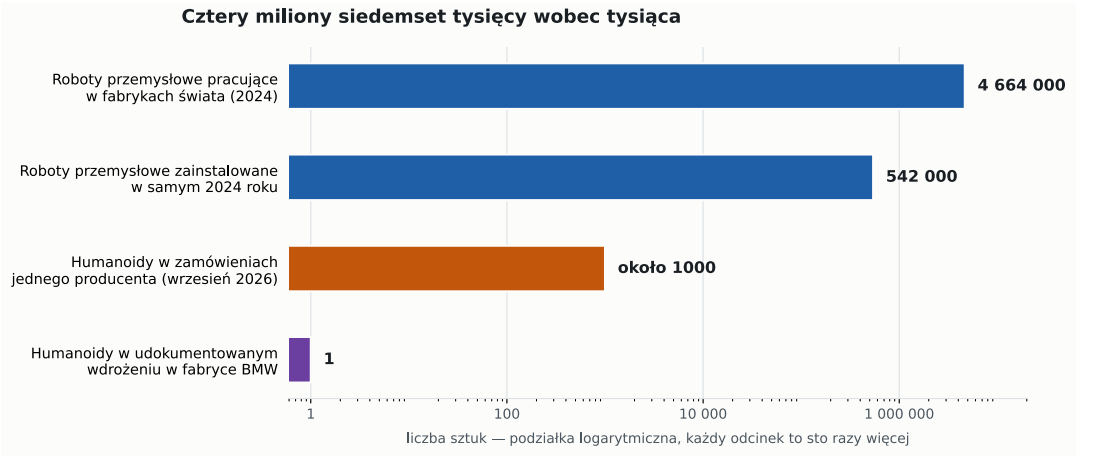
Trzy sposoby na chwytanie

	Ręka ludzka	Ręka robota w badaniach	Chwytak przemysłowy
Stopnie swobody	około 27	16–22	1
Punkty czucia na centymetr kwadratowy	około 250	do 10 000	zwykle brak
Powierzchnia objęta czuciem	cała	do 70 procent	—
Reakcja na poślizg	74 ms	około 100 ms	brak
Cena	—	ponad 100 000 dolarów	setki dolarów
Do czego służy	do wszystkiego	do prób laboratoryjnych	do jednej części w jednym położeniu

Liczba stopni swobody i gęstość czucia pochodzą z różnych konstrukcji badawczych — nie ma dziś ręki, która miałaby obie te wartości naraz.

Rysunek 3. Trzy sposoby na chwytanie. Liczba stopni swobody ludzkiej ręki i ręki robota za przeglądami konstrukcji dłoni humanoidalnych; gęstość zakończeń czuciowych w opuszku za przeglądem opublikowanym w czasopiśmie Frontiers in Human Neuroscience; czas odruchu na poślizg za pracą Johanssona i Westlinga z 1987 roku; parametry czucia ręki badawczej za pracą ogłoszoną w Nature Machine Intelligence w 2025 roku

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 4. Cztery miliony siedemset tysięcy wobec tysiąca. Liczba robotów przemysłowych pracujących i zainstalowanych za sprawozdaniem World Robotics 2025 Międzynarodowej Federacji Robotyki, dane za 2024 rok. Liczbę humanoidów w zamówieniach przeliczono z wartości zamówień podanej przez producenta. Bez podziałki logarytmicznej dwie ostatnie pozycje nie byłyby na wykresie widoczne w ogóle

w czasopiśmie Nature Machine Intelligence ręka badawcza ma dziesięć tysięcy punktów czuciowych na centymetr kwadratowy, czyli czterdzieści razy gęściej niż ludzki palec, z rozdzielczością przestrzenną jednej dziesiątej milimetra. Gęstość przestała więc być wąskim gardłem. Wąskim gardłem jest pokrycie – ta sama ręka pokrywa czuciem siedemdziesiąt procent swojej powierzchni, podczas gdy najczęściej używana ręka handlowa daje pięć punktów pomiarowych na mniej niż dwudziestu procentach. Wąskim gardłem jest trwałość, bo czujnik na opuszku ściera się tak jak opuszek. I wąskim gardłem jest to, co z tym sygnałem zrobić: dziesięć tysięcy liczb na centymetr kwadratowy to potop danych, z którego trzeba w kilkadziesiąt milisekund wyłowić jedną informację – czy to się zaczyna ześlizgiwać.

Piąta rzecz jest najbardziej przyziemna: wszystko powyżej musi zmieścić się w palcu, przetrwać miliony cykli, znieść uderzenie o krawędź stołu i kosztować mniej, niż jest warta praca, którą wykona. Wzorcowa ręka badawcza kosztuje ponad sto tysięcy dolarów. Chwytak przemysłowy, który potrafi jedną rzecz, ale robi ją przez dwadzieścia lat – kilkaset dolarów.

Zostaje jeszcze problem, o którym łatwo zapomnieć, bo dotyczy oczu, a nie ręki. W chwili chwytania dłoń zasłania przedmiot kamerze. Wzrok jest najbardziej bezużyteczny dokładnie wtedy, gdy precyzja jest najbardziej potrzebna. Dlatego czucie w palcach nie jest w robocie dodatkiem – jest jedynym zmysłem, który w tym momencie jeszcze działa.

Jak to wszystko wygląda w liczbach z hali, widać na przykładzie magazynowym. Robot Agility w zakładzie firmy logistycznej GXO przepakował sto tysięcy pojemników ze skutecznością około dziewięćdziesięciu ośmiu procent. Dziewięćdziesiąt osiem procent brzmi znakomicie, dopóki nie pomnożymy: dwa procent ze stu tysięcy to dwa tysiące przypadków, w których coś poszło nie tak i ktoś musiał się tym zająć. Warto dodać, że pojemnik magazynowy jest przedmiotem wdzięcznym – sztywnym, prostopadłościennym, o znanych wymiarach. Przy jajku albo przy zawiniętym w folię kablu ta liczba wyglądałaby inaczej.

Cztery miliony siedemset tysięcy wobec tysiąca

Na koniec porównanie, które ustawia całą rzecz we właściwej skali. Według sprawozdania Międzynarodowej Federacji Robotyki w fabrykach świata pracowało w 2024 roku cztery miliony sześćset sześćdziesiąt cztery tysiące robotów przemysłowych, a w samym tym roku zainstalowano ich pięćset czterdzieści dwa tysiące. Ponad połowa z tych nowych instalacji przypadła na Chiny.

Żaden z tych robotów nie ma nóg. Żaden nie ma twarzy. Prawie żaden nie przypomina człowieka. Są to najczęściej ramiona przykręcone do podłogi, o zasięgu kilku metrów, powtarzające

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

ten sam ruch z dokładnością setnych części milimetra, przez dwadzieścia lat, bez baterii i bez równowagi do utrzymania. Federacja zauważa sucho, że humanoidy nie dorównują im w szybkości, dokładności, niezawodności ani powtarzalności.

Wynika stąd wniosek, który łatwo przegapić. Humanoid nie konkuruje z robotem przemysłowym i nigdy nie będzie. Jest budowany do czegoś innego: do pracy w miejscu, którego nie da się przebudować pod maszynę. Magazyn, w którym półki stoją tak, jak stoją, schody, których nie zastąpi się podjazdem, stanowisko zaprojektowane dla człowieka trzydzieści lat temu. Tam ramię przykręcone do podłogi jest bezużyteczne, a maszyna o ludzkich proporcjach ma sens – o ile udźwignie, wytrzyma zmianę i nikogo nie przewróci.

Kiedy mgła opadnie

Rzecz w tej rubryce nie polega na zgadywaniu, kiedy coś nastąpi, tylko na wskazaniu, co trzeba zobaczyć, żeby wiedzieć, że nastąpiło. W przypadku humanoidów są to cztery rzeczy, wszystkie sprawdzalne.

Po pierwsze: liczba robotów pracujących u klientów, podana przez kogoś innego niż producent. Po drugie: pełna zmiana na jednym ładowaniu albo taka wymiana baterii, która nie wymaga odstawiania maszyny. Po trzecie: ogłoszona norma bezpieczeństwa dla robotów kroczących, a nie norma w opracowaniu. Po czwarte: koszt godziny pracy niższy od kosztu godziny pracy człowieka na tym samym stanowisku.

Co do tego ostatniego, rachunek da się zrobić już dziś. Agility Robotics podaje cenę około ośmiu i pół tysiąca dolarów miesięcznie za robota i ponad dwadzieścia godzin pracy na dobę. Sześćset godzin miesięcznie za osiem i pół tysiąca dolarów daje mniej więcej czternaście dolarów za godzinę. To jest liczba tego samego rzędu co stawka pracownika magazynu w Stanach Zjednoczonych. Nie niższa dramatycznie – tego samego rzędu.



I właśnie dlatego ta mgła rzeczywiście zaczyna opadać, choć wolniej, niż zapowiadają nagłówki. Kiedy koszt godziny zrówna się ze stawką, a potem zejdzie poniżej, o wdrożeniu przestanie decydować entuzjazm, a zacznie decydować arkusz kalkulacyjny. Wtedy liczba pracujących humanoidów przestanie być przedmiotem sporu, bo będzie ją widać w zestawieniach – tak jak dziś widać cztery miliony siedemset tysięcy ramion przykręconych do podłogi.

A na pytanie, od którego zaczęliśmy – ile humanoidów pracuje dziś w przemyśle – rzetelna odpowiedź brzmi: nie wiadomo. Wiadomo, ile sztuk w ciągu roku dostarczono, i to z szacunku, a nie ze spisu. Wiadomo, ile zamówiono. Wiadomo, że w jednej fabryce w Karolinie Południowej jeden robot przepracował tysiąc dwieście pięćdziesiąt godzin. To jest mniej, niż obiecuje pierwsze zdanie z wyszukiwarki, ale jest to wiedza, którą da się sprawdzić – a to w tej dziedzinie towar rzadki. ■

Wiesław Marciniak

Jak czytać doniesienia o robotach

Cztery pytania, które warto zadać każdej liczbie z nagłówka.

Zbudowane, zamówione czy pracujące? To trzy różne liczby i często różnią się o rząd wielkości. Zamówienie wieloletnie nie jest dostawą, a dostawa nie jest pracą na zmianie.

Kto liczył? Producent, firma badająca rynek czy niezależna organizacja? Roboty przemysłowe liczy Międzynarodowa Federacja Robotyki i dlatego te liczby da się porównywać rok do roku. Dla humanoidów takiej instytucji jeszcze nie ma.

Ile godzin, a nie ile dni? „Pracował przez rok" znaczy co innego niż „przepracował tysiąc dwieście pięćdziesiąt godzin". Pierwsza wersja opisuje kalendarz, druga maszynę.

Co znaczy „pracuje cały dzień"? Czy chodzi o jedno ładowanie, czy o dobę poskładaną z kilkunastu ładowań? Obie odpowiedzi bywają prawdziwe i opisują zupełnie inne maszyny.

Spis czy szacunek? Spis mówi, ile czegoś jest, i opisuje, jak to policzono. Szacunek mówi, ile czegoś prawdopodobnie jest, i metody zwykle nie podaje. Obie rzeczy bywają potrzebne, ale tylko pierwszą da się sprawdzić

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Oddajemy cześć kobietom, które odegrały wybitną rolę w rozwoju techniki i nauk ścisłych

Czterdzieści warstw mydła

Jak Katharine Blodgett kazała szybie przestać odbijać

Weźcie telefon i popatrzcie z ukosa na szkiełko aparatu, najlepiej przy oknie albo pod lampą. Zobaczycie fioletowy albo zielonkawy połysk, jakiego nie ma zwykła szyba. To nie ozdoba i nie powłoka ochronna. To resztka po sztuczce wymyślonej w 1938 roku.

Zacznijmy od kłopotu, który ta sztuczka rozwiązuje. Szkło nie przepuszcza całego światła: na granicy powietrza i szkła część promienia zawraca, i nie jest to część znikoma. Katharine Blodgett podała w swoim patencie, że od jednej powierzchni odbija się około 4,25 procent padającego światła, a od całej szyby, która ma przecież dwie powierzchnie, około 8,5 procent.

Dla okna to niewiele. Dla obiektywu bardzo dużo, bo obiektyw złożony z czterech soczewek ma osiem powierzchni. Jeżeli na każdej ginie 4,25 procent, to do klatki filmu dociera 0,9575 podniesione do ósmej potęgi (kto ma kalkulator, niech sprawdzi), czyli około siedemdziesięciu procent światła. Blisko trzydzieści procent obrazu zjada samo szkło. Co gorsza, światło odbite nie znika – błąka się między soczewkami i wraca na zdjęcie w postaci mgły i zajączków. Przed wojną był to jeden z najpoważniejszych problemów optyki.



Katharine Burr Blodgett – przy pracy w General Electric Research Laboratories, gdzie prowadziła badania w dziedzinie chemii powierzchni i cienkich warstw
(Autorstwa Smithsonian Institution from United States – Katharine Burr Blodgett (1898-1979), demonstrating equipment in lab, No restrictions, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7409636)

Asystentka

Katharine Burr Blodgett urodziła się 10 stycznia 1898 roku w Schenectady w stanie Nowy Jork. Jej ojciec, prawnik patentowy w General Electric, zginął kilka tygodni wcześniej, zastrzelony przez włamywacza. Skończyła Bryn Mawr w 1917 roku, a rok później zrobiła w Chicago magisterium: pochłanianie gazów przez węgiel drzewny, praca prowadzona we współpracy z wojskową służbą chemiczną, bo chodziło o maski przeciwgazowe.

W 1918 roku, mając dwadzieścia lat, została przyjęta do laboratorium badawczego General Electric jako asystentka Irvinga Langmuira, chemika, który czternaście lat później dostanie Nagrodę Nobla za chemię powierzchni. Słowo „asystentka" proszę zapamiętać.

W 1926 roku obroniła doktorat z fizyki w Cavendish Laboratory w Cambridge, u Ernesta Rutherforda – jako pierwsza kobieta, która uzyskała w tym laboratorium doktorat z fizyki. Rutherford napisał o niej: „Wykazała się dużą oryginalnością i biegłością doświadczalną

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

w badaniu swojego zagadnienia". Potem wróciła do Schenectady i została tam już na zawsze: przepracowała w tym laboratorium czterdzieści pięć lat, do emerytury w 1963 roku, i zmarła w tym samym mieście 12 października 1979 roku.

Jak zbudować warstwę grubości jednej cząsteczki

Langmuir badał cienkie błony na wodzie. Jeżeli na powierzchnię wody kapnąć odrobinę pewnych substancji (na przykład mydła, czyli soli kwasów tłuszczowych), rozleją się one w warstwę grubości dokładnie jednej cząsteczki. Cząsteczki takiego mydła mają jeden koniec lubiący wodę, a drugi jej unikający, więc ustawiają się karnie, jak zapałki w pudełku, stroną wodolubną w dół. Cieńsza taka warstwa być nie może, bo cząsteczki nie da się przeciąć. Grubsza też nie, bo na wodzie każda cząsteczka chwyta się powierzchni tym końcem, który wodę lubi; na grzbiecie innej cząsteczki nie miałaby się czego uchwycić.

Blodgett wymyśliła, co z tym zrobić. Zanurzyła w wodzie czystą płytkę szkła i powoli ją wyciągnęła; warstwa przykleiła się do szkła. Zanurzyła drugi raz i przykleiła się druga warstwa. I tak dalej, zanurzenie po zanurzeniu. Każde dokładało jedną cząsteczkową warstwę, a grubość powłoki można było odmierzać, licząc zanurzenia, zamiast cokolwiek mierzyć (**rysunek 1**).

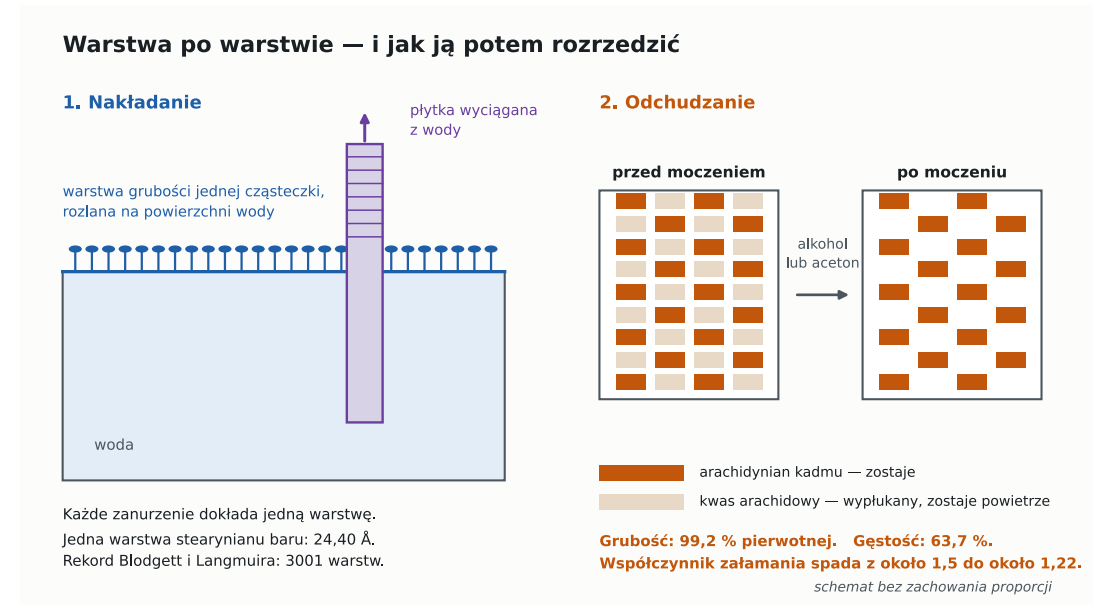
W pracy ogłoszonej razem z Langmuirem w „Physical Review" w 1937 roku podała zmierzoną grubość jednej takiej warstwy stearynianu baru: 24,40 angstrema, czyli niecałe dwa i pół nanometra – a nanometr to miliardowa część metra. Podała też, ile warstw udało się ułożyć jedna na drugiej: trzy tysiące i jedną.

Do dziś taka błona nazywa się warstwą Langmuira–Blodgett, a przyrząd do jej wytwarzania – wanną Langmuira–Blodgett. W obu tych nazwach nazwisko jest na swoim miejscu.

Ćwierć fali

Dlaczego warstwa położona na szkle miałaby zmniejszyć odbicie, a nie zwiększyć? Promień padający na powleczoną szybę odbija się dwa razy: raz od górnej powierzchni powłoki, drugi raz od granicy powłoki ze szkłem. Wracają więc dwa promienie. Drugi przebył dodatkową drogę – w dół przez powłokę i z powrotem, czyli dwie jej grubości.

Światło jest falą, a fale się dodają. Jeżeli grzbiet jednej spotka grzbiet drugiej, zrobi się jaśniej.



Rysunek 1. Schemat, bez zachowania proporcji. Po lewej: nakładanie warstw jedna po drugiej przez kolejne zanurzenia płytki. Grubość pojedynczej warstwy stearynianu baru, 24,40 angstrema, oraz rekord trzech tysięcy i jednej warstwy za pracą K. B. Blodgett i I. Langmuira w „Physical Review" 51, 964 (1937). Po prawej: odchudzanie gotowej błony. Zachowanie 99,2 procent grubości przy spadku gęstości do 63,7 procent – ta sama praca. Współczynniki załamania i opis rozpuszczalnika za patentem US 2 220 861

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Jeżeli grzbiet spotka dolinę, fale się zniosą i odbicia nie będzie. Światło przy tym nie przepada: to, co się nie odbiło, idzie dalej w szkło, i właśnie o to w całej sztuczce chodzi. Wystarczy więc tak dobrać grubość powłoki, żeby ta dodatkowa droga wynosiła pół fali. Dwie grubości równe pół fali to jedna grubość równa ćwierci fali (**rysunek 2**).

Jest w tym jednak haczyk, bez którego rachunek się rozjedzie. W powłoce światło biegnie wolniej niż w powietrzu, więc dla fali liczy się nie sama grubość, lecz grubość pomnożona przez współczynnik załamania. Optycy nazywają to grubością optyczną. Warunek ćwierci fali dotyczy właśnie grubości optycznej, a nie tej, którą zmierzyłby mikrometr.

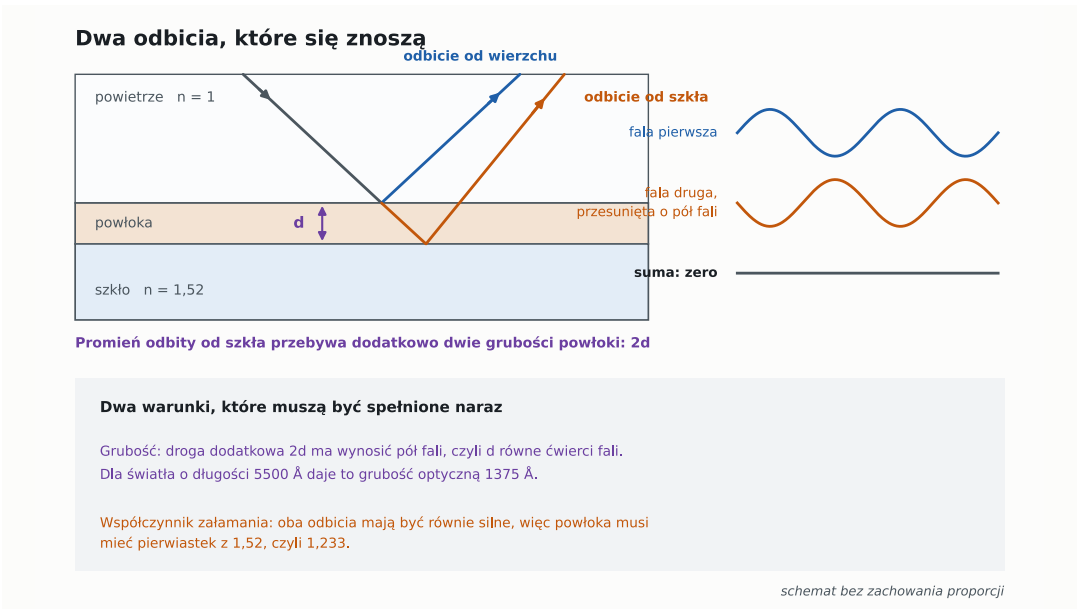
Blodgett obliczyła powłokę dla światła o długości 5500 angstremów, czyli 550 nanometrów – zielonożółtego, bo na nie oko jest najczulsze. Ćwierć z tego to 1375 angstremów i taką właśnie wartość podaje jej patent jako grubość optyczną powłoki. Sama warstwa jest cieńsza: dla współczynnika załamania 1,22 wychodzi 1375 podzielone przez 1,22, czyli 1127 angstremów, niecałe 113 nanometrów.

Sama grubość jednak nie wystarcza. Żeby oba odbicia zniosły się do zera, muszą być jednakowo silne. Siła odbicia zależy od tego, w jakim stosunku zmienia się współczynnik załamania na granicy – a więc od ilorazu, nie od różnicy. Pierwsze odbicie zachodzi na granicy powietrza i powłoki, drugie na granicy powłoki i szkła. Jednakowe będą wtedy, gdy powłoka leży w połowie drogi – ale w połowie liczonej mnożeniem, a nie odejmowaniem: ile razy powłoka załamuje mocniej od powietrza, tyle razy szkło ma załamywać mocniej od powłoki. Ściśle znaczy to, że współczynnik powłoki ma być pierwiastkiem z iloczynu współczynników powietrza i szkła.

Dla zwykłego szkła o współczynniku 1,52 wychodzi pierwiastek z 1,52, czyli 1,233. Blodgett podaje w patencie dokładnie tę liczbę. Zwykła średnia z jedności i 1,52 dałaby 1,26 i byłaby błędna.

Materiał, którego nie było

Nie ma przezroczystego ciała stałego o współczynniku załamania 1,233. Mydła, z których Blodgett budowała swoje błony, mają około 1,5, czyli prawie tyle co szkło. Dla światła taka warstwa jest niemal przedłużeniem szkła: granica powłoki ze szkłem przestaje optycznie istnieć, więc drugie odbicie byłoby znikome,



Rysunek 2. Dwa odbicia i jak się znoszą; schemat, bez zachowania proporcji. Grubość optyczna 1375 angstremów jako ćwierć fali o długości 5500 angstremów oraz wymagany współczynnik załamania 1,233 – za patentem Katharine B. Blodgett US 2 220 861 „Reduction of surface reflection", zgłoszonym 16 czerwca 1938 i udzielonym 5 listopada 1940. Grubość rzeczywistą 1127 angstremów przeliczono w redakcji z grubości optycznej i współczynnika 1,22, czyli wartości uzyskanej w przykładzie z patentu, a nie wymaganej 1,233 – dla niej wyszłoby 1115 angstremów

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

pierwsze zostałoby prawie całe i nic by się nie zniosło.

Rozwiązanie, które wymyśliła, należy do najładniejszych pomysłów w historii optyki technicznej. Budowała powłokę nie z jednej substancji, lecz z mieszaniny dwóch: arachidynianu kadmu i kwasu arachidowego, mniej więcej po połowie. Gotową już błonę moczyła od minuty do pięciu minut w alkoholu albo w acetonie – acetonem zmywa się dzisiaj lakier do paznokci, więc zapach tej kąpieli zna prawie każdy. Kwas arachidowy się rozpuszczał. Arachidynian kadmu zostawał – ale zostawał jako szkielet, w którym miejsce po rozpuszczonym składniku zajmowało powietrze.

Efekt zmierzyła już wcześniej, w pracy z 1937 roku, na błonach ze stearynianu baru: po wypłukaniu błona zachowywała 99,2 procent pierwotnej grubości, ale tylko 63,7 procent gęstości. Nie kurczyła się więc prawie wcale, a znaczna część jej objętości stawała się powietrzem. A powietrze ma współczynnik załamania równy jedności, więc im więcej go w błonie, tym niżej schodzi współczynnik całej mieszanki. W patencie, już dla mieszaniny arachidynianu kadmu z kwasem arachidowym, podaje gotowy wynik takiego rozrzedzenia: około 1,22 w jednym przykładzie i około 1,25 w innym. Ile dokładnie powietrza w tych powłokach zostało, patent nie mówi.

Wymagane było 1,233. Jeden przykład z patentu wypada nieco poniżej tej wartości, drugi nieco powyżej.

To jest coś innego niż zwykły wynalazek. Blodgett nie znalazła substancji o potrzebnym współczynniku załamania; wzięła substancję o współczynniku niewłaściwym i wydrążyła w niej tyle dziur, żeby średnia wyszła taka, jakiej potrzebowała. Materiał o współczynniku 1,22 nie istniał, więc wytworzyła go z mydła i powietrza zmieszanych w odpowiedniej proporcji. Dziś mówi się o powłokach o zadanej porowatości i postępuje się dokładnie tak samo.

Powłoka miała około czterdziestu warstw. Nie ma sensu mnożyć tych czterdziestu przez znane nam 24,40 angstrema – tamta liczba dotyczy stearynianu baru z pomiarów grubości, a powłoka przeciwodblaskowa jest z innego mydła, którego grubości jednej warstwy żadne źródło nie podaje; z grubości całej powłoki wypada w niej około 28 angstremów na warstwę. W 1939 roku General Electric pokazał szybę powleczoną tą metodą, a prasa nazwała ją „niewidzialnym szkłem". Niewidzialna, rzecz jasna, nie była. Odbijała kilkanaście razy mniej niż zwykła szyba.

Jak zmierzyć nanometr okiem

Po drodze zrobiła jeszcze coś, co bywa pomijane, a jest może użyteczniejsze od samej powłoki. Cienka błona na szkle nabiera barwy, na tej samej zasadzie składania dwóch odbić, dla której barwi się plama oleju na kałuży. Różne długości fali znoszą się przy różnych grubościach, więc z odbitego światła ubywa raz zieleni, raz czerwieni, a to, co zostaje, ma kolor. Kolor zależy od grubości i jest tym samym kolorem przy tej samej grubości za każdym razem.

Blodgett zbudowała z tego przyrząd pomiarowy. Na płytce z ciężkiego szkła ołowiowego (które załamuje światło mocniej niż zwykła szyba, więc błona daje na nim wyraźne drugie odbicie), poczernionej od spodu, żeby nie przeszkadzało odbicie od dolnej powierzchni, ułożyła powłokę schodkami o znanych grubościach, odmierzonych liczbą zanurzeń. Dostała wzorzec kolorów. Żeby zmierzyć grubość nieznanej błony, kładło się ją obok wzorca pod tym samym światłem i szukało schodka o tym samym kolorze.

Skok jednego schodka to dziesięć warstw cząsteczkowych, czyli 244 angstremy, a to, jak sama zauważa w patencie na ten miernik, różni się od jednego mikrocala, dawnej jednostki warsztatowej równej 25,4 nanometra, o mniej niż cztery procent. W pracy z 1937 roku pokazała przy tym, że przy świetle spolaryzowanym i pod odpowiednim kątem oko odróżnia schodki co dwie warstwy, czyli różnicę grubości rzędu pięciu nanometrów.

Pięć nanometrów. Okiem. Bez wskazówki, bez skali, bez noniusza – z samego koloru.

Dlaczego to nie weszło do produkcji

Powłoka Blodgett nigdy nie trafiła do wyrobów. Była za miękka. Warstwa mydła ułożona cząsteczka przy cząsteczce, w dodatku wydrążona, ściera się od przetarcia szmatką.

Pisano o tym od razu. W amerykańskim piśmie branżowym dla operatorów filmowych, w artykule o powlekanych obiektywach z końca 1940 roku, opisano jej proces i stwierdzono wprost, że „skrajna kruchość" błony „uczyniła ten proces niepraktycznym do powszechnego użytku".

A ścigali ją już wtedy inni. Pół roku po jej zgłoszeniu patentowym, 27 grudnia 1938 roku, dwaj

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Amerykanie, C. Hawley Cartwright i Arthur Francis Turner, zgłosili proces zupełnie inny w wykonaniu, a identyczny w fizyce: zamiast układać warstwy z wody, odparowywali w próżni fluorek metalu i osadzali go na szkle.

Fluorek magnezu ma współczynnik załamania około 1,38; tyle podają dziś katalogi dla światła 550 nanometrów, a ówczesne pomiary warstw odparowanych dawały około 1,34. Tak czy inaczej do 1,233 jest stąd daleko, więc odbicia taka warstwa nie znosi do zera: pojedyncza warstwa fluorku magnezu na zwykłym szkle nie zejdzie poniżej mniej więcej 1,3 procent. Za to jest twarda. Patent Cartwrighta i Turnera podaje przy tym wartość zmierzoną, 0,4 procent, ale dla własnego przykładu, z innym fluorkiem i innym szkłem, a nie dla fluorku magnezu na szybie (**rysunek 3**).

Oba sposoby realizują ten sam pomysł: ćwierć fali i pośredni współczynnik załamania. Powłoka Blodgett była bliższa ideału i była pierwsza. Przegrała na twardości. Wygrała ta, którą dało się wytrzeć ściereczką.

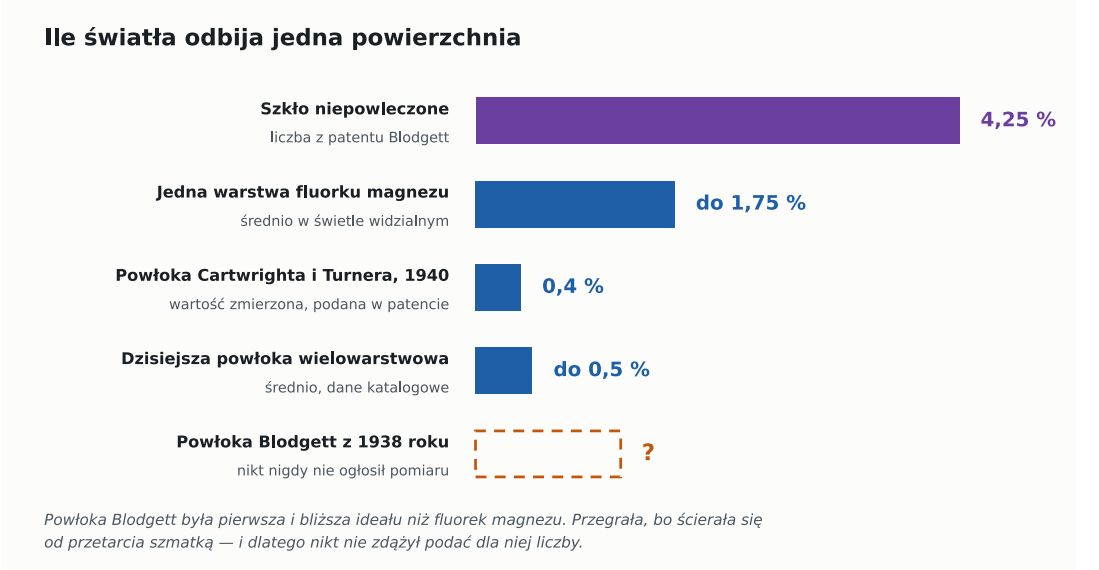
Co z tego zostało

Pomysł przetrwał w całości. Zmienił się materiał.

Powłokę przeciwodblaskową zbudowaną na zasadzie, którą Blodgett rozpisała w patencie z 1938 roku, ma dziś niemal każdy obiektyw, większość lepszych okularów i szyby muzealnych gablot. Niepowleczona powierzchnia odbija około czterech procent; dzisiejsze katalogi podają tę wartość zaokrągloną, Blodgett liczyła dokładniej i podawała 4,25. Pojedyncza warstwa fluorku magnezu sprowadza to średnio do 1,75 procent w zakresie światła widzialnego. Powłoki wielowarstwowe schodzą średnio poniżej pół procenta. Zamiast jednej warstwy układa się ich kilka, każdą o innej grubości, tak żeby wygaszanie działało nie dla jednej długości fali, lecz dla całego zakresu naraz.

Stąd fioletowy połysk na szkiełku aparatu w telefonie. Żadna powłoka nie wygasza wszystkich barw jednakowo, więc to, co widzicie, jest resztką: tymi długościami fali, których akurat nie udało się znieść. Kolor połysku jest dopełnieniem barwy, pod którą powłokę dobrano, a fiolet znaczy, że najstaranniej wygaszono zieleń. Tyle zostaje z ośmiu i pół procent.

Osobno przetrwała sama metoda nakładania warstw. Wanna Langmuira–Blodgett stoi dziś w laboratoriach zajmujących się elektroniką organiczną, czujnikami gazów i modelami



Rysunek 3. Ile światła odbija jedna powierzchnia. Wartości 4,25 procent dla szkła niepowleczonego oraz wymagania postawione powłoce – za patentem US 2 220 861. Wartość 0,4 procent dla odparowanego fluorku – za patentem Cartwrighta i Turnera US 2 207 656, zgłoszonym 27 grudnia 1938. Wartości dla powłok dzisiejszych za danymi katalogowymi wytwórcy optyki; są to wartości średnie w podanym zakresie długości fali, a nie wyniki jednego pomiaru. Dla powłoki samej Blodgett nikt nigdy nie ogłosił zmierzonej wartości odbicia szczątkowego – jej patent mówi tylko, że przy wybranej długości fali odbicie da się sprowadzić „praktycznie do zera”

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Katharine Burr Blodgett w swoim laboratorium
(Courtesy of the Museum of Innovation and Science, https://whyy.org/episodes/the-hidden-stories-of-women-scientists/)

błon komórkowych, wszędzie tam, gdzie potrzeba warstwy o grubości zadanej z dokładnością do jednej cząsteczki. Przegląd ogłoszony w 2024 roku w czasopiśmie „Nanomaterials" wymienia czujniki i sztuczne błony biologiczne jako dwa najszerzej dziś rozwijane zastosowania.

Czego jej nie policzono

Rachunek z nazwiskiem wychodzi w tym przypadku mieszany.

Po stronie „policzono": patenty wymieniają ją jako jedynego wynalazcę, błony noszą jej nazwisko obok nazwiska Langmuira, a w 1951 roku dostała medal Garvana, przyznawany przez Amerykańskie Towarzystwo Chemiczne kobietom chemikom za wybitne osiągnięcia. Miasto Schenectady ogłosiło 13 czerwca 1951 roku Dniem Katharine Blodgett. Otrzymała cztery doktoraty honorowe, a dziś trzy towarzystwa naukowe przyznają nagrody jej imienia.

Druga strona rachunku jest udokumentowana równie dobrze. Została przyjęta w 1918 roku jako asystentka Langmuira i w żadnym dostępnym źródle nie ma śladu po tym, żeby kiedykolwiek awansowała na inne stanowisko; w tym laboratorium przepracowała czterdzieści pięć lat. Kiedy w 1953 roku ogłoszono w czasopiśmie „Science" artykuł podsumowujący siedemdziesiąt pięć lat badań w General Electric, jej w nim nie było. Opisy prasowe po ogłoszeniu niewidzialnego szkła poświęcały sporo miejsca jej ogrodowi, domkowi nad jeziorem i działalności w klubach.

Dlaczego dwa odbicia mogą się znieść

Rachunek na trzy kroki, bez żadnej wyższej matematyki. Stoi za każdą powłoką przeciwodblaskową.

Krok pierwszy – droga. Promień odbity od spodu powłoki przebywa więcej niż promień odbity od wierzchu: w dół i z powrotem, czyli dwie grubości powłoki – licząc je tak, jak widzi je światło, czyli razy współczynnik załamania. Żeby ten dodatek wyniósł pół fali, grubość optyczna musi być równa jej ćwierci.

Krok drugi – która fala. Ćwierć której fali? Trzeba wybrać jedną. Blodgett wybrała 5500 angstremów (barwa zielona). Ćwierć z 5500 to 1375 angstremów – i tyle ma wynosić grubość optyczna. Przy współczynniku 1,22 daje to warstwę rzeczywistą o grubości 1127 angstremów.

Krok trzeci – siła. Dwie fale znoszą się do zera tylko wtedy, gdy są jednakowo silne. Siła odbicia zależy nie od różnicy współczynników po obu stronach granicy, lecz od ich stosunku. Powietrze ma 1, szkło 1,52. Oba odbicia będą jednakowe, gdy powłoka dzieli tę drogę na dwa równe mnożenia – stąd pierwiastek z 1,52, czyli 1,233. Zwykła średnia dałaby 1,26 i byłaby błędna.

I dlaczego to się mieni. Grubość ćwierćfalowa jest ćwierćfalowa tylko dla jednej barwy. Dla pozostałych wygaszanie jest niepełne i coś z nich zostaje – i to właśnie widać jako ten barwny połysk, od którego zaczęliśmy. Im lepsza powłoka, tym słabszy ten połysk; nigdy jednak nie znika całkiem, bo jedna warstwa nie potrafi trafić we wszystkie barwy naraz.

Do tego dwa drobiazgi. Wydana w 1993 roku przez General Electric broszura wspominała jej słynny przepis na popovers, amerykańskie wydmuchane babeczki z rzadkiego ciasta. A gdy czterdzieści lat po jej śmierci dziennikarze zbierali o niej wspomnienia, jeden z rozmówców zapamiętał ją jako „żonę doktora Blodgetta". Nigdy nie wyszła za mąż. Doktorem Blodgett była ona.

Jej zeszytów laboratoryjnych nie ma. Zaginęły albo zostały zniszczone i nikt nie wie, kiedy ani dlaczego.

Zostały patenty i zostało szkło. Fiolet, który widać z ukosa na niemal każdym obiektywie, jest śladem po kobiecie, która potrzebowała materiału o współczynniku załamania 1,23, nie znalazła go i zrobiła go sama, wypłukując z mydła jeden z dwóch składników. ■

Paweł Biernacki

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

STARLINK

Jak Elon Musk stał się bogiem wojny





Starlink

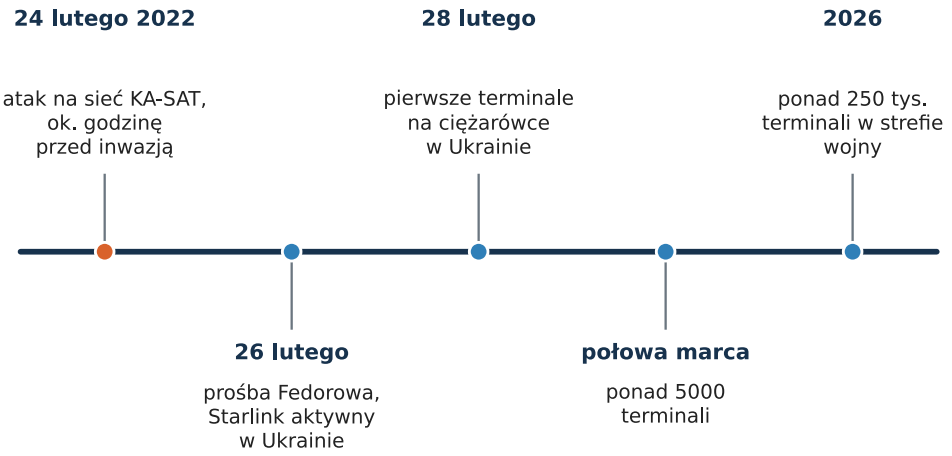
Jak Elon Musk stał się bogiem wojny

24 lutego 2022 r., około godzinę przed rozpoczęciem rosyjskiej inwazji na Ukrainę, z sieci zaczęły znikać modemy satelitarne. Sam satelita KA-SAT, który obsługuje Europę z orbity geostacjonarnej, nie został uszkodzony i działał dalej. Napastnicy weszli do systemu od strony Ziemi. Wykorzystali źle skonfigurowane urządzenie VPN (*Virtual Private Network*, wirtualna sieć prywatna), czyli bramkę, przez którą administratorzy łączą się zdalnie z siecią operatora. W ten sposób dostali się do części systemu służącej do zarządzania, a następnie uruchomili w modemach program AcidRain, który niszczył dane w ich pamięci. Modem po takim ataku trzeba było zresetować do ustawień fabrycznych albo wymienić.

Godzina przed czołgami

Celem była Ukraina, ale skutki sięgnęły znacznie dalej. Awaria objęła co najmniej 30 tysięcy modemów w Europie Środkowej i Wschodniej. W Niemczech 5800 turbin wiatrowych firmy Enercon straciło łączność potrzebną do zdalnego nadzoru i sterowania. W maju 2022 r. Unia Europejska, Stany Zjednoczone i Wielka Brytania oficjalnie wskazały Rosję jako sprawcę ataku. Wiktor Żora,

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 1. Od ataku na sieć KA-SAT do masowego użycia Starlinka w Ukrainie

ukraiński urzędnik odpowiedzialny za cyberbezpieczeństwo, mówił w marcu o ogromnej utracie łączności na samym początku wojny. Później ta ocena została złagodzona: atak nie przerwał całkowicie łączności między ukraińskimi siłami zbrojnymi.

Dwa dni po ataku, 26 lutego, wicepremier i minister transformacji cyfrowej Ukrainy Mychajło Fedorow napisał na Twitterze do Elona Muska: „Podczas gdy pan próbuje skolonizować Marsa, Rosja próbuje okupować Ukrainę!". Poprosił o stacje Starlink. Niecałe jedenaście godzin później Musk odpowiedział: „Usługa Starlink działa już w Ukrainie. Kolejne terminale są w drodze". Wpis na Twitterze był jednak tylko publiczną częścią tej historii. Według Gwynne Shotwell, prezes SpaceX, firma rozmawiała o uruchomieniu usługi w Ukrainie już około półtora miesiąca przed inwazją.

28 lutego Fedorow pokazał zdjęcie ciężarówki z terminalami i podpisał je krótko: „Starlink – już tu jest. Dziękuję, @elonmusk". W połowie marca w Ukrainie działało ponad 5000 terminali. Według szacunku przytoczonego jesienią 2026 r. przez magazyn „The Atlantic" w strefie wojny działa dziś ponad 250 tysięcy terminali.

Skąd ten podtytuł?

Bogiem wojny nazywano artylerię. Te słowa przypisuje się Stalinowi, a w 1944 r. powtarzały je radzieckie plakaty. Artyleria zasłużyła na to określenie, bo przez większą część XX wieku odpowiadała za ogromną część strat na polu bitwy. Na współczesnym froncie sama lufa już jednak nie wystarcza. Obserwator, dron rozpoznawczy, dowódca i stanowisko ogniowe muszą wymieniać dane w czasie, który liczy się w sekundach. Kto traci łączność, ten traci dużą część swojej siły ognia.

W połowie października 2026 r. Ukraina zgłosiła, że terminale poruszające się szybciej niż około 160 km/h tracą połączenie z siecią. Ucierpiały drony przechwytujące, które polują na rosyjskie drony odrzutowe, oraz inne operacje bezzałogowe. Po około dziesięciu dniach, 24 października, strona ukraińska poinformowała o powrocie do normalnej pracy. Do dziś nie wiadomo na pewno, kto o tym ograniczeniu zdecydował, bo Elon Musk, prezydent Donald Trump i sekretarz stanu Marco Rubio przedstawiają tę sprawę różnie.

Nikt nie zestrzelił wówczas żadnego satelity. Zmieniły się zasady działania sieci, a operacje wojskowe jednego z państw zależały od tej zmiany. W historii wojen trudno znaleźć prywatną firmę, która miałaby tak bezpośredni wpływ na codzienną pracę armii walczącej na froncie. „Bóg wojny" w naszym podtytule jest więc metaforą tej zależności. Nie twierdzimy, że Musk rozstrzyga o losach wojny, a w dalszej części tego materiału sprawdzimy, gdzie jego władza się kończy.

Aby zrozumieć, skąd ta władza się bierze, trzeba najpierw zrozumieć sam system. Okaże się, że te same rozwiązania techniczne, które pozwalają obsłużyć miliony użytkowników, pozwalają też z jednego miejsca zmienić warunki pracy każdego z nich. Zaczniemy od fizyki, czyli od pytania, dlaczego internet z kosmosu przez lata był po prostu słaby. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Elementarz: dlaczego internet z kosmosu był tak słaby

Daleko, czyli wolno

W listopadowym numerze pisaliśmy o satelitach, bez których nie ma dziś łączności, nawigacji ani prognozy pogody. Do internetu przez dziesięciolecia używano przede wszystkim orbity geostacjonarnej, oznaczanej skrótem GEO (*Geostationary Orbit*). Leży ona 35 786 km nad równikiem. Satelita krąży tam dokładnie w takim tempie, w jakim obraca się Ziemia, więc obserwatorowi z Ziemi wydaje się, że wisi nieruchomo w jednym punkcie nieba. Ma to wielką zaletę: antenę wystarczy raz ustawić i nigdy więcej nie ruszać. Jeden satelita widzi przy tym około 42% powierzchni Ziemi, licząc aż do horyzontu, więc trzy satelity obejmują prawie cały świat poza okolicami biegunów.

Wadą jest odległość. Światło i fale radiowe biegną z prędkością około 300 tysięcy kilometrów na sekundę, czyli szybko, ale nie nieskończenie szybko. Gdy klikamy link, pytanie musi dotrzeć do satelity, wrócić na Ziemię do stacji połączonej z internetem, a odpowiedź musi przebyć tę samą drogę w przeciwną stronę. To cztery odcinki po co najmniej 35 786 km, razem ponad 143 tysiące kilometrów. Sama podróż sygnału trwa więc 0,48 sekundy, a z przetwarzaniem

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

i oczekiwaniem w kolejkach zwykle około 0,6 sekundy.

Czas od wysłania pytania do odebrania odpowiedzi to opóźnienie, po angielsku latency. Przy pobieraniu filmu albo dużego pliku pół sekundy nie ma wielkiego znaczenia: transmisja zacznie się chwilę później, a potem dane popłyną z pełną szybkością. Są jednak zastosowania, w których to samo opóźnienie przekreśla sens połączenia. Pokażemy to na czterech przykładach.

Gdzie pół sekundy to za dużo

Rozmowa. Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny (ITU, International Telecommunication Union) w zaleceniu ITU-T G.114 przyjmuje, że opóźnienie głosu w jedną stronę do 150 ms jest dla większości rozmów niezauważalne, a powyżej 400 ms nie powinno się go dopuszczać przy projektowaniu sieci. Przez satelitę geostacjonarnego głos dociera do rozmówcy po około 0,3 s, a jego odpowiedź wraca po następnych 0,3 s. Rozmówcy zaczynają mówić jednocześnie, potem jednocześnie milkną i czekają na siebie nawzajem. Gdy obaj korzystają z łącza satelitarnego, głos przechodzi przez satelitę dwukrotnie. Wtedy opóźnienie w jedną stronę przekracza 0,5 s, czyli wyraźnie więcej niż granica 400 ms. Ten sam kłopot dotyczy wideokonferencji.

Strona internetowa. Zanim przeglądarka otrzyma pierwszy bajt strony, musi kilka razy wymienić z serwerami komunikaty tam i z powrotem. Najpierw pyta o adres serwera, potem nawiązuje z nim połączenie, uzgadnia szyfrowanie i dopiero na końcu wysyła żądanie strony. To zwykle trzy lub cztery wymiany. Przez satelitę geostacjonarnego każda trwa około 0,6 s, więc pierwsze dane przychodzą po około 2 s lub później, niezależnie od szybkości łącza. Współczesna strona pobiera przy tym elementy z wielu serwerów i każdy z nich wymaga podobnych wymian. Inżynierowie SpaceX podają, że gdy przepływność przekroczy około 10 Mb/s, dalsze jej zwiększanie niewiele już skraca czas otwierania stron. Pomaga wtedy dopiero zmniejszanie opóźnienia.

Gra sieciowa. W grach rozgrywanych w czasie rzeczywistym, takich jak strzelanki czy wyścigi, serwer gry rozstrzyga, kto wykonał ruch pierwszy. Gracz z opóźnieniem 0,6 s widzi przeciwnika w miejscu, w którym ten był ponad pół sekundy wcześniej. Jego strzał trafia w to miejsce, gdy przeciwnika już tam nie ma, więc gracz przegrywa niemal każdy pojedynek z kimś, kto ma łącze światłowodowe.

Sterowanie na odległość. Ten przykład ma bezpośredni związek z tematem numeru. Pilot drona FPV (*First Person View*, widok z pierwszej osoby) patrzy na obraz z kamery drona i na bieżąco poprawia jego lot. Przez satelitę geostacjonarnego obraz dociera do pilota z opóźnieniem około 0,3 s, a jego polecenie wraca do drona po kolejnych 0,3 s. Dron lecący z prędkością 100 km/h pokonuje w tym czasie około 17 m. Pilot zobaczy przeszkodę dopiero wtedy, gdy dron w nią uderzy. Wojsko zna ten problem od dawna. Amerykańskimi dronami Predator sterowano przez satelitę z baz w USA, ale start i lądowanie wykonywały załogi na miejscu, łączące się z dronem bezpośrednio drogą radiową. Jak mówił pilot w materiale US Air Force, opóźnienie łącza satelitarnego nie jest dobre przy starcie i lądowaniu. Satelita geostacjonarny wystarczał do długiego lotu patrolowego, w którym decyzje zapadają w ciągu minut, ale nie do manewrów, w których liczą się ułamki sekundy.

Wszystkie cztery przykłady mają wspólny mianownik. Przepływność można zwiększyć, budując większe satelity i przydzielając szersze pasma. Opóźnienia wynikającego z odległości nie zmniejszy jednak żadna technika, bo nikt nie przyspieszy światła. Można jedynie skrócić drogę sygnału.

75 razy bliżej

Stąd prosty wniosek: satelitę trzeba zbliżyć do Ziemi. Starlink korzysta z orbity niskiej LEO (Low Earth Orbit). Znaczna część jego satelitów pracowała dotąd na wysokości około 550 km, a w 2026 r. SpaceX obniża je do około 480 km. Tę ostatnią wartość przyjmujemy w dalszych obliczeniach. Taka orbita jest około 75 razy bliżej powierzchni Ziemi niż orbita geostacjonarna, co dobrze widać na **rysunku 2**.

Sama droga sygnału trwa wtedy około 6,4 ms, czyli 75 razy krócej. Zmierzone wartości są większe, bo satelita rzadko znajduje się dokładnie nad głową użytkownika, dane przechodzą przez naziemne sieci, a pakiety czekają w kolejkach. SpaceX podał dla USA medianę 25,7 ms w godzinach największego ruchu w 2025 r., a pomiary niezależnych badaczy dają w skali świata około 40...50 ms. Mediana oznacza, że połowa pomiarów jest niższa, a połowa wyższa. Fizyka wyznacza więc dolną granicę, a resztę zmniejszają inżynierowie.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 2. Orbita geostacjonarna i orbita Starlinka narysowane w tej samej skali. Orbita niska niemal styka się z powierzchnią Ziemi

Bliskość przynosi jeszcze jedną korzyść, o której mówi się rzadziej. Moc sygnału rozkłada się na coraz większą powierzchnię i maleje z kwadratem odległości. Przy odległości 75 razy mniejszej ta sama wiązka daje na Ziemi około 5600 razy większą gęstość mocy ($75^2 \approx 5600$). W obie strony działa to podobnie: satelita łatwiej słyszy terminal, a terminal łatwiej słyszy satelitę. Dzięki temu antena użytkownika może być płaska, niewielka i zasilana małą mocą, a mimo to przenosić setki megabitów na sekundę.

Policz sam

Sygnał w drodze tam i z powrotem pokonuje cztery razy wysokość orbity h, więc jego czas podróży wynosi $t = 4 \cdot h / c$, gdzie $c \approx 300\,000$ km/s.

Orbita geostacjonarna:
$t = 4 \cdot 35\,786$ km $/ 300\,000$ km/s $\approx 0{,}477$ s,
czyli 477 ms.

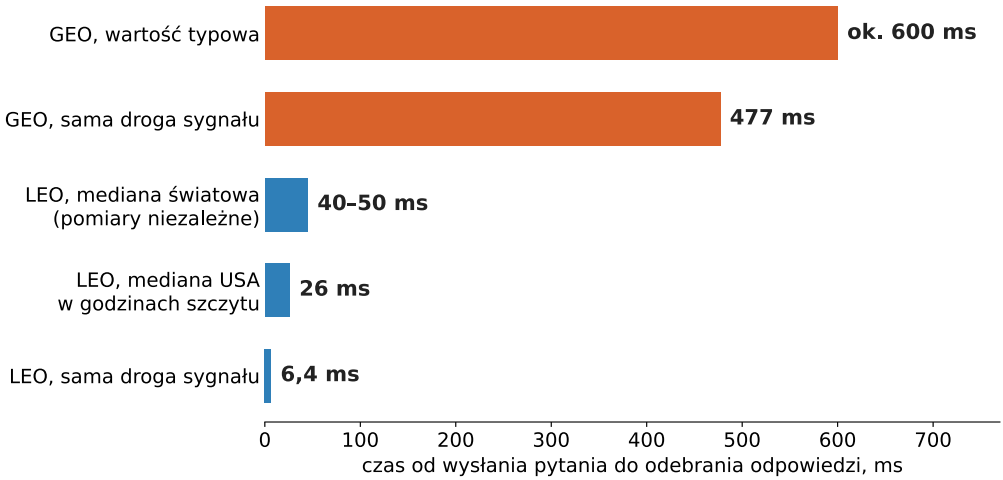
Orbita Starlinka:
$t = 4 \cdot 480$ km $/ 300\,000$ km/s $\approx 0{,}0064$ s,
czyli 6,4 ms.

Sprawdź teraz orbitę średnią MEO (*Medium Earth Orbit*) na wysokości 8000 km, z której korzystają satelity O3b firmy SES. Powinieneś otrzymać około 107 ms. Rachunek opisuje najlepszy możliwy przypadek, bo zakłada satelitę dokładnie nad terminalem i stacją naziemną.

Cena bliskości

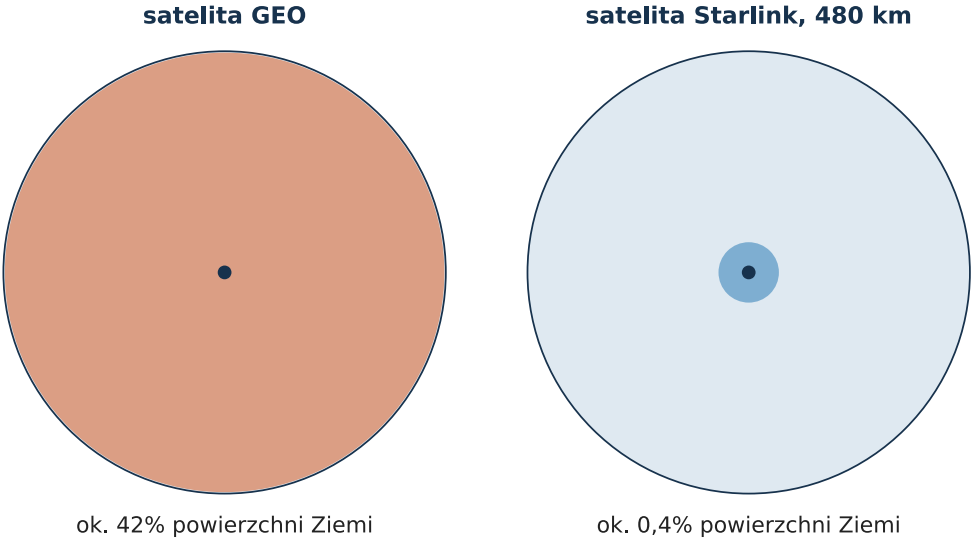
Fizyka nie daje jednak nic za darmo. Satelita na tej wysokości krąży z prędkością około 7,6 km/s, czyli ponad 27 tysięcy km/h, i okrąża Ziemię w 94 minuty. W listopadowym numerze podawaliśmy dla orbity niskiej zaokrągloną wartość 8 km/s. Dokładna prędkość zależy od wysokości i maleje w miarę oddalania się od Ziemi, dlatego satelita geostacjonarny leci już tylko z prędkością około 3,1 km/s. Starlink nie wisi więc nad nami, lecz przelatuje. Dla pojedynczego terminalu satelita pozostaje w polu pracy anteny najwyżej około czterech minut.

Satelita widzi też tylko mały fragment Ziemi. Terminal Starlink korzysta z satelitów położonych co najmniej około 25° nad horyzontem,



Rysunek 3. Opóźnienie w łączu satelitarnym. Pasek „sama droga sygnału” to wartość obliczona z prędkości światła, pozostałe paski pokazują wartości spotykane w praktyce

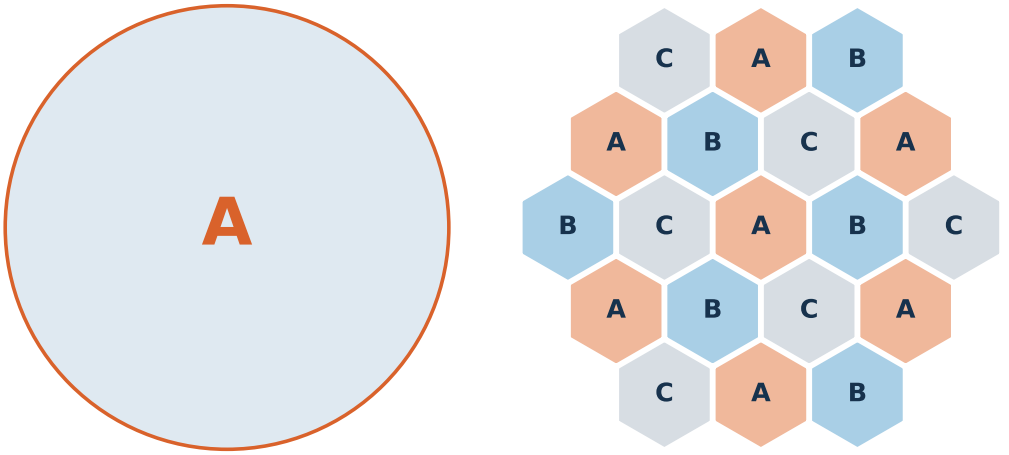
eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 4. Porównanie zasięgu satelitów. Satelita GEO widzi do horyzontu około 42% powierzchni Ziemi, a satelita Starlink przy kącie 25° nad horyzontem około 0,4%. Oba rysunki pokazują półkulę widzianą z kierunku satelity, dlatego plama GEO wydaje się obejmować prawie całą tarczę

bo nisko nad horyzontem sygnał biegnie dłuższą drogą i łatwo go zasłaniają przeszkody. Przy tym warunku satelita na wysokości 480 km obsługuje koło o promieniu około 840 km, czyli około 0,4% powierzchni Ziemi.

Gdyby takie koła dało się ułożyć na kuli bez zakładek, wystarczyłoby około 230 satelitów. Koła muszą jednak zachodzić na siebie, wszystkie przemieszczają się bez przerwy, a każdemu miejscu na Ziemi trzeba zapewnić następcę, zanim poprzedni satelita zniknie. Dlatego łączność na orbicie niskiej wymaga setek satelitów, a duża pojemność tysięcy. Na tym właśnie załamały się wcześniejsze próby. Amerykański system Iridium, złożony z 66 satelitów, uruchomiono w 1998 r., a rok później jego operator zbankrutował. Firma Teledesic, która planowała sieć internetową z setek satelitów, nigdy



Rysunek 5. Ponowne użycie częstotliwości. Litery A, B i C oznaczają trzy zakresy częstotliwości. Sąsiednie komórki różnią się zakresem, a dalsze mogą korzystać z tego samego

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

jej nie zbudowała. Brakowało taniego wynoszenia na orbitę, seryjnej produkcji satelitów i tanich anten, które potrafią śledzić szybko lecące obiekty bez ruchomych części. Te trzy bariery pokonano dopiero w ostatnim dziesięcioleciu.

Pojemność, czyli ile danych na głowę

Opóźnienie to dopiero połowa problemu. Druga połowa to pojemność, czyli ilość danych, jaką sieć może przesłać w ciągu sekundy. Zależy ona przede wszystkim od pasma, a więc szerokości zakresu częstotliwości, który operator ma do dyspozycji, oraz od liczby bitów, jakie udaje się upakować w każdym hercu tego pasma. Dla przykładu: kanał o paśmie 250 MHz przy 4 bitach na herc przenosi 1 Gb/s. Wiązkę satelity trzeba traktować jak wspólny pas ruchu. Jeśli jednocześnie korzysta z niej 100 aktywnych użytkowników, każdy dostanie średnio 10 Mb/s, a jeśli 1000 użytkowników, już tylko 1 Mb/s.

Pasma nie można dowolnie powiększać, bo częstotliwości są przydzielane przez państwa i organizacje międzynarodowe. Można natomiast używać tego samego pasma wiele razy w różnych miejscach. Tak działa telefonia komórkowa: obszar dzieli się na komórki, a sąsiednie komórki korzystają z innych częstotliwości, żeby sobie nie przeszkadzać. Dalsze komórki mogą już powtórzyć te same częstotliwości. Im mniejsze komórki i węższe wiązki, tym więcej razy pasmo zostaje wykorzystane na danym obszarze i tym większa jest pojemność całego systemu.

Z tego rozumowania wynika ważna właściwość Starlinka: pojemność jest przypisana do obszaru, a nie do całego świata. Nad oceanem albo pustkowiem niemal całe pasmo stoi niewykorzystane, a nad gęsto zaludnionym miastem bardzo szybko zaczyna go brakować. Dlatego satelitarny internet najlepiej sprawdza się tam, gdzie ludzi jest niewielu, a kabli nie ma lub zostały zniszczone. Tak wyglądają odległe farmy, statki na morzu i linia frontu.

Mamy już wszystkie wymagania. Satelity muszą lecieć nisko, musi być ich tysiące, wiązki muszą być wąskie, a anteny muszą śledzić satelity i przeskakiwać z jednego na drugiego bez przerywania połączenia. Ktoś musi też decydować, który terminal, z którym satelitą i kiedy ma się łączyć. Właśnie w tej ostatniej decyzji kryje się cała późniejsza władza nad systemem. ■

Umiałam żyć
Biografia Stefanii Grodzieńskiej
Emilia Padoł
Wydawnictwo: Marginesy, stron: 424, sugerowana cena: 99,90 zł

Stefania Grodzieńska – tancerka, aktorka, satyryczka i pisarka – przez niemal sto lat wielokrotnie układała swój świat od nowa. Kiedy historia odbierała jej ludzi, dom i poczucie bezpieczeństwa, ona potrafiła ocalić w sobie to, co najtrudniejsze – umiejętność życia. Dorastała między Moskwą, Berlinem, Łodzią, Warszawą i Paryżem, przed wojną tańczyła i występowała w kabaretach, w getcie warszawskim była jedną z najbardziej lubianych aktorek. Grała w skrajnie trudnych warunkach w Teatrze Femina, prowadzonym przez jej męża, Jerzego Jurandota. Po ucieczce ukrywała się, zmieniając nazwisko, adresy i zawody. W 1944 roku została pierwszą spikerką Polskiego Radia w Lublinie, później przez dekady należała do najpopularniejszych humorystek. Publiczność zapamiętała ją jako pierwszą damę polskiej satyry. Sama z tego tytułu najchętniej żartowała. *Umiałam żyć* to historia przetrwania, pełna miłości, pracy, sceny, przyjaźni, gór i śmiechu, który staje się podstawowym sposobem istnienia w świecie. To opowieść o kobiecie, która po Zagładzie i rozpadzie dawnej rzeczywistości nie pozwoliła, by cierpienie stało się jej jedyną tożsamością. Ale to również biografia pamięci, która łamie się i kruszeje. Emilia Padoł rekonstruuje życie Grodzieńskiej dzięki ogromnej kwerendzie archiwalnej i rozmowom z ludźmi, którzy ją znali. Z ocalałych śladów buduje gęstą, wieloplanową historię – wyczulona także na to, czego wciąż nie można opowiedzieć.



eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Droga jednego pakietu danych

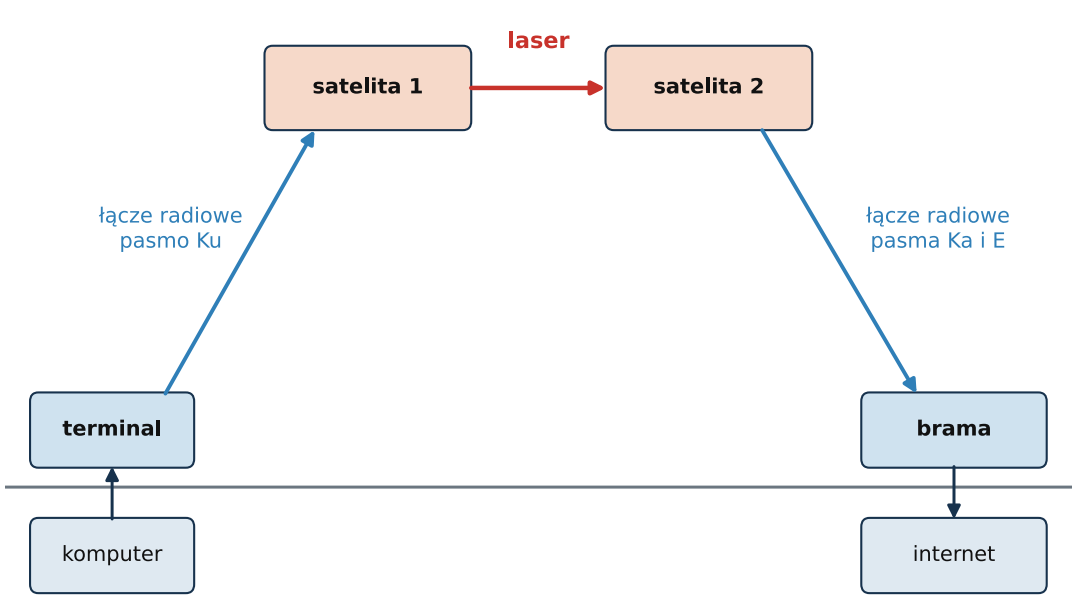
Wyobraźmy sobie dom w Bieszczadach, do którego nigdy nie dotarł światłowód. Jego mieszkaniec klika link. Komputer dzieli pytanie na pakiety, czyli krótkie porcje danych z adresem odbiorcy, i wysyła je przez domowy router do płaskiej anteny na dachu. Po ułamku sekundy odpowiedź wraca. Pomiędzy tymi chwilami pakiet przechodzi przez kilka urządzeń i łączy, a każde z nich rozwiązuje jeden z problemów opisanych w Elementarzu. Prześledźmy tę drogę krok po kroku. Jej ogólny przebieg pokazuje rysunek 6.

Powłoki nad naszymi głowami

Satelity Starlinka nie krążą bezładnie. Są ułożone w powłoki, czyli grupy satelitów lecących na zbliżonej wysokości i po orbitach nachylonych pod tym samym kątem do równika. Kąt ten nazywamy inklinacją. W każdej powłoce orbity tworzą płaszczyzny rozłożone równomiernie wokół Ziemi, jak obręcze globusa, a satelity lecą jeden za drugim. Pierwsza powłoka miała 72 płaszczyzny po 22 satelity i inklinację 53°.

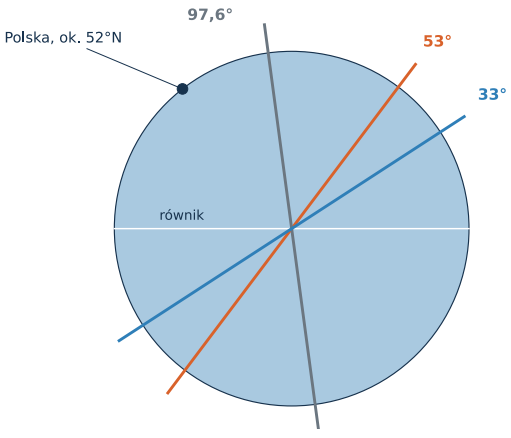
Inklinacja decyduje o tym, gdzie satelitów jest najwięcej. Satelita o inklinacji

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 6. Droga pakietu przez sieć Starlink. Dane mogą iść bezpośrednio z satelity do bramy albo przez jeden lub kilka satelitów połączonych laserami

53° dociera najdalej do 53. równoleżnika, a na skraju swojej trasy spędza najwięcej czasu, bo przechodzi tam z lotu na północ na lot na południe. W efekcie największe zagęszczenie satelitów wypada w pasie średnich szerokości geograficznych. Polska leży między 49. a 55. równoleżnikiem, więc ma bardzo dobre warunki. Podobnie Ukraina. Powłoki o inklinacji 33° i 43° wzmacniają sieć bliżej równika, a powłoki o inklinacji 70° i 97,6° obsługują okolice podbiegunowe.



Rysunek 7. Inklinacja trzech rodzajów orbit Starlinka, widok z boku. Orbita 53° sięga do szerokości geograficznej Polski, a orbita prawie biegunowa 97,6° przechodzi nad całą kulą ziemską

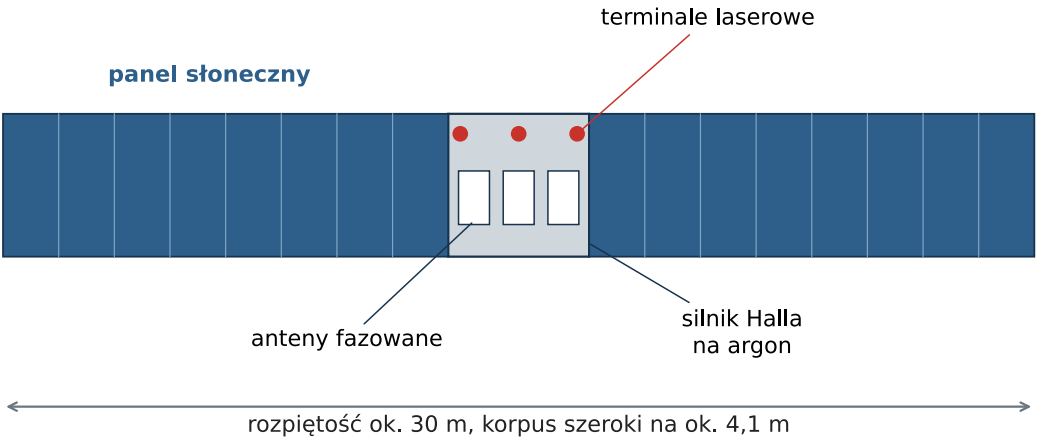
Sprawdźmy to prostym rachunkiem. Jeden satelita obsługuje około 0,43% powierzchni Ziemi (w Elementarzu zaokrągliliśmy to do 0,4%), a na początku listopada 2026 r. na orbicie pracowało około 11 200 satelitów. Średnio nad dowolnym punktem powinno ich więc być około 48. Pomiary zgadzają się z tym zaskakująco dobrze: między 56. równoleżnikiem północnym a południowym terminal ma zwykle w polu widzenia od 30 do 50 satelitów. To ważna rezerwa. Terminal nie jest skazany na jednego satelitę, a sieć ma z czego wybierać.

Satelita: seryjny router z panelem słonecznym

Większość pracującej dziś floty to satelity generacji V2 Mini. Każdy waży około 800 kg, ma korpus szeroki na około 4,1 m, a po rozłożeniu dwóch skrzydeł paneli słonecznych osiąga rozpiętość około 30 m. Łączna powierzchnia paneli wynosi około 116 m^2. SpaceX podaje, że pod względem obsługi użytkowników taki satelita ma cztery razy większą pojemność niż wcześniejsze modele.

Na pokładzie są cztery najważniejsze podzespoły. Anteny fazowane obsługują łączność z użytkownikami i tworzą wiele wąskich wiązek naraz. Inne anteny łączą satelitę ze stacjami naziemnymi. Terminale laserowe wymieniają dane z innymi satelitami. Komputer pokładowy i przełącznik kierują pakiety tam, gdzie mają trafić,

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 8. Uproszczony schemat satelity Starlink V2 Mini. Rozmieszczenie elementów ma charakter poglądowy

a więc satelita działa jak router, a nie jak zwykłe zwierciadło sygnału.

Satelita ma też silnik Halla. Jest to silnik elektryczny, w którym pole elektryczne rozpędza jony gazu do bardzo dużej prędkości. Ciąg jest mały, ale gazu zużywa się niewiele, a energia pochodzi z paneli. Pierwsze Starlinki używały kryptonu, a V2 Mini używają taniego i łatwo dostępnego argonu. Według SpaceX nowy silnik daje 2,4 razy większy ciąg i 1,5 raza większy impuls właściwy, czyli lepiej wykorzystuje każdy kilogram gazu. Silnik podnosi satelitę na orbitę roboczą, wykonuje manewry omijania i na końcu sprowadza satelitę w atmosferę.

Terminal: antena, która celuje bez ruchu

Terminal na dachu jest najmniej oczywistą częścią systemu. Satelita przelatuje po niebie w kilka minut, więc klasyczna antena talerzowa musiałaby go nieustannie śledzić, a potem błyskawicznie obracać się ku następnemu. Mechanika byłaby za wolna i zbyt zawodna. Standardowy terminal Starlinka jest więc płaską anteną z układem fazowanym: składa się z ponad tysiąca małych elementów antenowych sterowanych przez specjalizowane układy scalone.

Zasadą działania jest interferencja, czyli nakładanie się fal. Jeżeli wszystkie elementy nadają w tej samej fazie, ich fale wzmacniają się w kierunku prostopadłym do anteny, a wiązka biegnie prosto w górę. Jeśli każdy kolejny element nadaje z niewielkim przesunięciem fazy, wspólne czoło fali się przechyla i wiązka odchyla się w bok, choć sama antena stoi nieruchomo. Wystarczy zmienić przesunięcia elektronicznie, a wiązka przeskakuje na inny kierunek w czasie liczonym w mikrosekundach. Przy odbiorze działa to tak samo: antena „słucha” tylko z wybranego kierunku.

Tak sterowana antena ma jeszcze jedną cenną cechę. Wiązka jest wąska, więc terminal nadaje i odbiera głównie w stronę wybranego satelity. Właśnie dzięki temu terminal można zamontować na jadącym samochodzie, statku, samolocie lub dronie. Przydaje się to rolnikom i armatorom, ale także armiom.

Łącze użytkownika działa w paśmie Ku: od satelity do terminalu w zakresie 10,7...12,7 GHz, a od terminalu do satelity w zakresie 14,0...14,5 GHz. Według analizy Geoffa Hustona z organizacji APNIC (*Asia-Pacific Network Information Centre*), która przydziela adresy internetowe w regionie Azji i Pacyfiku, satelita ma do dyspozycji 2 GHz pasma w dół, podzielone na osiem kanałów po 250 MHz. Po-

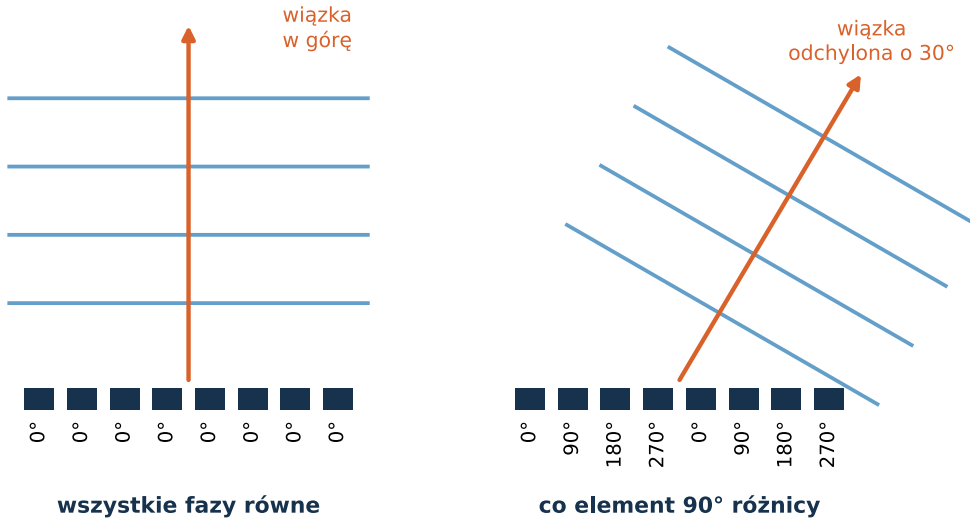
Policz sam

Kierunek wiązki wynika z różnicy fazy między sąsiednimi elementami: $\Delta\varphi = 360° \cdot d \cdot \sin\theta / \lambda$. Tutaj d to odległość między elementami, θ to kąt odchylenia wiązki, a λ to długość fali.

Dla częstotliwości 12 GHz długość fali wynosi λ = 300 000 km/s / 12 GHz = 25 mm. Przyjmijmy typowy odstęp elementów d = 12,5 mm, czyli pół długości fali, oraz kąt $\theta = 30°$.

Wówczas $\Delta\varphi = 360° \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 90°$. Jeden okres fali trwa 83 ps, więc takie przesunięcie odpowiada opóźnieniu zaledwie 21 ps. Z taką dokładnością czasową elektronika musi sterować każdym elementem z osobna.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



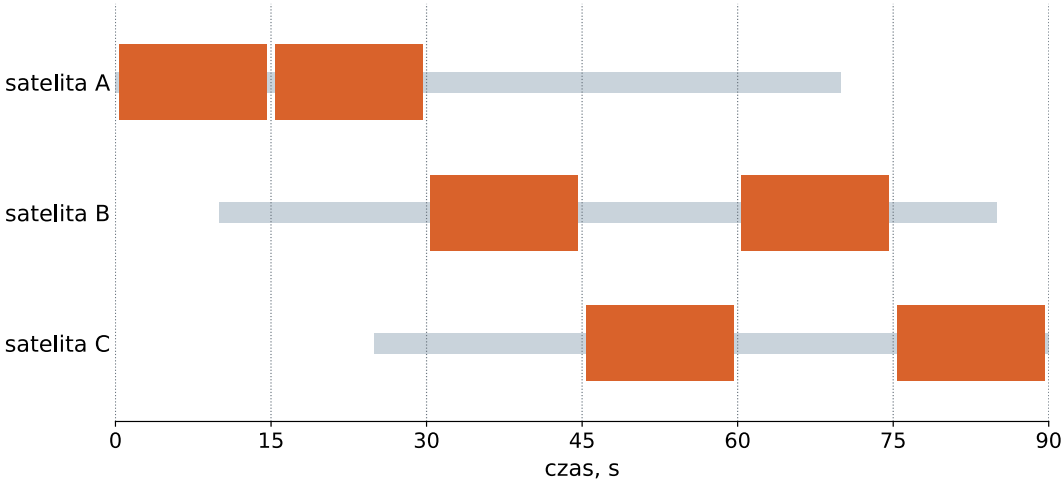
Rysunek 9. Sterowanie wiązką w antenie fazowanej. Przy jednakowych fazach wiązka biegnie prostopadle do anteny, a przy stałej różnicy fazy między elementami odchyla się. Liczby pod elementami to fazy nadawanego sygnał

jedyncza antena nadawcza tworzy osiem wiązek w dwóch polaryzacjach, a pełny satelita około 48 wiązek w dół i 16 w górę.

Piętnaście sekund na satelitę

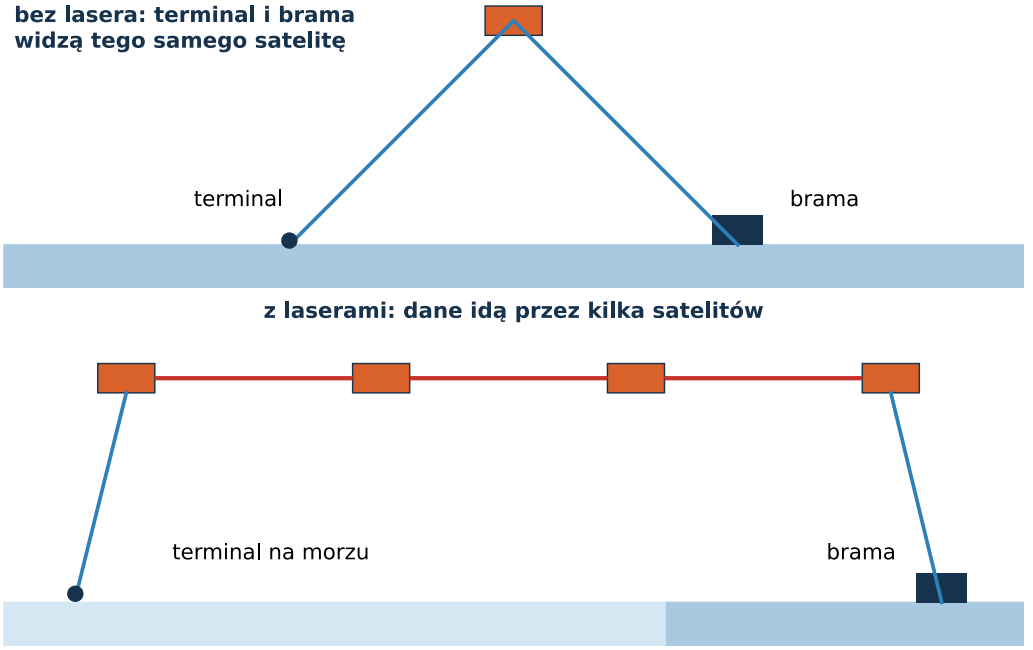
Terminal nie wybiera satelity sam dla siebie. Pomiary niezależnych badaczy pokazują wyraźny rytm: co 15 sekund sieć przydziela terminalowi satelitę na następny odcinek czasu. W każdym takim odcinku antena śledzi satelitę na łuku około 11°. Na granicach odcinków na ułamek sekundy rośnie opóźnienie i giną pojedyncze pakiety. Zwykły użytkownik tego nie zauważa, bo protokoły internetowe powtarzają zgubione dane.

Trzeba tu wyraźnie odróżnić dwie liczby. Satelita pozostaje w polu pracy anteny najwyżej około czterech minut, a przydział zmienia się co 15 sekund. Terminal nie musi więc zmieniać satelity z powodu geometrii aż tak często. Co 15 sekund sieć ma po prostu okazję rozłożyć obciążenie na nowo. Czasem terminal zostaje przy tym samym satelicie, a czasem dostaje innego, który akurat ma więcej wolnej pojemności albo lepszą drogę do bramy.



Rysunek 10. Przykładowy przydział satelitów do jednego terminalu. Szary pasek oznacza czas, w którym satelita jest widoczny, a pomarańczowy pasek 15-sekundowy odcinek, w którym sieć wybrała tego satelitę

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 11. Dwa sposoby dotarcia danych na Ziemię. U góry terminal i brama muszą widzieć tego samego satelitę, a u dołu lasery przenoszą dane nad obszarem bez bramy

Także wewnątrz takiego odcinka czas jest dzielony. Użytkownicy nie dostają własnych częstotliwości, lecz dzielą się kanałem w czasie. Według analizy APNIC satelita nadaje 750 ramek na sekundę, a każda ramka ma 302 odcinki, w których płyną dane poszczególnych terminali. To trochę jak bardzo szybki rozkład jazdy na jednym torze. Im więcej użytkowników w wiązce, tym dłużej każdy czeka na swoją kolej. Inżynierowie SpaceX wskazują właśnie ten mechanizm jako jedno ze źródeł opóźnienia.

Autostrada ze światła

Najprostszy sposób działania sieci to przekazanie pakietu przez satelitę od razu na Ziemię, do stacji zwanej bramą (*gateway*). Wymaga on jednak, by terminal i brama jednocześnie widziały tego samego satelitę, a więc leżały w praktyce nie dalej niż kilkaset kilometrów od siebie. Na środku oceanu albo tam, gdzie bramy nie można zbudować, ten sposób zawodzi.

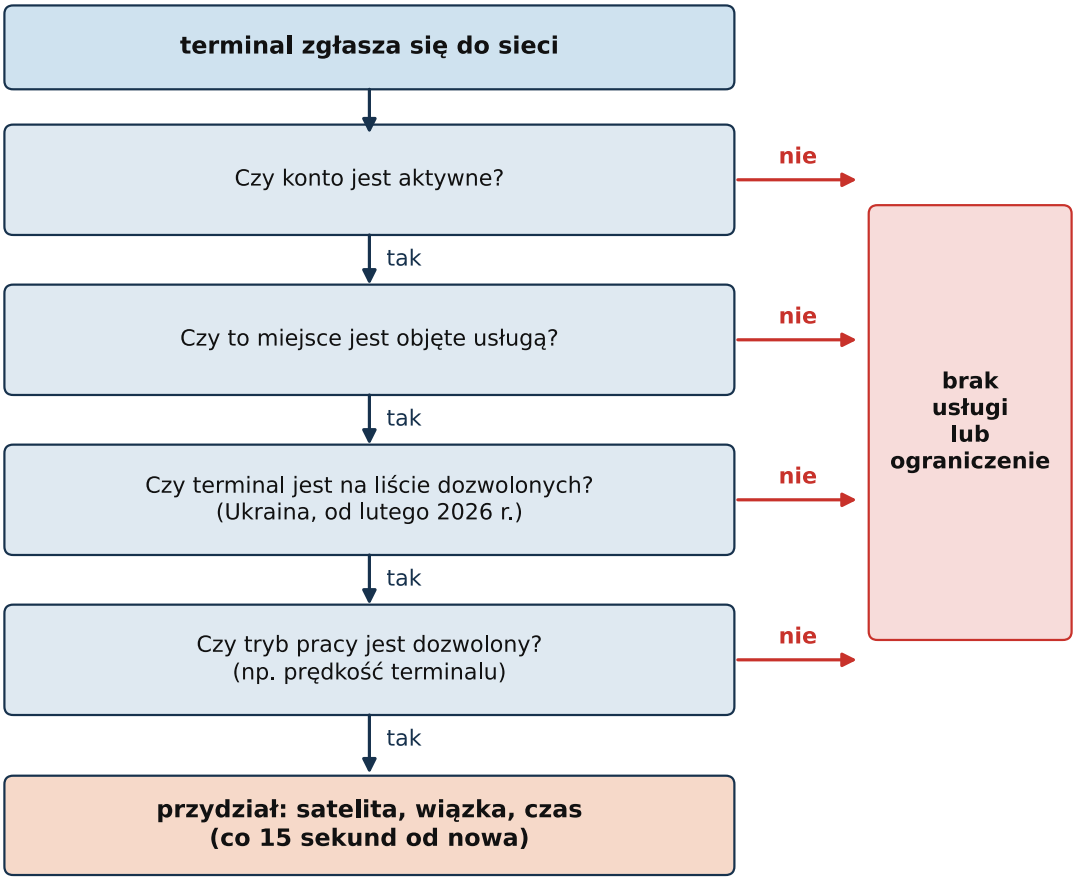
Rozwiązaniem są lasery. Satelity przesyłają sobie dane wiązką światła podczerwonego, więc w próżni tworzy się sieć łączy podobna do sieci światłowodów. Według danych przedstawionych przez SpaceX w 2024 r. w sieci pracowało około 9000 laserów, każdy o przepływności do 100 Gb/s, a laserami przesyłano łącznie ponad 42 petabajty danych na dobę. Jeden petabajt to milion gigabajtów. Światło biegnie w próżni o około połowę szybciej niż w szkle światłowodu, więc na bardzo długich trasach łącze laserowe może wygrać nawet z kablem podmorskim. Na krótkich trasach bywa odwrotnie: każdy dodatkowy satelita wydłuża drogę, dlatego sieć woli jak najkrótszą trasę do najbliższej bramy.

Lasery mają znaczenie wykraczające poza technikę. Dzięki nim terminal może działać tam, gdzie w pobliżu nie ma żadnej stacji operatora. Według analizy amerykańskiego ośrodka analitycznego CSIS (*Center for Strategic and International Studies*) SpaceX nie ma w Ukrainie znaczącej własnej infrastruktury. Ukraina korzysta więc z usługi, której kluczowe części znajdują się poza jej terytorium i poza jej kontrolą. Przeciwnik nie ma na miejscu stacji operatora, którą mógłby zbombardować, ale z tego samego powodu kraj korzystający z usługi nie ma czego przejąć ani czym zarządzać.

Brama, a potem zwykły internet

Pakiet schodzi z satelity do bramy, czyli stacji z dużymi antenami. Łącza z bramami korzystają z pasma Ka, a w nowszych satelitach

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 12. Pytania, na które sieć musi odpowiedzieć, zanim przydzieli terminalowi satelitę. Rysunek jest uproszczonym modelem, bo SpaceX nie publikuje szczegółów tego mechanizmu

także z pasma E, które ma więcej miejsca na dane. Brama przekazuje pakiet światłowodem do punktu dostępu PoP (*Point of Presence*), gdzie sieć Starlinka styka się z resztą internetu. Stamtąd pakiet biegnie już jak każdy inny do serwera, a odpowiedź wraca tą samą drogą.

Cała podróż w obie strony trwa zwykle kilkadziesiąt milisekund. Składa się na nią pięć elementów wymienianych przez SpaceX: czas biegu sygnału, dodatkowa droga po laserach, sieć naziemna, oczekiwanie na przydział czasu w wiązce oraz przetwarzanie i kolejki. Sam bieg sygnału to zwykle mniej niż 10 ms. Reszta to efekt obciążenia i rozwiązań sieciowych.

Kto układa ten rozkład jazdy

Doszliśmy do najważniejszego miejsca tego opisu. Na początku tego rozdziału pakiet trafił do anteny na dachu. Czy mógł z niej polecieć dalej samodzielnie? Nie. Terminal Starlinka nie jest niezależnym nadajnikiem, który sam nawiązuje łączność jak krótkofalowiec. Może wysłać dane tylko wtedy, gdy sieć przydzieli mu satelitę, wiązkę i czas. W przeciwnym razie miliony urządzeń zakłócałyby się nawzajem. Centralny rozkład jazdy nie jest więc dodatkiem do Starlinka, lecz warunkiem jego działania.

Żeby przydzielić wiązkę, sieć musi wiedzieć, gdzie terminal się znajduje, bo wiązka jest kierowana na konkretną komórkę. Musi też wiedzieć, do jakiego konta terminal należy, bo usługa jest płatna. Z tych dwóch potrzeb czysto technicznych i handlowych wynika możliwość, która na wojnie staje się władzą. Operator może odmówić usługi w wybranym obszarze, co nazywa się geofencingiem, czyli programowym wyznaczaniem granic działania. Może dopuścić tylko terminale z określonej listy. Może też wprowadzić

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



warunki dotyczące sposobu pracy terminalu, na przykład jego prędkości.

Nie są to rozważania teoretyczne. Podczas wojny w Ukrainie użyto wszystkich tych możliwości. W 2022 r. obowiązywało wyłączenie zasięgu w pasie 100 km od wybrzeża Krymu. W lutym 2026 r. wprowadzono w Ukrainie listę dozwolonych terminali i niezweryfikowane terminale przestały działać. W październiku 2026 r. terminale poruszające się szybciej niż około 160 km/h traciły łączność. Takie ograniczenia nie wymagają zmian w sprzęcie użytkownika ani nowych satelitów. Wystarczy zmiana reguł po stronie operatora.

Ten sam mechanizm wyjaśnia, dlaczego Starlink okazał się taki trudny do zastąpienia i tak niewygodny dla użytkowników państwowych. Zwykłe radio wojskowe należy do armii, która nim dysponuje. Terminal Starlinka należy do sieci, której armia nie kontroluje. Do tej różnicy wrócimy, gdy opiszemy wydarzenia na froncie.

Czego Starlink nie potrafi

Na koniec garść ograniczeń, bo system nie jest czarodziejski. Antena potrzebuje czystego widoku nieba, dlatego drzewa i budynki powodują przerwy, które terminal zgłasza jako przesłonięcie. Silny deszcz tłumi fale w paśmie Ku: w pomiarach przeprowadzonych w fińskim Oulu podczas opadów mediana przepływności spadła o około 38% w kierunku do użytkownika i o około 52% w kierunku od użytkownika, choć opóźnienie praktycznie się nie zmieniło. Pojemność dzieli się też na użytkowników w komórce, więc w miejscach bardzo zatłoczonych usługa zwalnia. Dobrze widać tu rachunek z Elementarza.

Starlink nie jest też odporny na zakłócanie, choć zakłócić go jest znacznie trudniej niż tradycyjne łącze. Wąskie wiązki terminalu ograniczają to, co antena odbiera spoza wybranego kierunku, a satelitów jest wiele. Silny zakłócacz ustawiony blisko terminalu nadal może jednak przerwać łączność. Dave Tremper, dyrektor do spraw walki elektronicznej w Pentagonie, opowiadał w kwietniu 2022 r., że gdy Rosjanie próbowali zakłócać Starlinka, SpaceX zareagował następnego dnia poprawką oprogramowania. Jest to najlepszy przykład przewagi sieci sterowanej programowo. Jej właściciel może zmienić działanie całego systemu w ciągu godzin, a to, jak się przekonamy, działa w obie strony.

Wiemy już, jak działa Starlink. Pozostaje pytanie, dlaczego udało się to dopiero SpaceX, skoro zasady znano od lat. Odpowiedź nie leży w antenach, lecz w fabryce i na wyrzutni. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Fabryka na orbitę: rakieta i produkcja seryjna

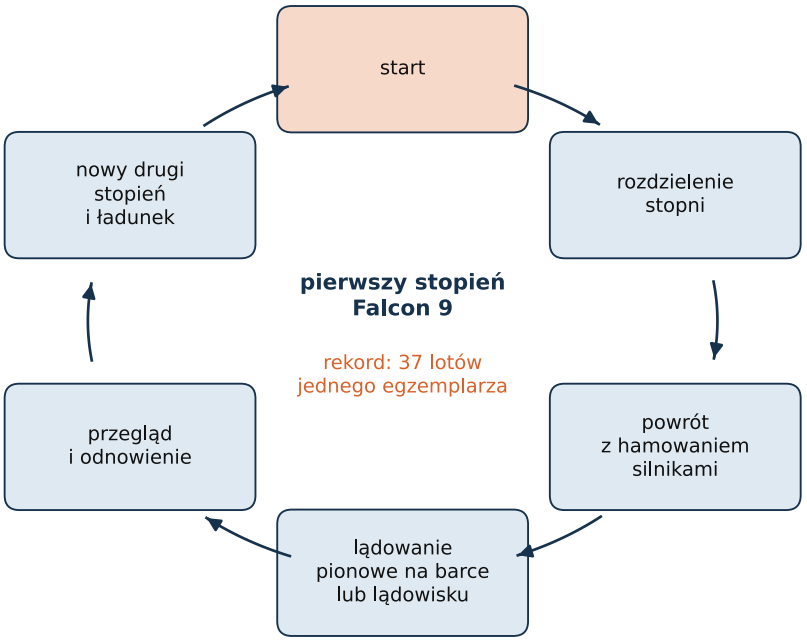
W Elementarzu wymieniliśmy trzy bariery, na których załamały się wcześniejsze próby budowy internetu na niskiej orbicie: brak taniego wynoszenia ładunków, brak seryjnej produkcji satelitów i brak tanich anten, które śledzą szybko lecące satelity. SpaceX pokonał wszystkie trzy, ale nie dzięki jednemu przełomowemu wynalazkowi. Zbudował raczej przedsiębiorstwo, w którym rakiety, satelity i terminale wytwarza się jak produkty przemysłowe, a każda z tych części napędza pozostałe.

Rakieta, która wraca

Przez ponad pół wieku rakiety nośne wyrzucano po jednym użyciu. Wyglądało to tak, jakby po każdym locie z Warszawy do Nowego Jorku samolot rozbijano o ocean. Amerykański wahadłowiec Space Shuttle miał to zmienić, ale jego remont między lotami okazał się tak pracochłonny, że oszczędności nie przyszły. Harry Jones z ośrodka Ames amerykańskiej agencji kosmicznej NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) obliczył, że wyniesienie kilograma ładunku na niską orbitę wahadłowcem kosztowało około 54 500 dolarów. Według cennika SpaceX z 2018 r. ta sama usługa na rakiecie Falcon 9 kosztowała około 2720 dolarów za kilogram, czyli dwadzieścia razy mniej.

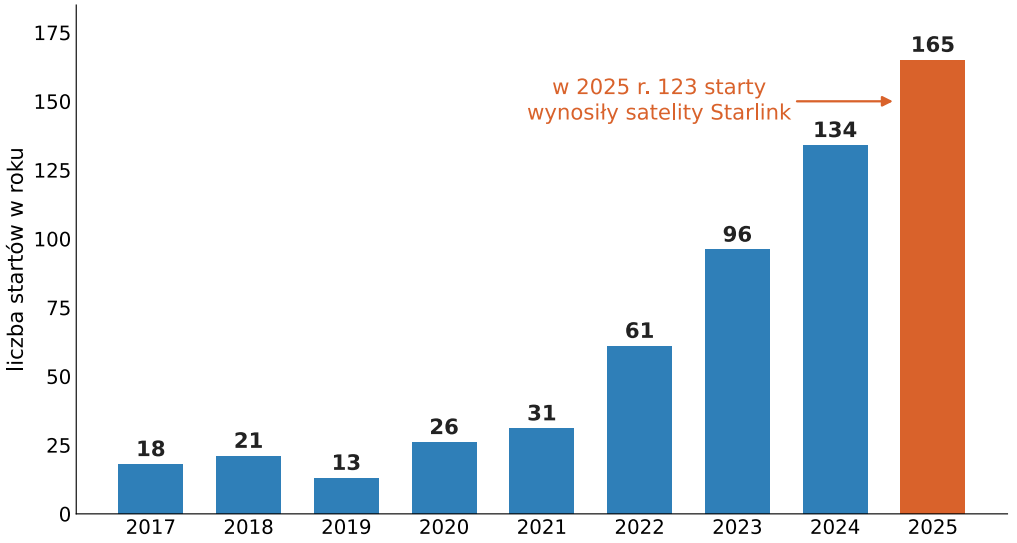
Pierwszy stopień rakiety Falcon 9 nie spada do oceanu. Po rozdzieleniu stopni zawraca,

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 13. Cykl życia pierwszego stopnia rakiety Falcon 9. Przy każdym starcie odzyskany pierwszy stopień dostaje nowy drugi stopień i nowy ładunek

hamuje własnymi silnikami i ląduje pionowo na barce na morzu albo na lądowisku niedaleko miejsca startu. Po przeglądzie leci ponownie. Rekordowy egzemplarz, oznaczony B1067, wystartował 25 sierpnia 2026 r. po raz 37. W dokumentach z 2026 r. SpaceX podaje, że pierwszy stopień zaprojektowano i sprawdzono dla nawet 40 lotów. Do połowy października 2026 r. pierwsze stopnie rakiet Falcon wylądowały 667 razy w 680 próbach. Drugi stopień nadal przepada przy każdym starcie, ale z morza wyławia się osłony ładunku, czyli owiewki chroniące satelity podczas lotu przez atmosferę.



Rysunek 14. Liczba startów rakiet Falcon 9 i Falcon Heavy w kolejnych latach. Gwałtowny wzrost od 2022 r. zbiega się z budową sieci Starlink

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Najlepszy klient: własna sieć

Rakieta wielokrotnego użytku opłaca się tylko wtedy, gdy często lata. Starlink zapewnił rakietom SpaceX stałe zajęcie. W 2025 r. Falcon 9 wystartował 165 razy, a 123 z tych startów wynosiły satelity Starlink. W tym jednym roku na orbitę trafiło ponad 3000 satelitów tej sieci. Na całym świecie przeprowadzono wtedy 324 próby startów orbitalnych, więc SpaceX odpowiadał za ponad połowę z nich, a sama sieć Starlink za ponad jedną trzecią.

Tak powstało koło, które napędza się samo. Starlink daje rakietom pracę. Częste starty zamieniają odzysk i remont stopni w rutynę, więc koszt startu maleje. Tani start pozwala wynosić tysiące satelitów, a większa sieć przynosi więcej pieniędzy. Według dokumentów, które SpaceX złożył w 2026 r. przed wejściem na giełdę, Starlink przyniósł w 2025 r. 11,4 mld dolarów przychodu, czyli 61% wszystkich przychodów firmy. Z tych pieniędzy finansowane są także nowe rakiety. Konkurent, który chce zbudować podobną sieć, musi kupować starty po cenach rynkowych. Amazon, budujący sieć Amazon Leo, kupił część startów nawet u SpaceX, czyli u swojego głównego rywala.

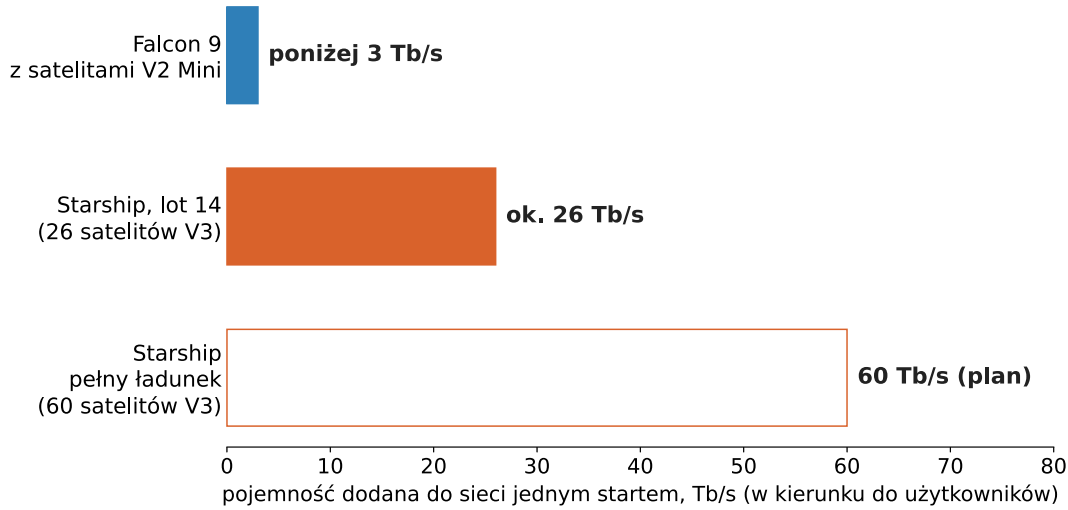
Satelita jak samochód z taśmy

Klasyczny satelita telekomunikacyjny na orbicie geostacjonarnej to egzemplarz jedyny w swoim rodzaju. Buduje się go latami i projektuje na kilkanaście lat pracy, bo wymiana jest bardzo droga. SpaceX odwrócił to podejście. Według tych samych dokumentów giełdowych fabryka w Redmond w stanie Waszyngton wytwarzała od grudnia 2025 r. do kwietnia 2026 r. średnio około 70 satelitów tygodniowo, czyli dziesięć dziennie. Satelity są płaskie i układa się je pod owiewką rakiety jeden na drugim, jak talię kart. Falcon 9 zabiera ich zwykle od 20 do 30. Każdy pracuje kilka lat, a potem sam schodzi z orbity i spala się w atmosferze. Krótki czas życia nie jest więc wadą konstrukcji, lecz założeniem projektu: sieć jest stale odnawiana i za każdym razem dostaje nowocześniejszy sprzęt.

Tak samo pokonano trzecią barierę, czyli koszt anten. W marcu 2025 r. fabryka w Bastrop w Teksasie produkowała 15 tysięcy zestawów dla użytkowników dziennie. Antena fazowana, której działanie opisaliśmy przy drodze pakietu danych, przestała być sprzętem wojskowym o astronomicznej cenie i stała się produktem masowym. To właśnie ta zmiana pozwoliła później wysłać do Ukrainy tysiące terminali w ciągu kilku tygodni.

Starship: następny skok

Falcon 9 ma jednak granice. Satelity muszą zmieścić się pod jego owiewką i nie mogą być zbyt ciężkie. Kolejna generacja satelitów, V3, jest na tę rakietę za duża. Zabierze je Starship, największa rakieta w historii, której oba stopnie mają być wielokrotnego użytku. 28 września 2026 r., podczas 14. lotu testowego, Starship



Rysunek 15. Pojemność dodawana do sieci przez jeden start. Starship z pełnym ładunkiem 60 satelitów V3 ma dodawać ponad dwadzieścia razy więcej niż Falcon 9 z satelitami V2 Mini

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



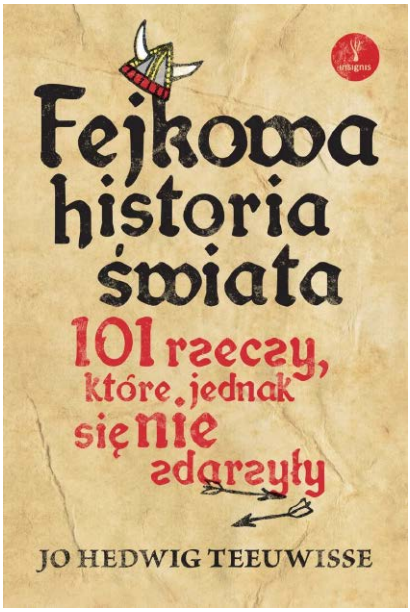
po raz pierwszy wszedł na orbitę i wypuścił 26 satelitów V3. Każdy z nich ma przesyłać do użytkowników około 1 Tb/s, czyli około dziesięć razy więcej niż satelita V2 Mini. Lot nie przebiegł bez problemów. Podczas wznoszenia górny stopień, nazywany statkiem (ang. *Ship*), stracił jeden silnik, dlatego SpaceX skrócił misję i po około trzech godzinach sprowadził go do Oceanu Spokojnego.

Pełny Starship ma zabierać 60 satelitów V3 i dodawać przy każdym starcie około 60 Tb/s pojemności. Według SpaceX to ponad dwadzieścia razy więcej niż start rakiety Falcon 9 z satelitami V2 Mini. Starship pozostaje jednak pojazdem testowym. Pełny odzysk statku, który ma go uczynić naprawdę tanim, wciąż jest przed nim.

Według zestawienia astronoma Jonathana McDowella z Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics do początku listopada 2026 r. wystrzelono 13 096 satelitów Starlink, a pracowało około 11 200. To większość wszystkich czynnych satelitów na orbicie okołoziemskiej. Żadne państwo ani żadna inna firma nie ma dziś zarazem tanich rakiet wielokrotnego użytku, fabryki satelitów i fabryki terminali. Ta przewaga przemysłowa jest prawdziwym źródłem pozycji, którą opiszemy w dalszej części. Zanim jednak dojdziemy do wojny, zobaczmy, do czego Starlink służy na co dzień. ■

Fejkowa historia świata. 101 rzeczy, które jednak się nie zdarzyły
Jo Hedwig Teeuwise
Wydawnictwo: Insignis, stron: 486, sugerowana cena: 39,99 zł

UWAGA! Fake newsy o przeszłości tworzą fejkową historię świata! Czy Hugo Boss naprawdę zaprojektował mundury nazistów? Czy ludzie w średniowieczu myśleli, że Ziemia jest płaska? Czy Napoleon rzeczywiście odstrzelił nos Sfinksowi? [Spoiler] Na wszystkie te pytania odpowiedź brzmi: NIE. Od słynnego „niech jedzą ciastka" Marii Antoniny po rogate hełmy wikingów – historyczne fejki są od dawna obecne w naszej popkulturze. A teraz – w dobie AI i mediów społecznościowych – odróżnienie prawdy od zmyśleń staje się trudniejsze niż kiedykolwiek. Na szczęście z pomocą przychodzi Jo Hedwig Teeuwisse, historyczka znana jako The Fake History Hunter, która postawiła sobie za cel tropienie historycznych przekłamań i przywracanie prawdzie należnego jej miejsca. W swojej fascynującej książce obala 101 popularnych „faktów" z przeszłości. Dzięki niej nie tylko poznacie historię od zupełnie nowej strony, ale także zabłyśniecie przed znajomymi, obalając niejeden mit, nauczycie się, jak wykrywać historyczne fejki, a przy tym będziecie świetnie się bawić!



eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Starlink w cywilu: od farmy do telefonu

Zanim zajmiemy się wojną, trzeba pamiętać, że Starlink jest przede wszystkim usługą komercyjną. Na koniec września 2026 r. miał według sprawozdania SpaceX za trzeci kwartał 13,6 mln klientów indywidualnych w 174 krajach i na innych rynkach. W samym trzecim kwartale przybyło ich 1,6 mln. Jeszcze pod koniec 2022 r. klientów był milion.

Kto płaci za internet z kosmosu

Najliczniejszą grupą klientów są mieszkańcy miejsc, do których nie dociera kabel ani światłowód: odległych gospodarstw, wsi w górach, domów letniskowych i schronisk. Dla operatora kablowego poprowadzenie światłowodu do pojedynczego domu kilka kilometrów od najbliższej sieci jest nieopłacalne. Starlink potrzebuje tylko anteny i zasilania. W miastach Starlink zwykle przegrywa ze światłowodem pod względem ceny i szybkości, a do tego, jak pokazaliśmy w Elementarzu, pojemność wiązki dzieli się na wszystkich użytkowników w komórce.

Model biznesowy jest prosty: klient kupuje lub wynajmuje zestaw z anteną i routerem, a potem płaci miesięczny abonament. Ceny zmieniają się często, nawet kilka razy w roku. **Tabela 1** pokazuje cennik z lipca 2026 r.

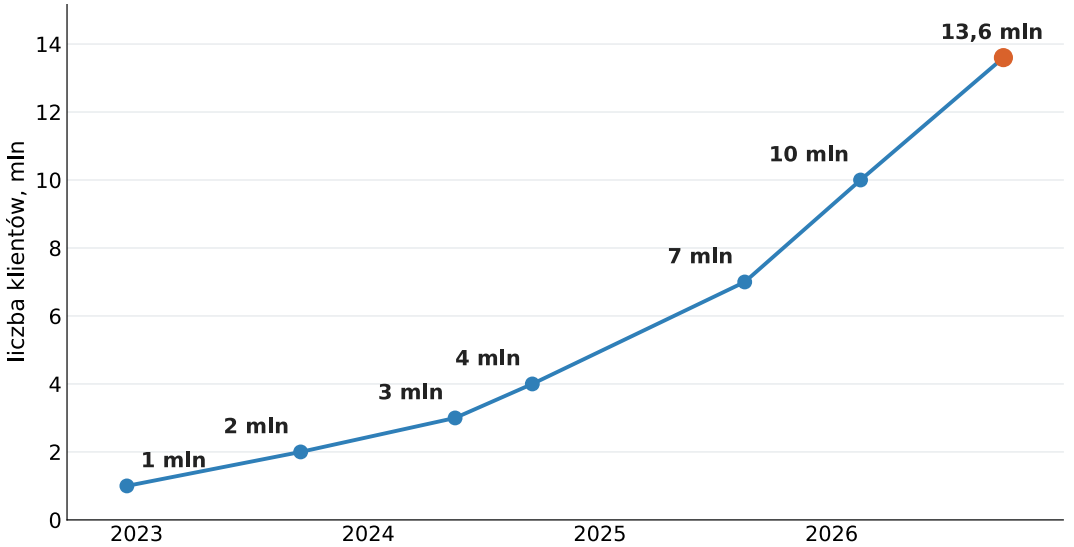
W ruchu: samoloty, statki, samochody

Antena fazowana, opisana przy drodze pakietu danych, celuje w satelitę bez ruchomych

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Tabela 1. Ceny Starlinka w Polsce według stanu z lipca 2026 r. Do każdego planu dochodzi jednorazowa opłata aktywacyjna 101 zł

Usługa	Abonament miesięczny	Zestaw
W domu, do 100 Mb/s (zestaw Mini X)	135 zł	Mini X
W domu, do 200 Mb/s (zestaw Standard)	190 zł	Standard
W domu, Max, bez ograniczenia prędkości	265 zł	Standard
W drodze, 100 GB danych	185 zł	Mini za 869 zł lub Standard za 1499 zł
W drodze, bez limitu danych	460 zł	Mini za 869 zł lub Standard za 1499 zł



Rysunek 16. Liczba klientów Starlinka. Punkty oznaczają kolejne progi ogłaszane przez SpaceX. Ostatni punkt to stan na 30 września 2026 r.

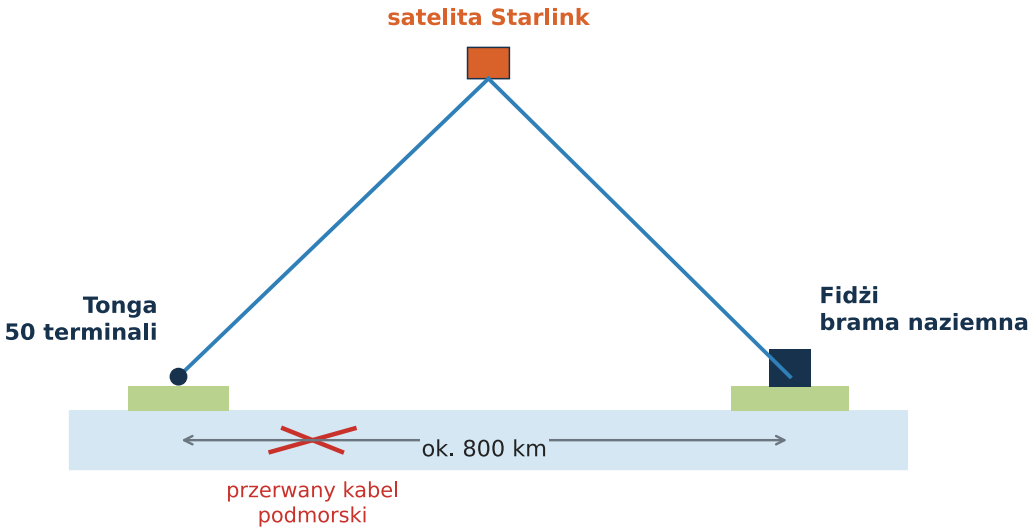
części, więc dobrze znosi jazdę, kołysanie i lot. Według zestawienia z lutego 2026 r. Starlink był dostępny lub czekał na montaż w ponad 5700 samolotach pasażerskich, czyli w około 19% czynnych samolotów komercyjnych, oraz w ponad tysiącu samolotów biznesowych. Z tej samej usługi korzystają statki, platformy wiertnicze, autobusy i kampery. Plany mobilne z tabeli 1 są przeznaczone właśnie do takich zastosowań.

Gdy kabel milknie

Najbardziej przekonujące są przykłady katastrof. 15 stycznia 2022 r. wybuchł podmorski wulkan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai. Erupcja przerwała jedyny podmorski światłowód łączący Tonga ze światem i odcięła od internetu ponad 100 tysięcy mieszkańców. SpaceX uruchomił tymczasową bramę naziemną na Fidżi, około 800 km dalej, i dostarczył na Tonga 50 terminali. Zaczęły działać 23 lutego, po prawie sześciu tygodniach bez łączności z zagranicą. Według SpaceX w lipcu 2021 r., podczas powodzi w Niemczech, firma dostarczyła 100 terminali w ciągu 48 godzin. Połowa trafiła do straży pożarnych, szpitali i ekip ratowniczych, a połowa posłużyła mieszkańcom jako publiczne punkty dostępu do internetu.

Przykład Tonga dobrze pokazuje zasady opisane przy drodze pakietu danych. Terminal na wyspie i brama na Fidżi musiały jednocześnie widzieć tego samego satelitę. Odległość około 800 km była na granicy możliwości, dlatego, jak przyznał sam Musk, usługa działała nierówno. Eksperci cytowani przez „Scientific American" przypominali też o ograniczeniach. Ilan Kelman z University College London zauważał, że prywatna firma może w każdej chwili podnieść cenę albo wycofać usługę. Nicole Starosielski, badaczka podmorskich kabli, przypominała, że tam, gdzie kabel jest dostępny, wybiera się go przed satelitą. Starlink okazał się więc doskonałym łączem

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



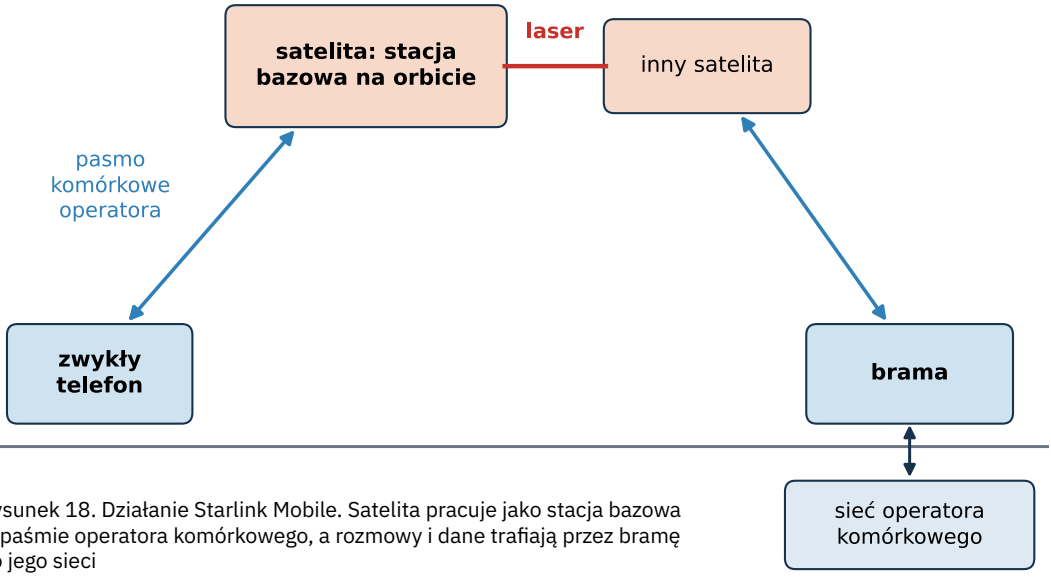
Rysunek 17. Łączność dla Tonga w 2022 r. Terminal i brama musiały widzieć tego samego satelitę, choć dzieliło je około 800 km

zapasowym, ale nie zastąpił infrastruktury, nad którą państwo ma kontrolę. Tę samą lekcję w następnych latach odrobiła Ukraina.

Telefon bez anteny na dachu: Starlink Mobile

Najnowsza część systemu nie wymaga żadnej anteny. Starlink Mobile, wcześniej nazywany Direct to Cell, to grupa ponad 650 satelitów Starlink z dodatkowym wyposażeniem do łączności z telefonami, wyniesiona w 18 miesięcy. Są one wliczone w podaną wcześniej liczbę satelitów Starlink. Każdy z tych satelitów działa jak stacja bazowa telefonii komórkowej zawieszona na orbicie. Łączy się ze zwykłym, niezmodyfikowanym telefonem w paśmie, które udostępnia partner, czyli naziemny operator komórkowy. W USA tym partnerem jest T-Mobile, a usługa nazywa się T-Satellite.

Telefon ma małą antenę, która nadaje we wszystkich kierunkach i z niewielką mocą. Sygnał, który dociera z niego na orbitę, jest



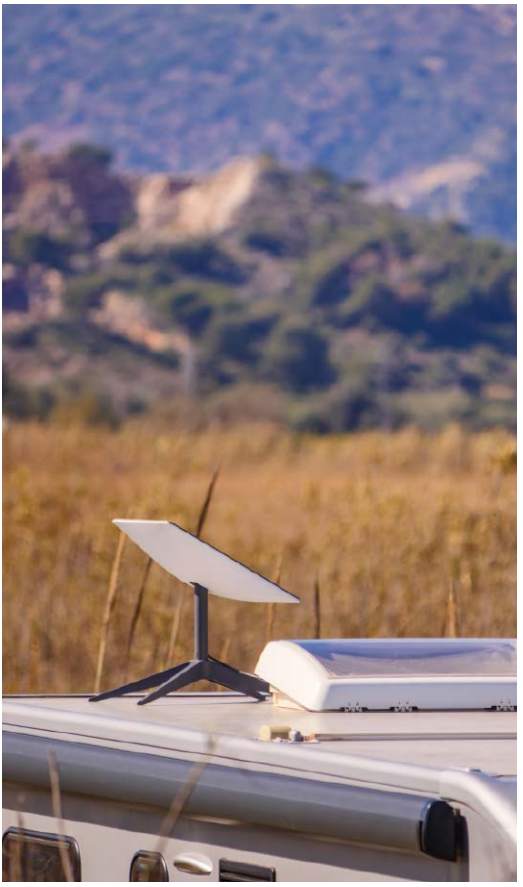
Rysunek 18. Działanie Starlink Mobile. Satelita pracuje jako stacja bazowa w paśmie operatora komórkowego, a rozmowy i dane trafiają przez bramę do jego sieci

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

więc bardzo słaby. Większość pracy musi wykonać satelita, który ma dużą antenę fazowaną i potrafi „nasłuchiwać” wąską wiązką. Dlatego usługa zaczęła się od wiadomości tekstowych, potem doszły proste dane, a SpaceX pokazał już rozmowy głosowe i wideo. W Ukrainie operator Kyivstar w około dwa miesiące od uruchomienia usługi miał około 3 mln abonentów korzystających z łączności satelitarnej. Według SpaceX z satelitów Starlink Mobile skorzystało już przynajmniej raz ponad 12 mln osób.

Następna generacja ma działać na częstotliwościach, które SpaceX kupił w 2025 r. od amerykańskiej firmy EchoStar. Satelity drugiej generacji mają dawać około 20 razy większą przepływność niż obecne, a usługa w USA ma ruszyć w połowie 2027 r. W Europie pierwszym partnerem tej generacji ma być Deutsche Telekom. Jeśli te plany się powiodą, telefon stanie się kolejnym terminalem sieci, którą zarządza jedna firma.

Wszystkie cywilne zalety Starlinka, czyli praca w ruchu, niezależność od lokalnej infrastruktury i szybkie uruchomienie w dowolnym miejscu, okazały się dokładnie tym, czego potrzebuje armia walcząca na rozległym froncie. Tam też najwyraźniej widać, co oznacza zależność od jednego operatora. ■



REKLAMA

Młody Technik – wydania archiwalne



www.UlubionyKiosk.pl

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Wojna na łączu: co Starlink zmienił na froncie

Linia frontu w Ukrainie ma ponad tysiąc kilometrów. Wzdłuż niej i daleko w głąb kraju rosyjskie rakiety i drony od lat niszczą maszty telefonii komórkowej, przekaźniki radiowe, centrale telekomunikacyjne i elektrownie. Tradycyjną łączność radiową wojska zakłóca walka elektroniczna przeciwnika. W tych warunkach płaska antena, którą jeden człowiek ustawia w kilka minut i która nie potrzebuje żadnej infrastruktury w okolicy, stała się jednym z najważniejszych narzędzi tej wojny. W tym rozdziale opisujemy, do czego służy, dlaczego tak trudno ją wyłączyć z zewnątrz i kto za nią płaci. Szczegóły operacyjne celowo pomijamy, bo w MT piszemy o technice, a nie o taktyce.

Od szpitala do okopu

Starlink od początku służył w Ukrainie nie tylko wojsku. Według opracowania Belfer Center z Uniwersytetu Harvarda już w maju 2022 r. korzystało z niego codziennie ponad 150 tysięcy Ukraińców, w tym urzędy i zwykli mieszkańcy. W styczniu 2023 r. ukraińskie Ministerstwo Transformacji Cyfrowej informowało, że zdobyło łącznie, ze wszystkich źródeł, prawie 30 tysięcy terminali, w tym partię 8000 sztuk z Polski. Duża część trafiła do tzw. punktów niezłomności. Są to ogrzewane miejsca, w których podczas wyłączeń prądu po rosyjskich atakach na energetykę można zadzwonić do bliskich, wezwać karetkę albo popracować. Terminale zapewniały łączność szpitalom, szkołom, służbom energetycznym i pomocy społecznej, a technikom

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

telekomunikacji pomagały odbudowywać sieci na odzyskanych terenach.

W wojsku Starlink stał się podstawą łączności na wielu poziomach: od sztabów po pojedyncze pododdziały piechoty. Przez tę sieć przesyła się meldunki, obraz z rozpoznania, dane o położeniu własnych sił i przeciwnika oraz obraz z kamer dronów. Wiele jednostek kupuje terminale samodzielnie albo dostaje je od wolontariuszy, a każdy terminal musi być wpisany do rejestru ukraińskiego ministerstwa obrony. Według George'a Barrosa z amerykańskiego Institute for the Study of War z łączności Starlink korzystają także drony przechwytujące, które zwalczają rosyjskie drony odrzutowe, oraz drony uderzające w zaplecze przeciwnika 40...150 km za linią frontu.

Wróćmy na chwilę do Elementarza. Pilot drona, który ma do dyspozycji łącze z opóźnieniem 0,6 s, nie trafi w ruchomy cel. Przy opóźnieniu kilkudziesięciu milisekund, jakie daje niska orbita, sterowanie dronem z odległości setek kilometrów staje się możliwe. To nie przypadek, że Starlink tak szybko wszedł do arsenału dronów. Jego najważniejsza zaleta techniczna, czyli małe opóźnienie, odpowiada dokładnie najważniejszej potrzebie tego rodzaju walki.

Antena w plecaku

Wojna przyspieszyła też rozwój samego sprzętu. W czerwcu 2024 r. SpaceX wprowadził terminal Starlink Mini. Antena waży około 1,1 kg, po złożeniu mieści się w plecaku, a średnio pobiera 25...40 W mocy. Można ją zasilać napięciem stałym 12...48 V, na przykład z instalacji samochodu, albo przez złącze USB-C z powerbanku o mocy co najmniej 100 W. Terminal, który wcześniej wymagał stałego zasilania z sieci, stał się wyposażeniem pojedynczego żołnierza, pojazdu, a nawet drona.

Broń czy usługa?

Od początku nie było jasne, do czego wolno używać Starlinka na wojnie. W listopadzie 2022 r. wicepremier Ukrainy Olha Stefaniszyna nazywała go „sygnałem życia" dla Ukraińców, ale przyznawała, że niepokoi ją nieprzewidywalność Muska, i zapowiadała szukanie alternatyw. 8 lutego 2023 r. prezes SpaceX Gwynne Shotwell powiedziała, że firma z zadowoleniem zapewnia Ukrainie łączność, ale usługa nigdy nie miała służyć jako broń. Dodała, że SpaceX podjął kroki, aby Ukraina nie mogła używać Starlinka do sterowania uzbrojonymi dronami. Jakie to były kroki, firma nie ujawniła. Według Belfer Center SpaceX wcześniej przez prawie rok tolerował takie użycie.

Granica między użyciem „obronnym" a „ofensywnym" okazała się w praktyce płynna. Dron, który przechwytuje rosyjskiego drona nad ukraińskim miastem, służy obronie. Dron, który uderza w zaplecze przeciwnika za linią frontu, również służy obronie kraju napadniętego, choć atakuje. Jak pisaliśmy wyżej, w 2026 r. Starlink obsługiwał już oba rodzaje dronów. Najważniejsze jest jednak co innego. O tym, gdzie przebiega granica, nie decydowała ani Ukraina, ani żadna organizacja międzynarodowa, lecz prywatna firma, a później także rząd USA.

Dlaczego tak trudno go wyłączyć

Rysunek 19 porównuje tradycyjną łączność ze Starlinkiem z punktu widzenia przeciwnika, który chce ją przerwać. Tradycyjna sieć ma na miejscu maszty, przekaźniki, światłowody i centrale, które można zniszczyć rakietą lub dronem. Satelita geostacjonarny jest pojedynczym obiektem, a atak na KA-SAT pokazał, że do unieszkodliwienia usługi wystarczy włamanie do naziemnego systemu zarządzania. Starlink nie ma takiego słabego punktu na terytorium Ukrainy. Satelitów są tysiące, więc utrata kilku nic nie zmienia, a zestrzelenie choćby jednego zrobiłoby z orbity pole odłamków groźnych dla wszystkich, w tym dla satelitów napastnika. Bramy naziemne i lasery

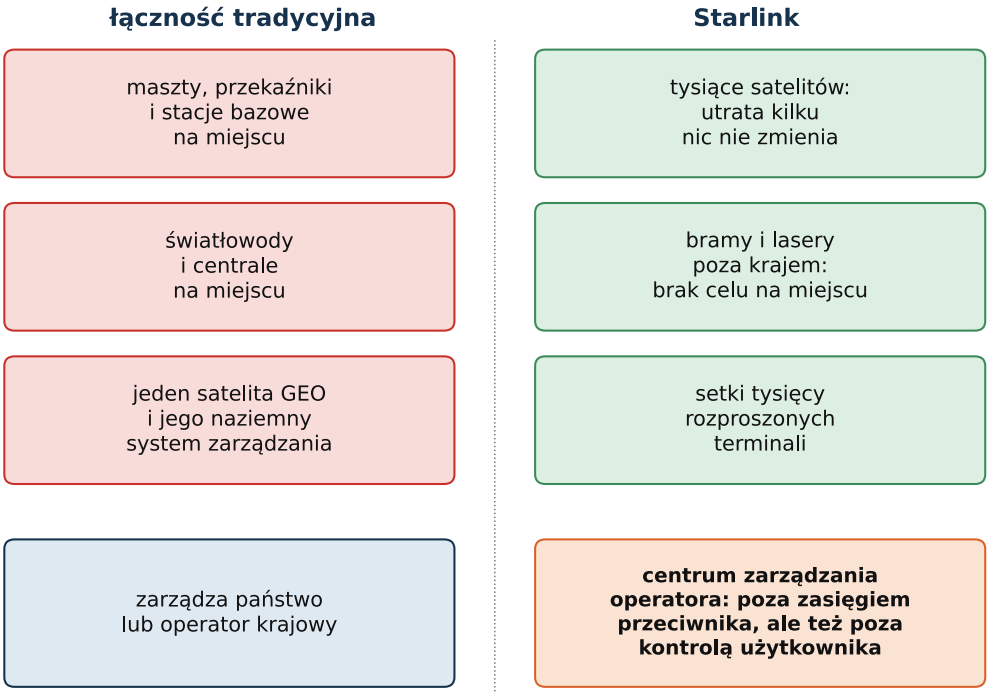
Policz sam

Ile godzin popracuje terminal Starlink Mini z jednego źródła energii? Czas pracy t = E / P, gdzie E to energia zgromadzona w źródle, a P to pobierana moc. Przyjmijmy średnią moc P = 30 W.

Powerbank o pojemności 100 Wh:
t = 100 Wh / 30 W ≈ 3,3 h.

Akumulator samochodowy 12 V o pojemności 60 Ah zgromadzi E = 12 V · 60 Ah = 720 Wh. Akumulatora kwasowego nie należy jednak rozładowywać do końca, więc przyjmijmy, że wykorzystamy połowę tej energii:
t = 360 Wh / 30 W = 12 h. W obu rachunkach pominęliśmy straty w przetwornicach, więc w praktyce czasy będą nieco krótsze.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 19. Co musi zniszczyć lub zakłócić przeciwnik. Starlink nie ma słabych punktów na terytorium kraju, w którym działa, ale jego centrum zarządzania leży poza kontrolą użytkownika

pracują poza Ukrainą. Terminale są rozproszone i jest ich ogromnie dużo.

Pozostaje zakłócanie radiowe. Wąska wiązka terminalu sprawia, że zakłócacz musi być silny i znajdować się blisko, a SpaceX szybko poprawia oprogramowanie, jak w przypadku rosyjskich prób z wiosny 2022 r., o których opowiadał Dave Tremper z Pentagonu. Zakłócanie lokalne jest więc możliwe, ale nie wyłączy całego systemu. Jedyny punkt, w którym Starlinka można wyłączyć jednym poleceniem, to jego centrum zarządzania. Leży ono poza zasięgiem Rosji, ale także poza kontrolą Ukrainy. Ta sama cecha, która chroni łączność przed przeciwnikiem, czyni użytkownika zależnym od właściciela sieci.

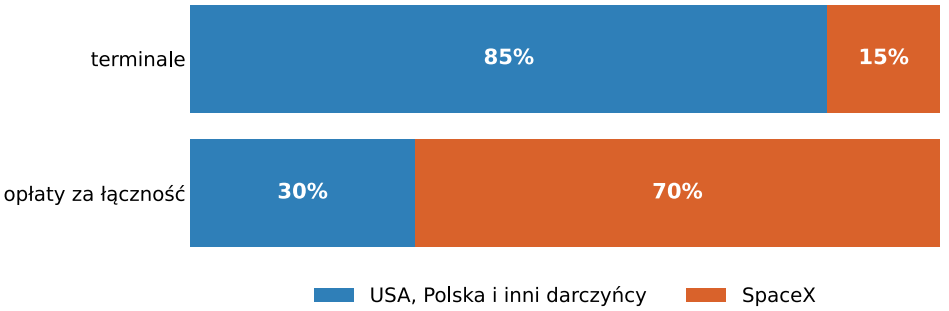
Ćwierć miliona terminali

Ile terminali pracuje na froncie, nie wiadomo dokładnie, bo armie takich liczb nie podają. Współzałożyciel organizacji Ukraine Defense Fund szacował jesienią 2026 r., w wypowiedzi

Tabela 2. Starlink a Starshield. Ceny usług dla klientów wojskowych podane przez SpaceX w sporze o opłaty. Nie dotyczą zestawów dla klientów domowych z tabeli 1

	Starlink	Starshield
Właściciel i kontrola	SpaceX, usługa komercyjna	według Muska rząd USA
Satelity	konstelacja Starlink	ta sama konstelacja Starlink
Terminale i bramy	powszechnie dostępne	osobne terminale i osobne bramy sieciowe
Zabezpieczenia	standardowe szyfrowanie	silniejsze szyfrowanie i większa odporność na zakłócanie
Dozwolone użycie	według Muska tylko cywilne lub obronne	decyduje wojsko lub prezydent USA
Cena usługi za terminal (klienci wojskowi)	ok. 5000 dolarów	ok. 25 000 dolarów

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 20. Kto płacił za Starlinka w Ukrainie do jesieni 2022 r. Według danych SpaceX przytoczonych przez Belfer Center

przytoczonej przez magazyn „The Atlantic", że w strefie wojny działa ponad 250 tysięcy terminali Starlink. Dla porównania: w październiku 2022 r. do Ukrainy przekazano około 20 tysięcy terminali. W ciągu czterech lat liczba urządzeń wzrosła więc ponad dziesięciokrotnie.

Starlink a Starshield

W doniesieniach z frontu pojawiają się dwie nazwy. Starlink to usługa komercyjna, z której korzysta każdy klient. Starshield to oddział SpaceX, który buduje systemy dla wojska i wywiadu USA. Wojskowa usługa Starshield nie ma osobnych satelitów łączności. Korzysta z tej samej konstelacji Starlink, ale ma własne terminale, osobne bramy sieciowe, silniejsze szyfrowanie i większą odporność na zakłócanie. W grudniu 2024 r. Pentagon zamówił dostęp do Starshield dla 2500 terminali w Ukrainie, oprócz 500 podłączonych wcześniej. Wojskowa wersja obejmowała więc około 3000 terminali, czyli niewielki ułamek wszystkich urządzeń używanych na froncie.

Różnica prawna jest ważniejsza od technicznej. Według Muska Starlink jest usługą komercyjną, którą SpaceX posiada i kontroluje, a jego użycie ogranicza się do celów cywilnych lub obronnych. Starshield ma natomiast należeć do rządu USA i być przez niego kontrolowany, a ograniczenia jego pracy mają ustalać wojsko lub prezydent. Gdy więc w 2026 r. pojawiły się ograniczenia, pytanie „kto je wprowadził" nie miało prostej odpowiedzi. Mógł to być SpaceX, rząd USA albo jedno i drugie. Do tej sprawy wrócimy w następnym rozdziale.

Kto płaci za łączność

Na początku wojny SpaceX przedstawiał Starlinka jako dar. Według danych firmy, przytoczonych przez Belfer Center, do jesieni 2022 r. za około 85% terminali oraz 30% opłat za łączność zapłacili jednak inni: rząd USA, w tym Agencja Stanów Zjednoczonych ds. Rozwoju Międzynarodowego USAID (*United States Agency for International Development*), Polska i inni darczyńcy. We wrześniu 2022 r. SpaceX napisał do Pentagonu, że nie może dalej finansować usługi. Szacował jej koszt na ponad 120 mln dolarów do końca 2022 r. i prawie 400 mln dolarów w ciągu kolejnych 12 miesięcy. Gdy pismo ujawniono, Musk zapowiedział, że firma będzie nadal finansować usługę. 1 czerwca 2023 r. Pentagon potwierdził jednak, że kupuje od Starlinka usługi łączności dla Ukrainy. Warunków umowy nie ujawniono.

Polska należy do największych płatników. Od 2022 r. przekazała Ukrainie w kolejnych latach prawie 30 tysięcy terminali, w większości kupionych przez państwo, i opłaca ich abonamenty. Szczegóły opisujemy w rozdziale o Polsce. Te liczby pokazują, że Starlink w Ukrainie nie jest ani prezentem jednego miliardera, ani zwykłą usługą handlową. Jest systemem, za który płacą państwa, ale którego zasady ustala prywatna firma razem z rządem innego państwa.

Druga strona frontu

Rosja oficjalnie nie miała dostępu do Starlinka. SpaceX nie świadczył usługi w Rosji, a według George'a Barrosa zasięg udostępniony Ukrainie zawsze ograniczano do jej granic. Mimo to rosyjskie wojsko zdobywało terminale przez pośredników w innych krajach i używało ich, także w dronach. Przez pewien czas obie strony frontu korzystały więc z tej samej sieci. Sprawa wyglądała podobnie, jak gdyby obie armie dzwoniły przez tę samą centralę telefoniczną, której operator decyduje, kogo połączyć. To prowadzi nas do najtrudniejszego pytania tego numeru: jak tę władzę wykorzystano. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Bóg z wyłącznikiem: pięć momentów władzy

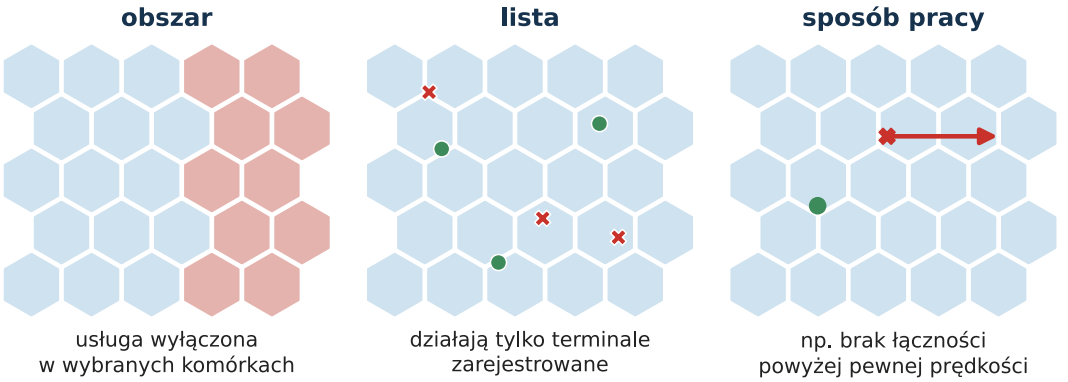
Przy drodze pakietu danych pokazaliśmy, że sieć Starlink musi wiedzieć, gdzie jest terminal i do kogo należy, bo inaczej nie przydzieli mu satelity ani wiązki. Z tej technicznej konieczności wynikają trzy rodzaje „wyłączników". Operator może wyłączyć usługę na wybranym obszarze, dopuścić do sieci tylko terminale z określonej listy albo ograniczyć sposób ich pracy, na przykład prędkość, z jaką mogą się poruszać. Wszystkie trzy zostały użyte podczas wojny w Ukrainie.

Poniżej opisujemy pięć momentów, w których władza nad tymi wyłącznikami miała znaczenie. **Rysunek 22** pokazuje je na osi czasu. Przy każdym podajemy, skąd wiadomo, co się stało, bo w kilku sprawach dysponujemy tylko relacjami anonimowych źródeł, a strony przedstawiają je różnie.

Moment pierwszy: Krym, wrzesień 2022 r.

We wrześniu 2023 r. ukazała się biografia Elona Muska autorstwa Waltera Isaacsona. Fragmenty opublikowane wcześniej przez „The Washington Post" i CNN sugerowały, że jesienią 2022 r. Musk wyłączył Starlinka u wybrzeży Krymu, aby udaremnić atak ukraińskich dronów morskich na rosyjską flotę w Sewastopolu. „The Washington Post" musiał tę wersję sprostować. Zasięg w pasie 100 km od wybrzeża Krymu był wyłączony już wcześniej. Ukraińcy poprosili o jego włączenie, a Musk odmówił. Sam tłumaczył, że gdyby się zgodził, SpaceX stałby się wprost współuczestnikiem dużej operacji wojennej i eskalacji konfliktu.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 21. Trzy rodzaje ograniczeń, które operator może wprowadzić po swojej stronie sieci. Sześciokąty oznaczają komórki obsługiwane przez wiązki satelitów, kropki terminale, a krzyżyki terminale pozbawione łączności

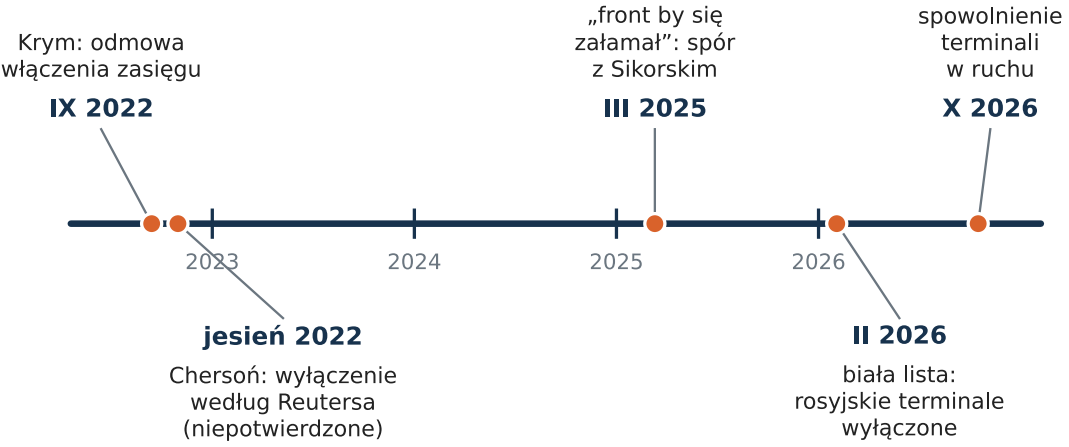
Różnica między „wyłączył" a „odmówił włączenia" jest ważna dla rzetelności opisu, ale skutek był ten sam. O tym, czy ukraińska operacja wojskowa może się odbyć z użyciem Starlinka, zdecydował szef prywatnej firmy.

Moment drugi: Chersoń, jesień 2022 r.

Jesienią 2022 r. ukraińskie wojska kontrnacierały w obwodzie chersońskim. 25 lipca 2025 r. agencja Reuters, powołując się na trzy anonimowe źródła, napisała, że Musk polecił wtedy jednemu z inżynierów SpaceX wyłączyć zasięg Starlinka w okolicy Berysławia. Oddziały na pierwszej linii miały stracić łączność, a drony i koordynacja ognia miały przestać działać. Według źródeł Reutersa Musk obawiał się, że zbyt duży sukces Ukrainy mógłby sprowokować Rosję do użycia broni jądrowej. SpaceX tego nie potwierdził, a Musk zaprzecza, by kiedykolwiek wyłączał terminale. W listopadzie 2022 r. Ukraina i tak wyzwoliła Chersoń. Tej sprawy nie da się dziś rozstrzygnąć i tak trzeba ją przedstawiać: jako poważne oskarżenie, którego nikt oficjalnie nie potwierdził.

Moment trzeci: „Cały front by się załamał", marzec 2025 r.

9 marca 2025 r. Musk napisał w serwisie X, że jego system Starlink jest kręgosłupem ukraińskiej armii i że cały front by się załamał, gdyby go wyłączył. Minister spraw zagranicznych Polski Radosław Sikorski odpowiedział, że polski rząd płaci za Starlinki dla Ukrainy około 50 mln dolarów rocznie i jeśli SpaceX okaże się niepewnym dostawcą, Polska będzie musiała szukać innych. Musk odpisał: „Bądź cicho, mały człowieku. Płacisz niewielki ułamek kosztów. I nie



Rysunek 22. Pięć momentów, w których decyzje dotyczące Starlinka wpłynęły na wojnę w Ukrainie

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Tabela 3. Kto co mówił o spowolnieniu Starlinka w październiku 2026 r.

Data	Kto	Co powiedział lub ustalił
14 października	Elon Musk	Starshield należy do rządu USA i jest przez niego kontrolowany, a o ograniczeniach decyduje wojsko USA i ostatecznie prezydent.
19 października	Donald Trump	Nie wie, kto zarządził spowolnienie, ale chce się tego dowiedzieć.
20 października	„The Wall Street Journal" i CBS News	Według anonimowych źródeł ograniczenie zarządził Musk.
21 października	Marco Rubio	Administracja nie wiedziała wcześniej o spowolnieniu i o nie nie prosiła.
24 października	Ministerstwo Obrony Ukrainy	Łączność wróciła do normy.
24–25 października	Elon Musk	Ukraińskie wojsko naruszyło regulamin Starlinka, używając go do ataków dronami, a SpaceX zamknął tę „lukę". Starshield to inny system, kontrolowany przez rząd USA.

ma niczego, co zastąpiłoby Starlinka". Sekretarz stanu USA Marco Rubio stwierdził, że nikt nie groził odcięciem Ukrainy od Starlinka, a Sikorski powinien podziękować. Tego samego dnia Musk zapewnił, że Starlink nigdy nie wyłączy terminali i nie będzie kartą przetargową.

Tym razem nic nie wyłączono. Wymiana zdań pokazała jednak, jak wygląda zależność od jednego dostawcy. Państwo, które płaci, nie ma alternatywy, a dostawca publicznie o tym przypomina.

Moment czwarty: biała lista, luty 2026 r.

Wyłącznik nie zawsze działał przeciw Ukrainie. Rosyjskie wojsko przez lata zdobywało terminale Starlink na szarym rynku: kupowano je w krajach, w których usługa działa legalnie, i przez pośredników przemycano do Rosji oraz na tereny okupowane. Według zestawienia GlobalSecurity od września 2024 r. obserwowano rosyjskie drony Shahed z terminalami Starlink, a później także inne typy dronów. Na początku 2026 r. SpaceX ograniczył prędkość, z jaką może poruszać się terminal, oficjalnie po to, by utrudnić używanie Starlinka w rosyjskich dronach.

2 lutego 2026 r. rząd Ukrainy przyjął zasady rejestracji terminali, a minister obrony Mychajło Fedorow (ten sam, który w 2022 r. jako minister transformacji cyfrowej prosił Muska o terminale) ogłosił „białą listę" wprowadzaną we współpracy ze SpaceX. Terminale, których nie zweryfikowano w ukraińskich systemach państwowych, przestały działać. Do 5 lutego wyłączono większość terminali używanych przez Rosjan. Ukraińskie ministerstwo obrony informowało o danych dotyczących prawie 2500 zablokowanych rosyjskich terminali. Rosyjscy blogerzy wojskowi pisali o chaosie w łączności swoich oddziałów.

Ten moment pokazuje drugą stronę władzy operatora. Dzięki niej Ukraina w kilka dni odebrała przeciwnikowi ważne narzędzie. Po raz pierwszy decyzja zapadła też z udziałem państwa ukraińskiego, które przejęło rejestrację terminali na swoim terytorium.

Moment piąty: październik 2026 r.

14 października 2026 r. ograniczenia prędkości stały się dotkliwe dla Ukrainy: terminale poruszające się szybciej niż około 160 km/h zaczęły tracić łączność, a następnego dnia próg na krótko obniżono do 60...80 km/h. Media nazwały to spowolnieniem, choć w praktyce chodziło o odcięcie od sieci terminali poruszających się szybciej niż wyznaczony próg. Ograniczenie objęło także wojskową usługę Starshield. Prezydent Zełenski mówił, że spowolnienie uniemożliwia użycie dronów przechwytujących przeciw rosyjskim dronom. Tabela 3 pokazuje, jak zmieniały się w kolejnych dniach wypowiedzi stron.

Ukraińscy przedstawiciele odrzucili zarzut naruszenia regulaminu. Serhij Beskrestnow, ukraiński specjalista od łączności i doradca władz, tłumaczył, że cywilnego Starlinka nie da się fizycznie użyć do uderzeń w głąb Rosji, bo ograniczenia prędkości i brak zasięgu nad Rosją na to nie pozwalają. Według magazynu „The Atlantic" SpaceX doradzał Ukrainie przejście

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

na droższą umowę, aby uniknąć przerw. W podobnym sporze na Bliskim Wschodzie SpaceX miał przekonywać, że klienci płacący za Starlinka około 5 tysięcy dolarów za terminal powinni przejść na Starshield za około 25 tysięcy dolarów, a Pentagon tę cenę przyjął. W chwili zamykania tego numeru nie wiadomo na pewno, kto i dlaczego zdecydował o październikowym spowolnieniu.

Skąd sieć wie, jak szybko jedzie terminal

Ograniczenie prędkości brzmi zaskakująco: skąd satelita ma wiedzieć, czy terminal stoi na dachu, czy leci w dronie? SpaceX nie ujawnia, jak to robi, ale fizyka podsuwa co najmniej dwa sposoby. Pierwszy jest prosty. Sieć zna położenie terminalu, bo potrzebuje go do skierowania wiązki, a terminal ma odbiornik nawigacji satelitarnej. Jeśli położenie zmienia się szybko, terminal się porusza. Przy prędkości 160 km/h terminal przesuwa się w ciągu jednego 15-sekundowego przydziału o około 670 m.

Drugi sposób wykorzystuje zjawisko Dopplera, czyli zmianę częstotliwości fali, gdy nadajnik i odbiornik zbliżają się do siebie lub oddalają. Satelita pędzi z prędkością około 7,6 km/s, więc przesunięcie częstotliwości wywołane jego ruchem jest duże. Sieć zna jednak orbitę każdego satelity i potrafi to przesunięcie dokładnie obliczyć i odjąć. To, co zostaje, pochodzi z ruchu terminalu.

Ten przykład dobrze pokazuje, dlaczego takie ograniczenie jest tak skuteczne. Nie wymaga zmian w terminalach na froncie ani nowych satelitów. Wystarczy zmiana reguł w oprogramowaniu sieci. Ukraina nie może go obejść, bo nie ma dostępu do tej części systemu.

Gdzie kończy się władza Muska

Wróćmy do podtytułu. Czy Elon Musk stał się bogiem wojny? Jego władza jest realna i wynika wprost z budowy systemu. Ludzie z jego firmy mogą w ciągu godzin zmienić warunki pracy setek tysięcy terminali, z których korzysta armia walczącego państwa. Żaden dostawca sprzętu wojskowego w historii nie miał takiej możliwości. Dostawca karabinów nie może ich zdalnie wyłączyć, a operator Starlinka może zmienić zasady pracy terminali, nie dotykając żadnego z nich.

Ta władza ma jednak granice. Państwa płacą za terminale i abonamenty, więc mogą wywierać nacisk albo szukać innych dostawców. Usługą Starshield zarządza według samego Muska rząd USA. Częstotliwości, z których korzysta SpaceX, przydzielają państwowi regulatorzy, a największym klientem Starshield jest Pentagon. Także interes handlowy działa w obie strony: „The Atlantic" pisał, że przed porzuceniem Ukrainy może Muska powstrzymać przede wszystkim jego własny interes finansowy. Wreszcie Musk nie przesądza o wyniku wojny. Może utrudnić lub ułatwić pewne działania, ale walczą ludzie, a nie terminale.

Podtytuł broni się więc jako metafora, a nie jako dosłowne twierdzenie. Problem nie dotyczy wyłącznie jednego człowieka. Kluczowa infrastruktura państwa w stanie wojny należy do prywatnej firmy z innego kraju, a o zasadach jej działania decydują ludzie, których obywatele tego państwa nie wybierali. Ta lekcja dotyczy także Polski. ■

Policz sam

Przesunięcie Dopplera wynosi w przybliżeniu $\Delta f = f \cdot v / c$, gdzie f to częstotliwość, v to prędkość zbliżania się lub oddalania, a $c \approx 300\,000$ km/s.

Ruch satelity: f = 12 GHz, v do około 7 km/s (składowa wzdłuż linii łączącej satelitę z terminalem). $\Delta f = 12 \cdot 10^9$ Hz $\cdot$ 7 km/s / 300 000 km/s = 280 kHz.

Ruch terminalu: v = 160 km/h ≈ 44 m/s. $\Delta f = 12 \cdot 10^9$ Hz $\cdot$ 0,044 km/s / 300 000 km/s ≈ 1,8 kHz.

Przesunięcie wywołane ruchem terminalu jest więc około 160 razy mniejsze od przesunięcia wywołanego ruchem satelity, ale dla współczesnej elektroniki cyfrowej łatwo mierzalne.



eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Polska w tej historii

Polska nie jest w tej historii widzem. Jest jednym z największych płatników łączności Starlink w Ukrainie i coraz częściej sama korzysta z tej sieci. Jest też jednym z państw, które najgłośniej mówią o potrzebie uniezależnienia się od niej.

Płatnik

Według danych Ministerstwa Cyfryzacji, opublikowanych przez „Rzeczpospolitą" w kwietniu 2025 r., Polska przekazała Ukrainie 24 560 terminali kupionych przez państwo, a kolejne 5150 sfinansowali sponsorzy. W lutym 2026 r. ukraińskie Ministerstwo Transformacji Cyfrowej dziękowało Polsce za ponad 29 tysięcy terminali i nazwało ją „strategicznym i niezawodnym partnerem". Na terminale i abonamenty Polska wydała w latach 2022–2024 prawie 323 mln zł z Funduszu Pomocy, utworzonego na wsparcie Ukrainy. Abonament kosztuje 528,90 zł brutto miesięcznie za terminal, a w planie specjalnym 1383,75 zł. To znacznie więcej niż ceny dla klientów domowych z tabeli 1, bo te kwoty dotyczą innych planów usług. Polska płaci tylko za terminale, które zostały aktywowane.

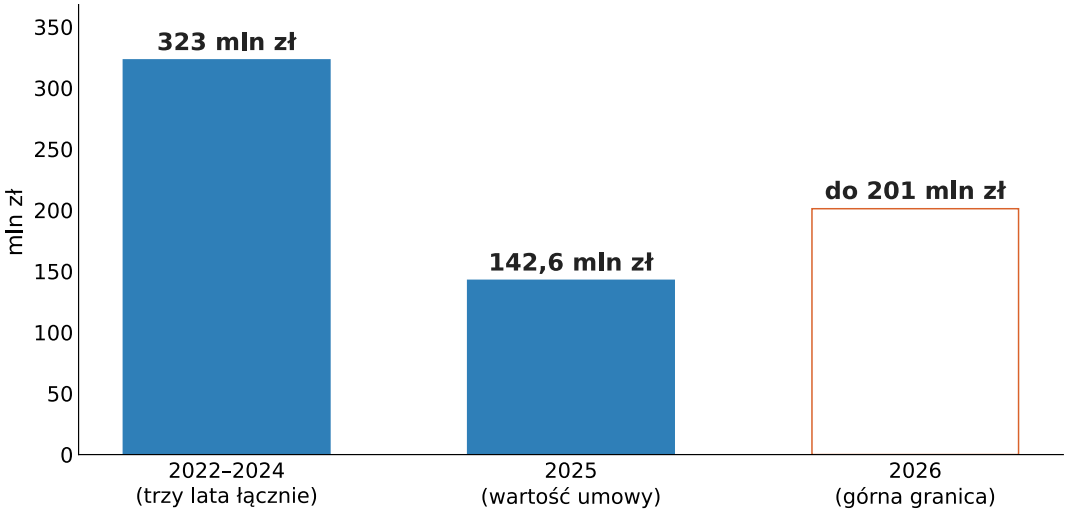
Według „Pulsu Biznesu" umowa z Instytutem Łączności na tę usługę była w 2025 r. warta ponad 142,6 mln zł. W 2026 r. nowa ustawa pozwala przeznaczyć na ten cel do około 168 mln zł, a do tego dochodzi umowa warta ponad 33 mln zł na pierwsze dwa miesiące roku. Ministerstwo Cyfryzacji zapowiedziało wsparcie co najmniej na kolejny rok. Terminale są Ukrainie użyczone, a nie podarowane.

W sporze z Muskiem z marca 2025 r. minister Sikorski mówił o około 50 mln dolarów rocznie, czyli mniej więcej 200 mln zł. Liczby ministerstwa za lata 2022–2024 dają średnio około 108 mln zł rocznie. Kwota Sikorskiego jest bliższa wydatkom planowanym na 2026 r. Bez względu na to, którą liczbę przyjmiemy, Musk nie mylił się, twierdząc, że Polska pokrywa tylko część kosztów łączności na froncie. Nie mylił się jednak także Sikorski: Polska należy do klientów, których firma nie może lekceważyć.

Użytkownik

Starlink działa także w polskich instytucjach. Podczas wyborów parlamentarnych w 2023 r. państwo kupiło tysiąc terminali dla samorządów i innych jednostek publicznych, a w dniu wyborów pracowało 321 terminali. W wyborach samorządowych w 2024 r. uruchomiono 473 terminale, a w wyborach

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 23. Wydatki Polski na łączność Starlink dla Ukrainy według danych Ministerstwa Cyfryzacji i „Pulsu Biznesu". Kwota za 2025 r. to wartość umowy, a za 2026 r. górna granica przewidziana w ustawie i umowie na początek roku

do Parlamentu Europejskiego 460. Zapewniały łączność lokalom wyborczym na wypadek awarii zwykłej sieci. Podczas powodzi jesienią 2024 r. terminale dostały Państwowa Straż Pożarna i Komenda Główna Policji. Z terminali korzysta także wojsko, instytut badawczy NASK (Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa) i Służba Ochrony Państwa.

W sierpniu 2026 r. Polska przekonała się, co oznacza zależność od zagranicznego dostawcy także w czasie pokoju. Starlink zmienił zasady usługi Roam, która pozwala korzystać z terminalu w podróży po Europie bez dodatkowych opłat, i wyłączył Polskę z regionu europejskiego. Nie podał przyczyny. Wicepremier i minister cyfryzacji Krzysztof Gawkowski zażądał przywrócenia równych warunków, a minister Sikorski znów zasugerował, że Polska może zastanowić się nad płaceniem za Starlinki dla Ukrainy. 13 sierpnia Starlink wycofał się ze zmiany. Premier Donald Tusk wyraził nadzieję, że było to po prostu nieporozumienie.

Państwo, które szuka niezależności

Wnioski z wojny w Ukrainie Polska wyciąga także po swojej stronie. 21 lipca 2026 r. podpisała porozumienie o udziale w europejskim systemie łączności satelitarnej IRIS^2 (Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite), przeznaczając na ten cel 656 mln euro, czyli około 2,8 mld zł z Krajowego Planu Odbudowy. W zamian Polska ma wnieść do systemu sześć dużych satelitów na orbicie średniej i sześć mniejszych na orbicie niskiej, a w Warszawie powstanie brama naziemna połączona z rządową siecią światłowodową. Z bezpiecznej łączności mają korzystać instytucje rządowe, wojsko i służby ratunkowe. System ma działać od 2030 r.

Polska buduje też własne oczy na orbicie. Agencja Uzbrojenia zamówiła w maju 2025 r. za około 860 mln zł trzy radarowe satelity rozpoznawcze MikroSAR u konsorcjum ICEYE Polska i Wojskowych Zakładów Łączności nr 1, a w maju 2026 r. system przekazano wojsku. Polska firma Creotech Instruments buduje cztery satelity obserwacyjne MikroGlob. Pierwszy z nich trafił na orbitę 7 lipca 2026 r. We wrześniu 2026 r. na targach w Kielcach premier Tusk zapowiedział budowę polskich zdolności satelitarnych, których celem może być „polski Starlink". Nazwał to wyzwaniem i marzeniem, ale nie mrzonką. Koszty, terminy i liczby satelitów nie zostały jeszcze podane.

W tej historii jest pewna ironia. Trzy kolejne satelity MikroGlob poleciały na orbitę na pokładzie rakiety Falcon 9, w misji Transporter-18 firmy SpaceX. Nawet budowa niezależności od SpaceX zaczyna się dziś często od startu rakietą SpaceX. To dobrze pokazuje, jak trudno dogonić lidera, i jest dobrym punktem wyjścia do pytania, kto może zbudować drugą taką sieć. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Kto zbuduje drugą sieć: wyścig o suwerenność

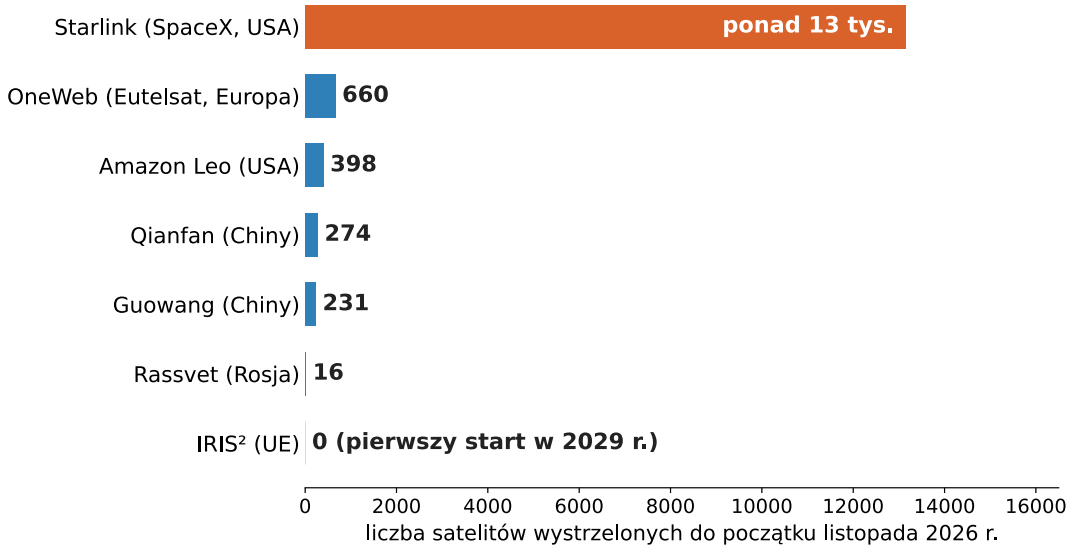
Wojna w Ukrainie przekonała rządy na całym świecie, że łączność satelitarna to sprawa bezpieczeństwa państwa, a nie tylko usługa handlowa. Kto nie ma własnej sieci, jest zdany na łaskę cudzej. Stąd wyścig o zbudowanie alternatywy dla Starlinka. Rysunek 24 pokazuje, jak wygląda on dziś: liczbę satelitów, które poszczególne sieci zdążyły wystrzelić do początku listopada 2026 r. według zestawienia Jonathana McDowella oraz innych źródeł.

Europa: OneWeb i IRIS²

Europa ma już jedną działającą sieć. OneWeb, należący dziś do francuskiej firmy Eutelsat, wyniósł 660 satelitów, z których około 625 pracuje. Krąży wyżej niż Starlink, na wysokości około 1200 km, więc potrzebuje mniej satelitów, ale ma większe opóźnienie i mniejszą pojemność. Specjaliści zwracają uwagę, że konstrukcja systemu ma około dziesięciu lat, a jego terminale są droższe, cięższe i pobierają więcej energii. Dlatego OneWeb nadaje się raczej dla firm, statków i instytucji niż dla setek tysięcy żołnierzy na froncie. Terminale tych sieci nie są zamienne: przejście ze Starlinka na OneWeb oznaczałoby wymianę sprzętu.

Odpowiedzią Unii Europejskiej ma być IRIS². W sierpniu 2026 r. Komisja Europejska i konsorcjum SpaceRISE podpisały umowę na budowę 348 satelitów: 330 na wyższej orbicie niskiej i 18 na orbicie średniej. Pierwszy start przyspieszono na 2029 r. System ma zapewnić szyfrowaną łączność przede wszystkim rządom, wojsku i służbom ratunkowym. Polska, jak pisaliśmy w rozdziale o Polsce, wnosi do niego 656 mln euro i 12 satelitów. IRIS² nie ma zastąpić Starlinka

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 24. Liczba satelitów wystrzelonych przez sieci łączności na niskiej orbicie do początku listopada 2026 r. Wliczono satelity, które później zeszły z orbity

w domach. Ma sprawić, by w kryzysie europejskie państwa nie musiały prosić o łączność zagranicznej firmy.

Amazon: pieniądze są, rakiet brakuje

Najpoważniejszym prywatnym konkurentem jest Amazon. Jego sieć Amazon Leo, wcześniej znana jako Project Kuiper, ma liczyć 3236 satelitów. Do października 2026 r. Amazon wyniósł ich 396 w 14 startach i zbudował już ponad tysiąc. Nie zdążył jednak z pierwotnym terminem wyniesienia połowy konstelacji do lipca 2026 r.: w lutym 2026 r. zapowiadał zaledwie około 700 satelitów do końca lipca, a w czerwcu amerykańska Federalna Komisja Łączności (FCC, Federal Communications Commission) przedłużyła mu o dwa lata termin wyniesienia połowy konstelacji. Usługa ma ruszyć jeszcze w 2026 r.

Słabym punktem Amazona są rakiety. Firma zamówiła ponad sto startów u United Launch Alliance, Arianespace i Blue Origin, ale te rakiety latają rzadko, a New Glenn firmy Blue Origin eksplodował w maju 2026 r. podczas testu przed startem. Jak pisaliśmy w rozdziale o fabryce na orbitę, Amazon kupił część startów nawet u SpaceX. To pokazuje przewagę opisaną wcześniej: konkurent nie ma jednocześnie taniej rakiety wielokrotnego użytku, fabryki satelitów i fabryki terminali.

Chiny: dwie sieci po kilkanaście tysięcy satelitów

Chiny budują dwie megakonstelacje. Państwowa sieć Guowang ma liczyć do 13 tysięcy

Tabela 4. Pretendenci do roli drugiej sieci satelitarnej według stanu z listopada 2026 r.

Sieć	Plan	Usługa	Najważniejsza przeszkoda
OneWeb	648 satelitów pierwszej generacji oraz zapasowe	działa, głównie dla firm i instytucji	starsza konstrukcja, mniejsza pojemność
Amazon Leo	3236 satelitów	zapowiadana na 2026 r.	brak własnych sprawdzonych rakiet
Qianfan	do 15 000 satelitów	brak powszechnej usługi	tempo startów poniżej planu
Guowang	do 13 000 satelitów	brak powszechnej usługi	tempo startów poniżej planu
Rassvet	do 900 satelitów do 2035 r.	zapowiadana na 2027 r.	kłopoty pierwszych satelitów
IRIS²	348 satelitów	po pierwszych startach w 2029 r.	czas: budowa dopiero się zaczyna

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

satelitów, a Qianfan, nazywany też Tysiącem Żagli, do 15 tysięcy do 2030 r. Do początku listopada 2026 r. wyniesiono odpowiednio 231 i 274 satelity. Obie sieci są wyraźnie za planem. W 2026 r. miało polecieć 310 satelitów Guowang i 324 satelity Qianfan, a według zestawienia serwisu China in Space poleciało około 95 i 166. Chiny mają wiele rakiet i dużą liczbę startów. W 2026 r. po raz pierwszy odzyskały pierwsze stopnie swoich rakiet, najpierw na morzu, a w sierpniu na lądzie. Do regularnego, wielokrotnego używania tych samych stopni, jak w przypadku Falcona 9, jest im jednak jeszcze daleko.

Rosja: Rassvet

Rosja, która straciła dostęp do Starlinka po wprowadzeniu białej listy, buduje własną sieć Rassvet. Firma Biuro 1440 wystrzeliła pierwsze 16 satelitów 23 marca 2026 r. rakietą Sojuz z kosmodromu Plesieck, po kilku przesunięciach terminu. Według obserwacji opisanych w serwisie RussianSpaceWeb jeden z satelitów spłonął w atmosferze w czerwcu bez wykonania manewrów, a pozostałe nie osiągnęły do tego czasu planowanej wysokości. Do lipca 2026 r., z którego pochodzą ostatnie dostępne nam dane, kolejnych startów nie było. Usługa komercyjna ma ruszyć w 2027 r., a do 2035 r. sieć ma liczyć do 900 satelitów.

Dlaczego tak trudno dogonić Starlinka

Z tego przeglądu wynika kilka przeszkód, które powtarzają się u wszystkich konkurentów. Pierwsza to rakiety: do zbudowania sieci z tysięcy satelitów potrzebne są setki tanich startów, a tylko SpaceX ma dziś rakietę wielokrotnego użytku startującą kilka razy w tygodniu. Druga to produkcja: satelity i terminale trzeba wytwarzać seryjnie, w tempie dziesiątek tygodniowo. Trzecia to częstotliwości. Zakresy częstotliwości i położenia orbit rejestruje się w Międzynarodowym Związku Telekomunikacyjnym (ITU), a ten, kto zgłosi je i wykorzysta pierwszy, ma pierwszeństwo przed następnymi. Czwarta to pieniądze: Starlink już zarabia miliardy dolarów rocznie, a konkurenci muszą dopiero wydać miliardy, zanim zarobią pierwszego dolara.

Żadnej z tych przeszkód nie da się pokonać szybko, ale żadna nie jest nie do pokonania. Chiny mają determinację państwa i rosnącą liczbę startów, Amazon ma pieniądze, a Europa wolę polityczną. Za dziesięć lat na niebie będzie najpewniej kilka dużych sieci. Pytanie, czy wcześniej świat zapłaci za to, że jest ich tylko jedna, zostawiamy do ostatniego rozdziału. Najpierw zobaczmy, ile ten tłok na orbicie kosztuje samą przestrzeń kosmiczną. ■

Przeklęte melodie (tom 1)
Connie Glynn
Wydawnictwo: StoryLight, stron: 368,
sugerowana cena: 49,99 zł

Bliźnięta Astrid i Jonas od zawsze wiedziały, że mogą liczyć tylko na siebie. Dorastają w sierocińcu i skrywają sekret: słyszą szepty kwiatów i pieśni drzew. Ich opiekunów niepokoją te zdolności, robią więc wszystko, by trzymać rodzeństwo z dala od natury. Jej wołania nie sposób jednak zagłuszyć. Wkrótce okaże się, że pradawne magiczne melodie, które potrafi usłyszeć niezwykłe rodzeństwo, utrzymują świat w równowadze. Kiedy jednak harmonia zostaje zachwiana, a z mroków podziemnego świata zaczynają wyłaniać się niebezpieczne potwory, na drodze Astrid i Jonasa los stawia Gwen. Ciemnowłosa dziewczyna doskonale zna ukryty świat Ludzi Pełni; w ich żyłach płynie magia i to oni od pokoleń strzegą ładu. Odtąd Astrid, Jonas i Gwen będą musieli wspólnie odkryć prawdę o niezwykłych mocach bliźniąt oraz stawić czoła niebezpiecznej magii, która budzi się po wiekach uśpienia.



eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rachunek za niebo

Ponad jedenaście tysięcy pracujących satelitów to nie tylko sukces techniczny. To także koszty, których nie płacą klienci Starlinka, lecz wszyscy użytkownicy przestrzeni kosmicznej, astronomowie i, być może, atmosfera Ziemi.

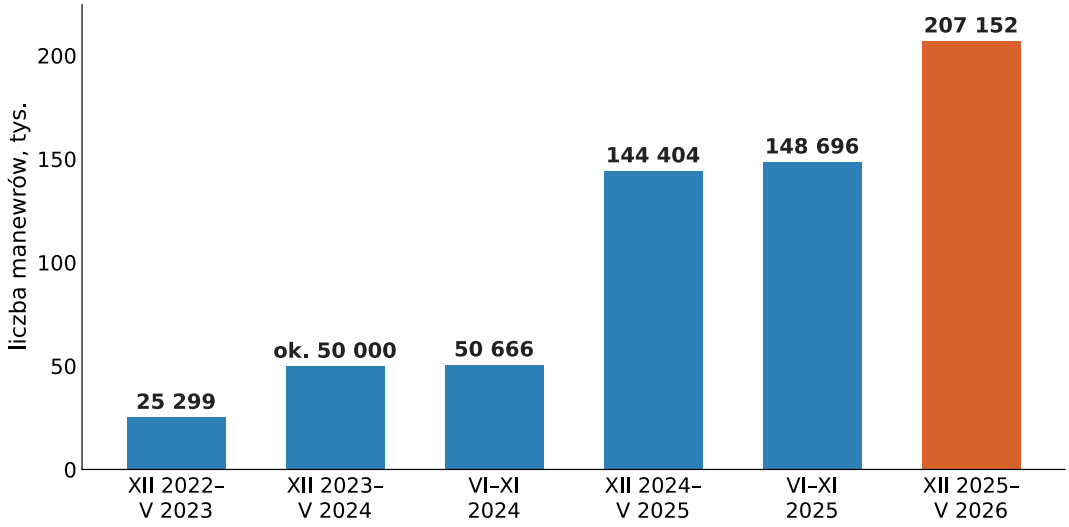
Tłok na orbicie

Co pół roku SpaceX składa amerykańskiej Federalnej Komisji Łączności sprawozdanie z manewrów, którymi satelity Starlink unikają zderzeń. Satelita zmienia orbitę, gdy prawdopodobieństwo kolizji przekroczy 3 na 10 milionów. W okresie od grudnia 2025 r. do maja 2026 r. wykonano 207 152 takie manewry, a w ciągu ostatnich dwunastu miesięcy ponad 355 tysięcy, czyli średnio kilkadziesiąt na każdego satelitę rocznie. Hugh Lewis z Uniwersytetu w Birmingham, specjalista od śmieci kosmicznych, przewiduje, że prędzej czy później dojdzie do zderzenia z udziałem czynnego satelity, choć nie z braku starań, by mu zapobiec.

Specjaliści najbardziej obawiają się zjawiska Kesslera. Zderzenie dwóch obiektów tworzy chmurę odłamków, odłamki zderzają się z kolejnymi satelitami, a w najgorszym przypadku powstaje reakcja łańcuchowa, która na długo uniemożliwia korzystanie z części orbity. Jonathan McDowell zwraca uwagę, że przy konstelacjach liczących łącznie 30 tysięcy satelitów awaria zaledwie 1% z nich oznacza 300 dużych, niesterowanych obiektów. Według niego to wystarczy, by wywołać taki proces na niskiej orbicie.

SpaceX odpowiada na to wysokością orbit. W 2026 r. firma obniża około 4400 satelitów z 550 do 480 km. Michael Nicolls, wiceprezes SpaceX ds. inżynierii, tłumaczy, że zbliża się minimum aktywności Słońca. Atmosfera jest wtedy chłodniejsza i rzadsza, więc słabiej hamuje obiekty na orbicie. Niżej powietrza jest jednak więcej, dlatego martwy satelita na wysokości 480 km spadnie w ciągu kilku miesięcy,

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 25. Liczba manewrów omijania wykonanych przez satelity Starlink w kolejnych półroczach według sprawozdań SpaceX. Brak danych dla okresu od czerwca do listopada 2023 r.

a nie około czterech lat. Poniżej 500 km jest też mniej śmieci i innych konstelacji. Ryzyko nie zniknęło: w grudniu 2025 r. jeden ze Starlinków, krążący niżej niż większość sieci, na wysokości około 418 km, uległ awarii, prawdopodobnie wybuchowi na pokładzie. Satelita stracił łączność, opadł o 4 km i rozsiał drobne odłamki, a potem w ciągu kilku tygodni spłonął w atmosferze.

Codziennie spada satelita

Jak pisaliśmy przy fabryce na orbitę, satelity Starlink pracują kilka lat, a potem schodzą z orbity i spalają się w atmosferze. Według McDowella jesienią 2025 r. spadały w ten sposób jeden lub dwa Starlinki dziennie. Gdy na orbicie będzie około 30 tysięcy satelitów różnych sieci, wymienianych co mniej więcej pięć lat, każdego dnia będzie spadać średnio kilkanaście z nich (30 000 satelitów / 5 lat / 365 dni ≈ 16).

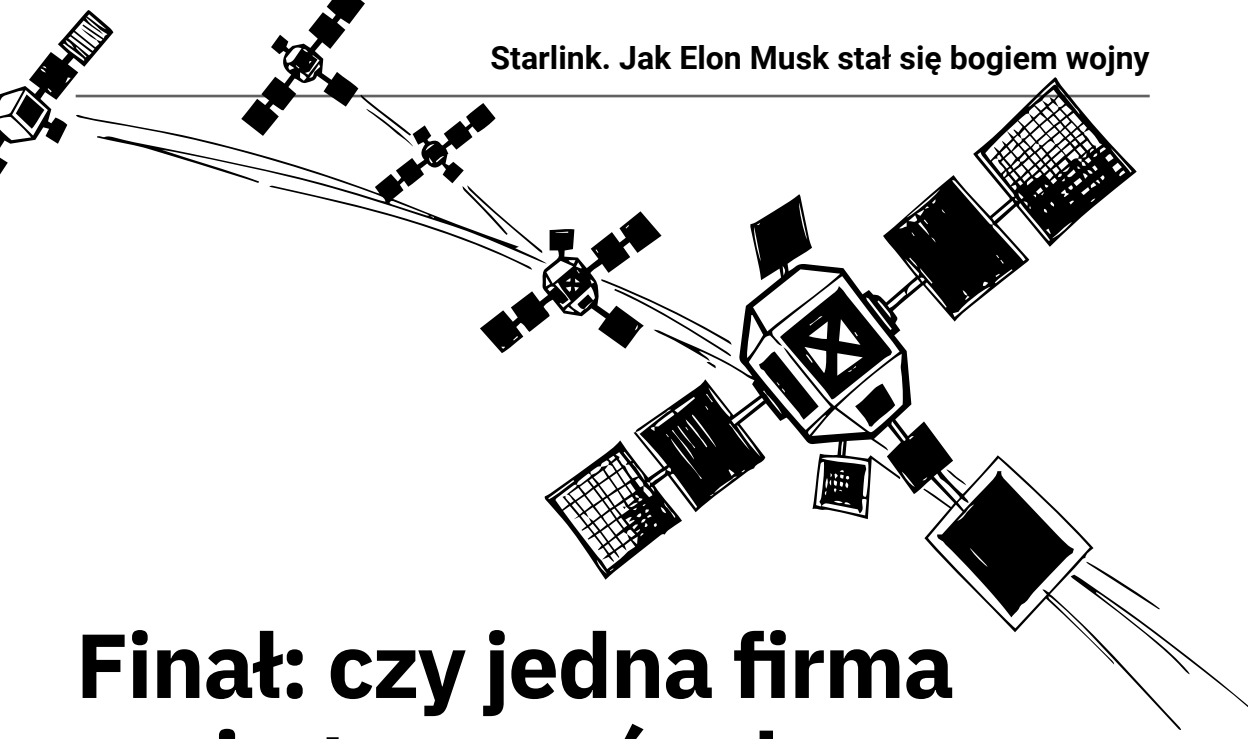
Satelita spalający się w atmosferze nie znika bez śladu. Zespół José Ferreiry z Uniwersytetu Południowej Kalifornii obliczył w 2024 r., że w samym 2022 r. spalające się satelity wytworzyły około 17 ton nanocząstek tlenku glinu, czyli ośmiokrotnie więcej niż w 2016 r. Po rozbudowie megakonstelacji może to być około 360 ton rocznie. Cząstki tlenku glinu nie reagują wprost z ozonem, ale przyspieszają reakcje, w których chlor niszczy ozon. Same się przy tym nie zużywają, a do warstwy ozonowej mogą opadać nawet przez 30 lat. Skala tego zjawiska jest wciąż niepewna. McDowell przyznaje, że już dziś możemy szkodzić górnym warstwom atmosfery, ale nikt nie wie tego na pewno.

Smugi na zdjęciach nieba

Satelity odbijają światło Słońca, więc o zmierzchu i świcie widać je na niebie, a na zdjęciach astronomicznych zostawiają jasne smugi. Najbardziej odczuje to nowe Obserwatorium Very Rubin w Chile, które przez dziesięć lat będzie fotografować całe niebo widoczne z półkuli południowej. Według Noelii Noël z Uniwersytetu Surrey smugi satelitów mogą się znaleźć nawet na 40% jego zdjęć. Meredith Rawls z Uniwersytetu Waszyngtońskiego porównuje je do owadów na przedniej szybie: przeszkadzają, ale nie przekreślają badań, a specjalne programy rozpoznają i usuwają smugi, porównując kolejne zdjęcia tego samego fragmentu nieba. Międzynarodowa Unia Astronomiczna apeluje, by satelity nie były jaśniejsze niż gwiazdy 7. wielkości gwiazdowej, czyli niewidoczne gołym okiem. SpaceX próbował przyciemniać satelity, ale z ograniczonym skutkiem, a operatorzy na razie tego progu nie spełniają.

Wszystkie te koszty mają wspólną cechę: ponoszą je wszyscy, a nie tylko firma i jej klienci. Nie ma też międzynarodowego organu, który mógłby jednej firmie albo jednemu państwu narzucić limit liczby satelitów. Niebo nad nami jest dobrem wspólnym, ale zasady korzystania z niego pisze dziś ten, kto jako pierwszy umieści na orbicie najwięcej satelitów. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Finał: czy jedna firma może trzymać rękę na łączu?

Zaczęliśmy od fizyki. Satelita geostacjonarny jest za daleko, by obsłużyć płynną rozmowę albo sterowanie dronem, więc trzeba było zejść na orbitę niską. Wtedy potrzeba tysięcy satelitów, tanich rakiet i anten bez ruchomych części, a przede wszystkim centralnego rozkładu jazdy, który przydziela każdemu terminalowi satelitę, wiązkę i czas. Ten sam rozkład jazdy, bez którego sieć nie mogłaby działać, daje jej właścicielowi władzę nad każdym terminalem. Na wojnie w Ukrainie ta władza zmieniała warunki walki w ciągu godzin.

Jak będzie wyglądało niebo nad nami za mniej więcej dziesięć lat, około 2035 r.? Nikt tego nie wie, ale możemy opisać trzy scenariusze. Pokazuje je **rysunek 26**.

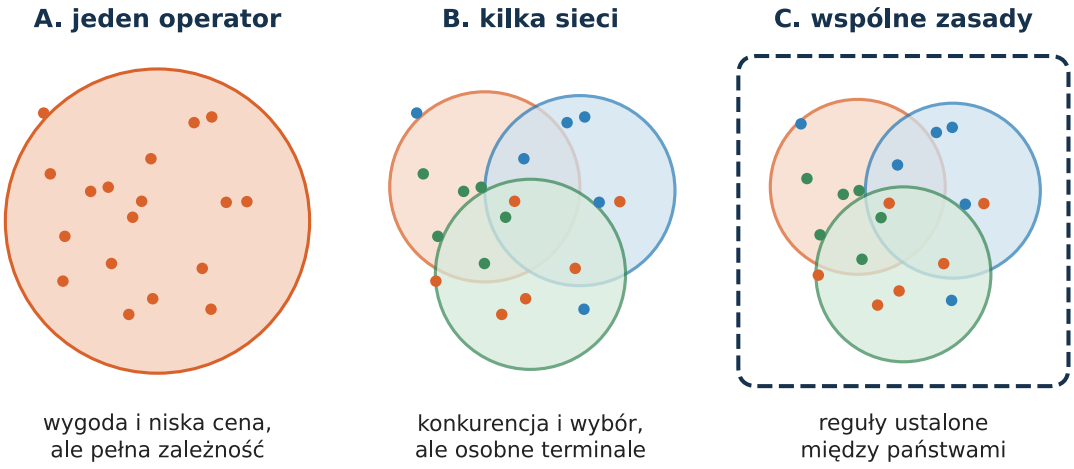
Scenariusz A: jeden operator

Starlink rośnie dalej. Starship wynosi satelity V3 po sześćdziesiąt naraz, telefon komórkowy łączy się z satelitą bez dodatkowej anteny, a konkurenci nie nadążają. Użytkownicy dostają tanią i szybką łączność w każdym miejscu na Ziemi. Państwa, armie i służby ratunkowe stają się jednak klientami jednej firmy, a ostatecznie także rządu jednego kraju, któremu ta firma podlega. Wszystko, co opisaliśmy w rozdziale o pięciu momentach władzy, staje się normą.

Scenariusz B: kilka sieci

Amazon Leo, chińskie sieci Guowang i Qianfan oraz europejski IRIS^2 osiągają pełną liczbę satelitów. Na niebie działa kilka dużych sieci, które ze sobą konkurują, więc ceny spadają, a państwa mogą wybierać. Wybór ma jednak swoją cenę. Terminale różnych sieci nie są zamienne, więc armia albo szpital, które chcą mieć łączność zapasową, muszą kupić i utrzymywać kilka zestawów sprzętu.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 26. Trzy możliwe scenariusze rozwoju łączności satelitarnej do około 2035 r. Kropki oznaczają terminale, a koła sieci różnych operatorów

Na orbicie robi się jeszcze ciaśniej, a do atmosfery trafia jeszcze więcej spalonych satelitów.

Scenariusz C: wspólne zasady

Państwa uzgadniają reguły korzystania z sieci satelitarnych, na przykład jasno określone warunki, na jakich operator może ograniczyć usługę, obowiązek uprzedzania o zmianach i niezależny nadzór. Taki pomysł nie jest fantastyką. Gdy w XIX wieku telegraf połączył kraje Europy, w 1865 r. w Paryżu powstał Międzynarodowy Związek Telegraficzny, poprzednik dzisiejszego Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego, który do dziś koordynuje przydział częstotliwości. W 1964 r. państwa powołały międzynarodowe konsorcjum Intelsat, które przez blisko czterdzieści lat wspólnie zarządzało satelitami łączności. Zawarcie takiego porozumienia dziś byłoby jednak bardzo trudne, gdy najwięksi gracze, czyli Stany Zjednoczone i Chiny, rywalizują ze sobą także na orbicie.

Pytania na koniec

Rzeczywistość będzie najpewniej mieszanką tych trzech scenariuszy. Nie podajemy gotowej odpowiedzi, bo jej nie ma. Zostawiamy natomiast kilka pytań do przemyślenia i do dyskusji, także na lekcji.

Czy prywatna firma powinna mieć prawo ograniczyć łączność armii walczącego państwa, jeśli uważa, że łamie ono regulamin usługi? Kto powinien decydować, gdzie przebiega granica między obroną a atakiem? Czy państwo, które płaci za usługę, powinno mieć wpływ na to, jak ona działa? Ile kosztu dla wspólnego nieba, czyli śmieci kosmicznych, zanieczyszczenia atmosfery i smug na zdjęciach astronomów, jesteśmy gotowi przyjąć w zamian za internet dostępny wszędzie? I wreszcie: czy zbudowanie własnej sieci przez Polskę i Europę to rozsądna inwestycja w bezpieczeństwo, czy kosztowny wyścig z liderem, którego nie da się dogonić?

Jedno jest pewne. Technika, która miała dać internet odległym farmom, stała się w ciągu czterech lat częścią systemu obronnego walczącego państwa, a człowiek, który ją zbudował, zyskał wpływ, jakiego żaden przedsiębiorca wcześniej nie miał. Czy Elon Musk stał się bogiem wojny? Raczej odźwiernym, który trzyma klucz do drzwi, przez które przechodzi ogromna część łączności frontu. Warto, żeby kluczy było więcej, a zasady ich używania były znane wszystkim. ■

Paul Bavarian

O Autorze
Paul Bavarian jest wnukiem mojego bułgarskiego przyjaciela z czasów studenckich w Politechnice Kijowskiej. Pasjonują go nowe technologie, które obserwuje z perspektywy kalifornijskiej. The last but not least – odziedziczył po swoim dziadku fascynację Polską.

Prof. Wiesław Marciniak

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Słowniczek

Antena fazowana – antena złożona z wielu małych elementów, w której kierunek wiązki zmienia się elektronicznie, przez przesunięcie fazy sygnału w poszczególnych elementach, bez obracania anteny. Tak działa terminal Starlink.

APNIC (*Asia-Pacific Network Information Centre*) – organizacja przydzielająca adresy internetowe w regionie Azji i Pacyfiku, prowadząca też badania sieci.

Biała lista – lista terminali dopuszczonych do pracy w sieci. Terminale spoza listy nie dostają łączności.

Brama (ang. *gateway*) – naziemna stacja z dużymi antenami, która łączy satelity z siecią światłowodową, a przez nią z internetem.

CSIS (*Center for Strategic and International Studies*) – amerykański ośrodek analityczny zajmujący się bezpieczeństwem i polityką międzynarodową.

FCC (*Federal Communications Commission*) – Federalna Komisja Łączności, amerykański urząd regulujący łączność i przydzielający licencje na częstotliwości.

FPV (*First Person View*) – widok z pierwszej osoby: sposób sterowania dronem, w którym pilot patrzy na obraz z kamery drona.

GEO (*Geostationary Orbit*) – orbita geostacjonarna, położona 35 786 km nad równikiem. Satelita krąży na niej w tempie obrotu Ziemi, więc z Ziemi wydaje się nieruchomy.

Geofencing – programowe wyznaczanie granic obszaru, w którym usługa działa. Poza tymi granicami terminal nie dostaje łączności.

Impuls właściwy – miara wydajności silnika rakietowego: im większy, tym mniej paliwa lub gazu roboczego potrzeba do tej samej zmiany prędkości (wyjaśnialiśmy w MT11/2026).
Inklinacja – kąt nachylenia płaszczyzny orbity do płaszczyzny równika.

Interferencja – nakładanie się fal. Fale zgodne w fazie wzmacniają się, a przeciwne w fazie osłabiają.

IRIS² (*Infrastructure for Resilience, Interconnectivity and Security by Satellite*) – budowany system bezpiecznej łączności satelitarnej Unii Europejskiej, planowany na 348 satelitów, z pierwszym startem w 2029 r.

ITU (*International Telecommunication Union*) – Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny, organizacja wyspecjalizowana ONZ, która m.in. koordynuje przydział częstotliwości i pozycji orbitalnych. ITU-T to jego sektor normalizacyjny, a G.114 to zalecenie określające dopuszczalne opóźnienie głosu.

KA-SAT – satelita telekomunikacyjny na orbicie geostacjonarnej, obsługujący Europę. 24 lutego 2022 r. atak na jego naziemny system zarządzania unieruchomił dziesiątki tysięcy modemów.

Kesslera zjawisko – hipotetyczna reakcja łańcuchowa zderzeń na orbicie: odłamki z jednej kolizji wywołują kolejne, aż część orbity staje się bezużyteczna.

LEO (*Low Earth Orbit*) – orbita niska, od około 160 do 2000 km nad Ziemią. Satelity Starlink krążą na wysokości około 480…550 km.

Manewr omijania – zmiana orbity satelity wykonywana, gdy prawdopodobieństwo zderzenia z innym obiektem przekroczy ustalony próg.

Mediana – wartość środkowa: połowa pomiarów jest od niej mniejsza, a połowa większa.

MEO (*Medium Earth Orbit*) – orbita średnia, między orbitą niską a geostacjonarną, od około 2000 do 35 786 km.

NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) – amerykańska agencja kosmiczna.

NASK (Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa) – polski państwowy instytut badawczy zajmujący się sieciami i cyberbezpieczeństwem.

Opóźnienie (ang. *latency*) – czas od wysłania pytania do odebrania odpowiedzi, podawany zwykle w milisekundach.

Owiewka – osłona na szczycie rakiety, chroniąca ładunek podczas lotu przez atmosferę.

Pakiet – krótka porcja danych z adresem nadawcy i odbiorcy, w takiej postaci dane wędrują przez internet.

Pasma Ku, Ka i E – zakresy częstotliwości mikrofalowych używane w łączności satelitarnej: Ku około 10…15 GHz (łącze z użytkownikiem), Ka około 18…30 GHz oraz E około 70…90 GHz (łącza z bramami).

Pasmo – zakres częstotliwości przydzielony do transmisji. Im szersze pasmo, tym więcej danych można przesłać.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Pojemność – ilość danych, jaką sieć lub satelita może przesłać w jednostce czasu, wspólna dla wszystkich użytkowników w zasięgu.

PoP (*Point of Presence*) – punkt styku sieci operatora z resztą internetu.

Powłoka orbitalna – grupa satelitów krążących na podobnej wysokości i po orbitach o tej samej inklinacji.

Przepływność – szybkość przesyłania danych, podawana w bitach na sekundę, np. Mb/s, Gb/s lub Tb/s.

Przesunięcie Dopplera – zmiana częstotliwości fali, gdy nadajnik i odbiornik zbliżają się do siebie lub oddalają.

Punkty niezłomności – ogrzewane miejsca w Ukrainie, w których podczas wyłączeń prądu można naładować telefon, skorzystać z łączności i wezwać pomoc.

Silnik Halla – silnik elektryczny, w którym pole elektryczne rozpędza jony gazu, np. argonu lub kryptonu. Daje mały ciąg, ale zużywa bardzo mało gazu.

Starlink Mobile (wcześniej Direct to Cell) – usługa łączności satelitarnej dla zwykłych telefonów komórkowych, w której satelita działa jak stacja bazowa.

Starshield – oddział SpaceX budujący systemy dla wojska i wywiadu USA. Wojskowa usługa łączności Starshield korzysta z konstelacji Starlink, ale ma osobne terminale i silniejsze zabezpieczenia.

Terminal – zestaw użytkownika: płaska antena fazowana z elektroniką i router.

USAID (*United States Agency for International Development*) – Agencja Stanów Zjednoczonych ds. Rozwoju Międzynarodowego.

VPN (*Virtual Private Network*) – wirtualna sieć prywatna: szyfrowane połączenie przez internet, np. do zdalnego dostępu do sieci firmy.

Wiązka – skupiony strumień fal radiowych lub światła, skierowany w wybranym kierunku.

Wielkość gwiazdowa – miara jasności obiektów na niebie. Im większa liczba, tym słabszy obiekt. Gołym okiem widać obiekty do około 6. wielkości.

Zakłócanie – celowe nadawanie silnego sygnału radiowego, który uniemożliwia odbiór właściwego sygnału.

Bibliografia

Godzina przed czołgami

1. SentinelOne: AcidRain, https://www.sentinelone.com/?p=65310
2. BleepingComputer: EU says Russia behind cyberattack on satellite modems in Ukraine, https://www.bleepingcomputer.com/news/security/eu-says-russia-behind-cyberattack-on-satellite-modems-in-ukraine/
3. GovInfoSecurity: Viasat confirms AcidRain malware could have wiped modems, https://www.govinfosecurity.com/viasat-confirms-acidrain-malware-could-have-wiped-modems-a-18824
4. Wikipedia: Viasat hack, https://en.wikipedia.org/wiki/Viasat_hack
5. Space.com: SpaceX Starlink terminals arrive in Ukraine, https://space.com/spacex-starlink-terminals-arrive-ukraine-elon-musk-russia
6. Wikipedia: Starlink in the Russo-Ukrainian War, https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_in_the_Russo-Ukrainian_war
7. Art Institute of Chicago: plakat TASS z 1944 r., https://archive.artic.edu/tass/205984
8. CSIS: Who Controls Ukraine's Starlink Access?, https://csis.org/analysis/who-controls-ukraines-starlink-access

Elementarz

9. SpaceX: Improving Starlink's Latency, https://www.starlink.com/public-files/StarlinkLatency.pdf
10. IETF/IRTF: A Multifaceted Look at Starlink Performance, https://datatracker.ietf.org/meeting/123/materials/slides-123-irtfopen-a-multifaceted-look-at-starlink-performance-00
11. ITU-T: Recommendation G.114, https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=G.114
12. US Air Force AFCENT: It takes a team to fly a Predator, https://www.afcent.af.mil/News/Article/1091585/it-takes-a-team-to-fly-a-predator

Droga jednego pakietu danych

13. APNIC Labs: analiza Starlinka, 2024, https://labs.apnic.net/presentations/store/2024-09-06-starlink-ausnog24.pdf
14. APNIC Labs: analiza Starlinka, 2025, https://labs.apnic.net/presentations/store/2025-05-07-starlink-lacnic.pdf
15. Jonathan McDowell: modele konstelacji Starlink, https://planet4589.org/sci/starsim/oldcon.html
16. Spaceflight Now: SpaceX unveils first batch of larger, upgraded Starlink satellites, https://spaceflightnow.com/2023/02/26/spacex-unveils-first-batch-of-larger-upgraded-starlink-satellites/
17. LightNOW: IR lasers link 9000 Starlink satellites, https://www.lightnowblog.com/2024/02/ir-lasers-link-9000-starlink-satellites-and-move-42-million-gb-per-day
18. Abhishek Goyal: Starlink dish RF deep dive, https://prettyblog.pages.dev/posts/starlink-dish-rf-deep-dive
19. arXiv 2505.04772: wpływ pogody na łączność Starlink, https://arxiv.org/abs/2505.04772

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

20. Fox Business: SpaceX nabs eye-watering wins against Russian hackers, https://www.foxbusiness.com/technology/spacex-nabs-eye-watering-wins-against-russian-hackers-pentagon-says

Fabryka na orbitę
21. H. W. Jones, NASA: The Recent Large Reduction in Space Launch Cost, https://ntrs.nasa.gov/citations/20200001093
22. Space.com: SpaceX shatters its rocket launch record yet again, https://www.space.com/space-exploration/private-spaceflight/spacex-shatters-its-rocket-launch-record-yet-again-167-orbital-flights-in-2025
23. AIAA: SpaceX and China power record-breaking year for orbital launches, https://aiaa.org/2026/01/05/spacex-and-china-power-record-breaking-year-for-orbital-launches/
24. BGR: SpaceX Falcon 9 booster reused for the 37th time, https://www.bgr.com/2273946/spacex-falcon-9-rocket-booster-reuse-37th-time/
25. Wikipedia: List of Falcon 9 and Falcon Heavy launches, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Falcon_9_and_Falcon_Heavy_launches
26. GeekWire: SpaceX is churning out 70 Starlink satellites a week in Redmond, https://www.geekwire.com/2026/spacex-is-churning-out-70-starlink-satellites-a-week-in-redmond-and-other-tidbits-from-its-ipo-filing/
27. Space.com: How SpaceX makes 15,000 Starlink kits a day, https://www.space.com/space-exploration/tech/watch-how-spacex-makes-15-000-starlink-satellite-internet-kits-a-day-video
28. Light Reading: Starship reaches orbit, releases 26 V3 Starlink satellites, https://www.lightreading.com/satellite/starship-reaches-orbit-releases-26-high-capacity-v3-starlink-satellites
29. Universe Magazine: SpaceX presents Starlink V3 satellites, https://universemagazine.com/en/spacex-presents-starlink-v3-satellites-with-1-tbps-speeds
30. Jonathan McDowell: Starlink statistics, https://planet4589.org/space/con/star/stats.html

Starlink w cywilu
31. Broadband Breakfast: Starlink reaches 13.6 million subscribers, https://broadbandbreakfast.com/starlink-reaches-13-6-million-subscribers-globally-as-spacex-revenue-jumps-161/
32. TechCrunch: Starlink will hit 4 million subscribers, https://techcrunch.com/2024/09/26/starlink-will-hit-4-million-subscribers-this-week-spacex-president-says
33. Satnews: Starlink tops 7M customers, https://satnews.com/2025/09/01/forresters-digest-starlink-tops-7m-customers/
34. Advanced Television: Starlink 10m customers and counting, https://www.advanced-television.com/2026/02/16/starlink-10m-customers-and-counting
35. CHIP.pl: cennik Starlinka w Polsce, lipiec 2026, https://www.chip.pl/2026/07/musk-znowu-miesza-w-cenniku-starlinka-zobacz-ile-teraz-zaplacisz-za-sprzet-i-abonament
36. Advanced Television: Over 5,700 aircraft have Starlink WiFi, https://www.advanced-television.com/2026/02/27/over-5700-aircraft-have-starlink-wifi/
37. RNZ: How one tweet got Tonga 50 satellite terminals, https://www.rnz.co.nz/international/pacific-news/462270/how-one-tweet-got-tonga-50-satellite-terminals
38. Scientific American: Starlink offers internet access in times of crisis, https://www.scientificamerican.com/article/starlink-offers-internet-access-in-times-of-crisis-but-is-it-just-a-pr-stunt/
39. SpaceX: Starlink Disasters Case Study, https://api.starlink.com/public-files/SpaceX-Starlink-Disasters-Case-Study.pdf
40. Fierce Network: MWC 2026: Starlink Mobile unveils plans, https://www.fierce-network.com/wireless/mwc-starlink-mobile-unveils-plans-v2-satellites-and-more
41. Communications Daily: EchoStar agrees to sell spectrum to SpaceX, https://communicationsdaily.com/news/2025/09/09/EchoStar-Agrees-to-Sell-Spectrum-to-SpaceX-Raising-Many-Questions-2509080052

Wojna na łączu
42. Belfer Center: Starlink and the Russia-Ukraine War, https://www.belfercenter.org/index%2Ephp/publication/starlink-and-russia-ukraine-war-case-commercial-technology-and-public-purpose
43. Rząd Ukrainy: prawie 30 tysięcy terminali Starlink, https://www.kmu.gov.ua/en/news/mykhailo-fedorov-komandi-mintsyfry-vdalos-zabezpechyty-maizhe-30-tysiach-starlinkiv-dlia-ukrainy
44. Meduza: How Ukraine's military uses Starlink, https://meduza.io/en/feature/2026/10/16/how-ukraine-s-military-uses--starlink-and-what-would-happen-if-the-trump-administration-cut-off-its-satellite-communications-entirely
45. Il Foglio: Satellite restrictions are hampering the Kyiv army (George Barros, ISW), https://www.ilfoglio.it/en/world/2026/10/29/news/satellite-restrictions-are-hampering-the-kyiv-army-at-a-crucial-moment-says-barros-of-the--isw--412013
46. Defense News: What is Starshield, https://www.defensenews.com/industry/techwatch/2026/10/16/what-is-starshield-spacexs-military-version-of-starlink
47. Bloomberg Government: SpaceX gets US contract to expand Ukraine's access to Starshield, https://news.bgov.com/bloomberg-government-news/spacex-gets-us-contract-to-expand-ukraines-access-to-starshield
48. Truthout: Starlink reportedly tried to upsell Ukraine, https://truthout.org/articles/starlink-reportedly-tried-to-upsell-ukraine-on-new-plan-after-throttling-service/
49. GlobalSecurity: Starlink – Paying the Piper, https://www.globalsecurity.org/space/world/ukraine/starlink-2.htm
50. Space.com: Pentagon confirms it's buying Starlink services for Ukraine, https://www.space.com/pentagon-buying-spacex-starlink-services-ukraine
51. Defense One: SpaceX now says it doesn't want Starlink weaponized, https://www.defenseone.com/technology/2023/02/spacex-now-says-they-dont-want-starlink-be-weaponized-ukraine/382797/
52. Notebookcheck: Starlink Mini specs, https://www.notebookcheck.net/Starlink-Mini-priced-at-599-as-SpaceX-makes-weight-specs-official-and-offers-Mini-Roam-plan-for-30-month.850231.0.html

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Bóg z wyłącznikiem
53. Jalopnik: korekta „The Washington Post" w sprawie Krymu, https://jalopnik.com/musk-turned-off-starlink-in-crimea-before-ukraine-attac-1850825298?rev=1694447247433
54. Yahoo/Kyiv Independent: Reuters o wyłączeniu w obwodzie chersońskim, https://www.yahoo.com/news/articles/musk-ordered-starlink-shutdown-during-142037065.html
55. Notes from Poland: Rubio and Musk criticise Polish foreign minister, https://notesfrompoland.com/2025/03/09/rubio-and-musk-criticise-polish-foreign-minister-in-dispute-over-ukraine-starlinks/
56. GlobalSecurity: Starlink – 2026 Whitelist, https://www.globalsecurity.org/space/world/ukraine/starlink-5.htm
57. SAN: Musk ordered Ukraine's Starlink slowdown, https://san.com/cc/musk-ordered-ukraines-starlink-slowdown-trump-administration-denies-prior-knowledge/
58. Breitbart: Musk confirms SpaceX throttled Starlink access, https://www.breitbart.com/tech/2026/10/26/elon-musk-confirms-spacex-throttled-starlink-access-for-ukraine-military/
59. Money.pl: Musk może zmusić Ukrainę do płacenia więcej za Starlink, https://www.money.pl/polityka/musk-moze-zmusic-ukraine-do-placenia-setek-razy-wiecej-za-starlink-7345288743246272a.html

Polska w tej historii
60. Rzeczpospolita: Starlinki nie tylko dla Ukrainy, https://www.rp.pl/sluzby/art42147451-starlinki-nie-tylko-dla-ukrainy-obslugiwaly-takze-wybory-w-polsce
61. Super Biz: Koszt Starlinków dla Ukrainy, https://superbiz.se.pl/wiadomosci/koszt-starlinkow-dla-ukrainy-tyle-polska-zaplacila-w-planach-kolejny-rok-wsparcia-aa-HfsA-UWtf-5wXp.html
62. RMF24: Podano liczbę Starlinków przekazanych Ukrainie, https://www.rmf24.pl/wojna-w-ukrainie/news-podano-liczbe-starlinkow-ktore-przekazalismy-ukrainie,nId,8067188
63. Notes from Poland: Poland complains to Starlink over roaming exclusion, https://notesfrompoland.com/2026/08/12/poland-complains-to-starlink-over-exclusion-from-european-roaming-zone/
64. Polskie Radio: Poland restored to Starlink's European Roam region, https://polskieradio.pl/395/7785/Artykul/3719986,poland-restored-to-starlinks-european-roam-region-after-government-protests
65. Notes from Poland: Poland joins IRIS², https://notesfrompoland.com/2026/07/21/poland-joins-eu-satellite-project-developing-european-alternative-to-starlink/
66. Defence24: Poland enters a new era in satellite reconnaissance, https://defence24.com/geopolitics/poland-enters-a-new-era-in-satellite-reconnaissance
67. Super Biz: Tusk zapowiada polskiego Starlinka, https://superbiz.se.pl/wiadomosci/tusk-zapowiada-polskiego-starlinka-to-nie-jest-mrzonka-aa-z7r3-eLQ5-1ZoS.html
68. Dlapilota.pl: kolejne wojskowe satelity obserwacyjne na orbicie, https://dlapilota.pl/wiadomosci/polska/kolejne-wojskowe-satelity-obserwacyjne-zostaly-wyniesione-na-orbite-w-kosmosie

Kto zbuduje drugą sieć
69. Jonathan McDowell: zestawienie konstelacji, https://planet4589.org/space/con/conlist.html
70. Komisja Europejska: EU accelerating and reinforcing IRIS², https://defence-industry-space.ec.europa.eu/european-union-accelerating-and-reinforcing-iris2-2026-08-07_en
71. Light Reading: Amazon Leo still tracking for 2026 service launch, https://lightreading.com/satellite/amazon-leo-still-tracking-for-2026-service-launch-as-satellite-production-ramps
72. China in Space: China's mega-constellations, https://www.china-in-space.com/i/147539531/2026
73. RussianSpaceWeb: start satelitów Rassvet, https://russianspaceweb.com/spacecraft-2026-0323.html
74. Kyiv Post: Rassvet will launch commercially in 2027, https://www.kyivpost.com/amp/post/77616
75. Tech Insider: Europe can't swap thousands of Starlink terminals, https://tech-insider.org/europe-starlink-thousands-terminals-ukraine-2026/
76. ABC News: China recovers rocket stage on land for first time, https://abcnews.com/Technology/wireStory/china-recovers-rocket-stage-land-time-after-earlier-135760409

Rachunek za niebo
77. RCR Wireless: Starlink to descend satellites for space safety, https://www.rcrwireless.com/20260106/networks/starlink-to-descend-satellites-for-space-safety
78. Space.com: Every Starlink satellite has to dodge a collision almost weekly, https://www.space.com/space-exploration/satellites/every-spacex-starlink-satellite-has-to-dodge-a-collision-almost-weekly-and-experts-fear-the-worst
79. Space.com: Starlink 50,000 collision avoidance maneuvers, https://www.space.com/spacex-starlink-50000-collision-avoidance-maneuvers-space-safety
80. Advanced Television: Starlink explains real risks of orbital collision, https://www.advanced-television.com/2025/07/30/starlink-explains-real-risks-of-orbital-collision/
81. The Register: Starlink is burning up one or two satellites a day, https://www.theregister.com/2025/10/06/starlink_vaporizes_satellites_daily/
82. AGU: Satellite megaconstellations may jeopardize recovery of ozone hole, https://news.agu.org/press-release/satellite-megaconstellations-burn-deplete-ozone/
83. Space.com: Can the Vera Rubin Observatory function in the megaconstellation age?, https://www.space.com/astronomy/satellite-streaks-can-the-huge-new-vera-rubin-observatory-function-in-the-megaconstellation-age

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Koniec radia UKF Ogłoszony, odwołany

13 grudnia 2017 roku w okręgach Troms i Finnmark zamilkły ostatnie nadajniki ogólnokrajowej sieci radiowej na falach ultrakrótkich. Norwegia była pierwszym krajem, który wyłączył ogólnokrajową sieć UKF – fale ultrakrótkie, po angielsku VHF; w Europie radio analogowe nadaje w tym zakresie, od 87,5 do 108 MHz, z modulacją częstotliwości – i zrobiła to w dziesięciu krokach, region po regionie, od stycznia do grudnia tamtego roku.

Siedem lat później poszła za nią Szwajcaria: 31 grudnia 2024 roku nadawca publiczny SRG SSR wyłączył swoje anteny UKF. Wyglądało to na początek ciągu. Prywatne stacje szwajcarskie miały zejść z anteny do końca 2026 roku, a w kolejce stały następne kraje.

I wtedy ciąg się odwrócił. 9 grudnia 2025 roku szwajcarska Rada Kantonów, stosunkiem głosów 21 do 18 przy pięciu wstrzymujących się, przyjęła – po Radzie Narodowej, która zrobiła to w sesji jesiennej – wniosek zobowiązujący rząd do odstąpienia od wyłączenia. Urząd łączności BAKOM rozpisał nowy przydział częstotliwości, a koncesje, które ma wydać do końca 2026 roku, są ważne do 31 grudnia 2034 roku. SRG SSR – ten sam, który wyłączył UKF rok wcześniej – zapowiedział powrót na antenę analogową już w komunikacie z 11 grudnia 2025 roku, daty jednak nie podał; koncesję na lata 2026–2034 podpisał 18 września 2026 roku. We wrześniu 2026 roku Norwegia przedłużyła koncesje lokalnego radia UKF do końca 2031 roku.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Rok 2026 jest więc w tej historii rokiem osobliwym. Nie kończy się w nim radio UKF. Kończą się plany jego wyłączenia.

Warto zrozumieć, dlaczego – bo odpowiedź jest w połowie fizyczna, a w połowie arytmetyczna, i obie połowy są ciekawe.

Co właściwie wyłączono w Norwegii

Najpierw sprostowanie, bo w obiegu krąży wersja skrócona. Norwegia nie wyłączyła radia UKF. Wyłączyła sieć ogólnokrajową – programy nadawcy publicznego NRK oraz dwie sieci komercyjne – a dodatkowo komercyjne radio lokalne w jedenastu obszarach koncesyjnych wokół Oslo, Bergen, Trondheim i Stavanger. Poza tymi obszarami lokalne stacje nadają na UKF do dziś, a we wrześniu 2026 roku regulator mediów przedłużył im koncesje programowe do 31 grudnia 2031 roku.

Przejście było przygotowane lepiej niż gdziekolwiek indziej. Warunkiem wyłączenia było osiągnięcie przez sieć cyfrową zasięgu 99,5 procent ludności, co regulator telekomunikacyjny Nkom zmierzył dla sieci nadawcy publicznego i potwierdził w 2015 roku. Dane o skutkach też są, i to urzędowe. Od pierwszego kwartału 2016 do pierwszego kwartału 2019 roku odsetek Norwegów słuchających radia wyłącznie cyfrowo wzrósł z 27 do 77 procent, a słuchających wyłącznie przez UKF spadł z 37 do 3 procent. Liczba odbiorników cyfrowych wzrosła z 3,3 do 6 milionów, a odbiorników UKF spadła z 9,2 do 3,6 miliona.

Cena też jest policzona. W miesiącu dwóch ostatnich wyłączeń dzienny zasięg kanałów ogólnokrajowych spadł z 62,2 do 59,4 procent, a w kolejnym miesiącu do 56,9 procent; czas słuchania skrócił się odpowiednio z 77 do 74, a potem do 71 minut dziennie. Regulator sam zastrzega, że większego spadku rok do roku nie należy przypisywać samemu wyłączeniu, tylko cyfryzacji w ogóle – ale te dwa kroki po kilka punktów procentowych są przypisane wyłączeniom wprost.

Dlaczego UKF jest tak trudny do zastąpienia

Teraz fizyka, bo bez niej cała reszta jest niezrozumiała.

Modulacja częstotliwości wzięła się z pracy, którą Edwin Armstrong ogłosił w maju 1936 roku w piśmie amerykańskiego Instytutu Inżynierów Radiowych. Pomysł jest przewrotny: zamiast oszczędzać pasmo, rozrzucić sygnał na pasmo wielokrotnie szersze, niż wymaga sam dźwięk – i uzyskać za to odporność na zakłócenia. Armstrong zapisał to zdaniem, które jest sednem sprawy: między dwoma układami z modulacją częstotliwości o różnej szerokości pasma

Dlaczego szerokie pasmo poprawia stosunek sygnału do szumu

Miarą jest stosunek dewiacji: iloraz największego odchylenia częstotliwości nośnej od jej wartości nieodmodulowanej przez najwyższą częstotliwość modulującą. W nadawaniu monofonicznym najwyższą częstotliwością modulującą jest górna granica pasma akustycznego, czyli 15 kHz, a dewiacja wynosi w Europie Zachodniej najwyżej ±75 kHz – stosunek dewiacji równa się więc pięć. W stereofonii ta sama definicja daje inną liczbę, bo najwyższą częstotliwością modulującą nie jest już pasmo akustyczne, lecz górna granica multipleksu pasma podstawowego, sięgająca 75 kHz razem z pilotem, sygnałem różnicowym i podnośną danych. Liczba pięć i cały zysk z tej ramki dotyczą więc monofonii.

Murray Crosby podał rok po Armstrongu zależność, która z tego wynika: dla szumu fluktuacyjnego, czyli termicznego, poprawa stosunku napięcia sygnału do napięcia szumu – liczona na wyjściu detektora względem stosunku na jego wejściu – jest równa pierwiastkowi z trzech pomnożonemu przez stosunek dewiacji. Dla szumu impulsowego Crosby podaje inną zależność: dwukrotność stosunku dewiacji. Dla naszej piątki daje to około 8,7 razy w napięciu, czyli 75 razy w mocy – niespełna 19 decybeli. To przeliczenie jest redakcyjne; Crosby podaje sam wzór.

I teraz rzecz, bez której powyższe jest nieprawdą. Zysk obowiązuje tylko powyżej progu. Gdy sygnał słabnie na tyle, że szum zaczyna dorównywać nośnej, zysk znika, a odbiornik zachowuje się mniej więcej tak jak równoważny odbiornik z modulacją amplitudy. Armstrong wiedział o tym i zapisał to w nawiasie już w 1936 roku, zastrzegając, że jego reguła obowiązuje, dopóki napięcie szumu na ograniczniku jest mniejsze od napięcia sygnału.

Ale – i to jest cała tajemnica długowieczności UKF – „poniżej progu” nie znaczy „nic nie słychać”. Znaczy „słychać gorzej”. Audycja tonie w szumie stopniowo, a słowa dają się zrozumieć jeszcze długo po tym, jak muzyka przestaje być przyjemna.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

stosunek mocy sygnału do mocy szumu na wyjściu detektora zmienia się wprost proporcjonalnie do kwadratu szerokości pasma. Podwojenie pasma daje poprawę czterokrotną, dziesięciokrotne poszerzenie – stukrotną.

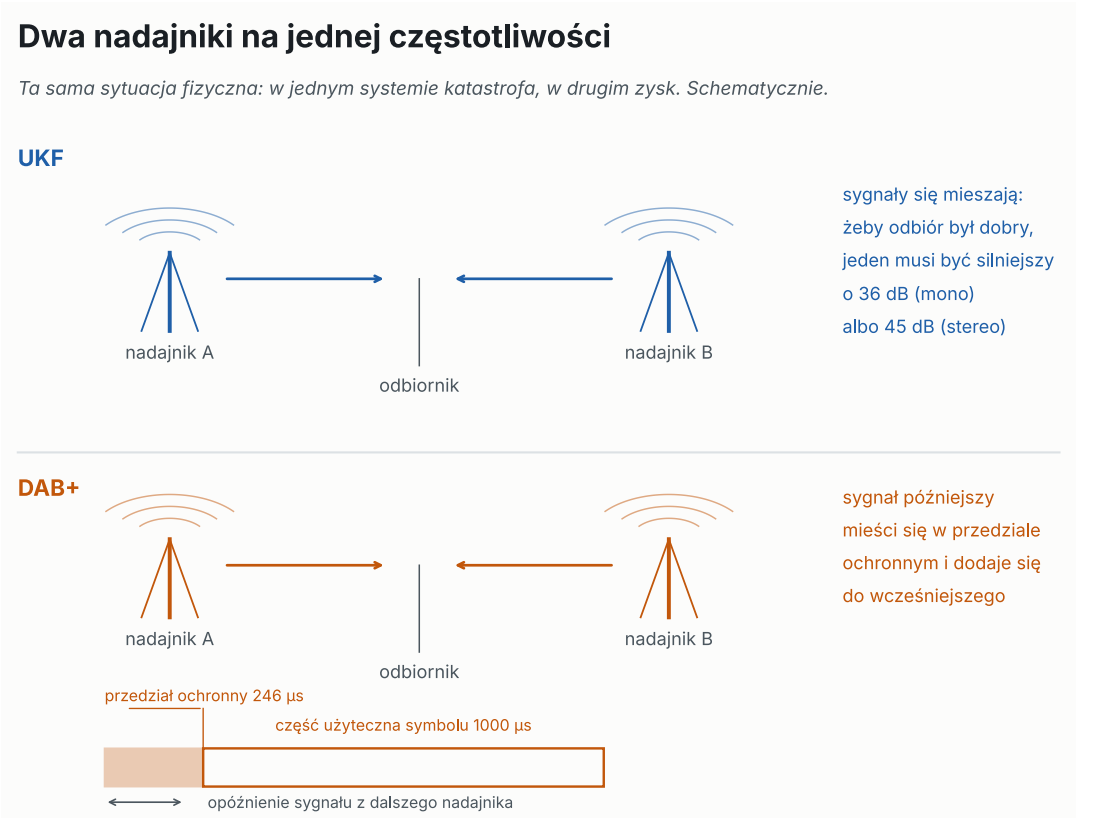
W tym samym artykule jest liczba, która robi wrażenie do dziś: w doświadczeniu Armstronga pięćdziesiąt watów mocy w antenie z modulacją częstotliwości dawało stosunek sygnału do szumu porównywalny z nadajnikiem dwukilowatowym z modulacją amplitudy. Czterdzieści razy mniej mocy przy tej samej jakości – choć trzeba dodać, że porównanie dotyczyło konkretnego toru doświadczalnego, nie było regułą ogólną.

Co w zamian daje radio cyfrowe

System DAB+ – Digital Audio Broadcasting plus, czyli naziemna radiofonia cyfrowa – działa zupełnie inaczej. Zamiast jednej nośnej używa ich 1536, w trybie pierwszym – jedynym, jaki norma przewiduje dziś dla nadawania naziemnego – rozstawionych co 1 kHz. Iloczyn 1536 razy 1 kHz daje 1,536 MHz i tyle właśnie zajmuje jeden blok, zwany multipleksem. Ile zmieści się w nim programów, nie wynika z normy – norma ogranicza tylko liczbę podkanałów do dwudziestu czterech; w europejskiej praktyce nadaje się kilkanaście.

Czas użyteczny symbolu wynosi w tym systemie 1000 mikrosekund, a przed każdym symbolem nadawany jest przedział ochronny długości 246 mikrosekund, będący powtórzeniem jego końcówki – cały symbol zajmuje więc 1246 mikrosekund. Pojemność kanału głównego wynosi 2304 kilobity na sekundę; norma podaje dla całego zespołu (ensemble – to ten sam blok, który wyżej nazwaliśmy multipleksem) „nieco ponad 2,4 megabita na sekundę" i nie ma w tym sprzeczności – różnicę, 96 kilobitów, zabiera kanał szybkiej informacji (Fast Information Channel, FIC), który przenosi opisy programów, a nie dźwięk.

Dźwięk koduje się w DAB+ metodą HE-AAC drugiej wersji (*High Efficiency Advanced Audio Coding v2*), a całość zabezpiecza dodatkowo kodem



Rysunek 1. Dwa nadajniki na jednej częstotliwości

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Reeda-Solomona, którego w pierwotnym systemie DAB nie było. Europejska Unia Nadawców szacuje, że jakość lepszą niż stereofonia UKF daje około 80 kilobitów na sekundę – ale w tym samym akapicie zastrzega, że co do przepływności odpowiadającej danej jakości opinie są podzielone. Nadawca może wybrać mniej i upchnąć więcej programów; górny pułap to około 175 kilobitów na sekundę na dźwięk. Zdanie „DAB+ brzmi lepiej niż UKF" jest więc prawdziwe warunkowo, a warunek wybiera nadawca.

Ta sama sytuacja, dwa przeciwne skutki

Najistotniejsza różnica między tymi systemami ujawnia się wtedy, gdy dwa nadajniki pracują na tej samej częstotliwości.

W UKF jest to katastrofa. Zalecenia planistyczne Międzynarodowego Związku Telekomunikacyjnego podają, że przy zerowym odstępie nośnych i zakłóceniu stałym sygnał użyteczny musi być silniejszy od zakłócającego o 36 decybeli, żeby odbiór monofoniczny był zadowalający, i o 45 decybeli przy stereofonicznym; przy zakłóceniu troposferycznym, zmiennym w czasie, wymagania są niższe – 28 i 37 decybeli. Dlatego nadajniki UKF nadające ten sam program muszą pracować na różnych częstotliwościach, a jadąc samochodem trzeba przestrajać odbiornik.

W DAB+ ta sama sytuacja jest zyskiem. Jeżeli sygnał z dalszego nadajnika dociera opóźniony o mniej niż 246 mikrosekund, mieści się w przedziale ochronnym i nie powoduje zakłócenia międzysymbolowego – energia echa dodaje się do energii sygnału użytecznego. Cała sieć może więc pracować na jednej częstotliwości, a dokładanie nadajników poprawia pokrycie tak długo, jak długo różnice dróg pozostają w przedziale ochronnym; sygnał spóźniony bardziej zakłóca odbiór jak każdy inny. Granicę wyznacza droga, jaką światło przebywa w czasie przedziału ochronnego: 246 mikrosekund to niecałe 74 kilometry. W praktyce planistycznej przyjmuje się mniej – sieć odniesienia w dokumentach Związku ma nadajniki co 60 kilometrów – bo w przedziale ochronnym muszą się zmieścić także odbicia od terenu.

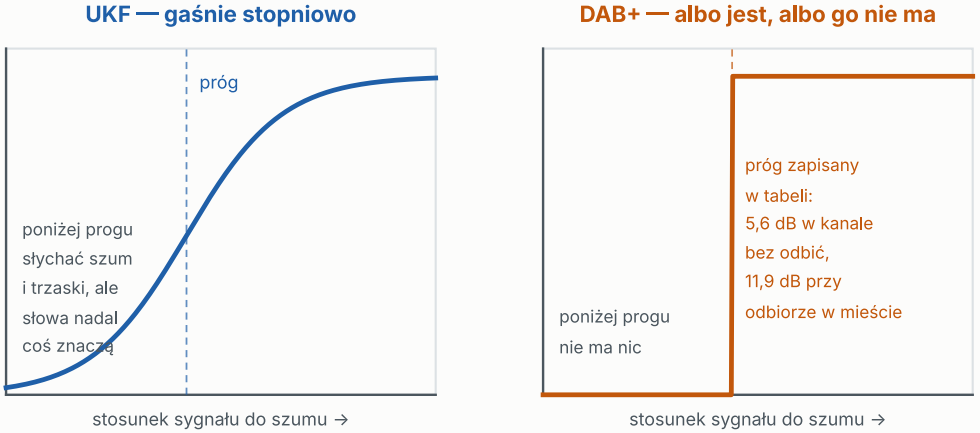
Granica przeniosła się z odbiornika do systemu

I tu dochodzimy do rzeczy najważniejszej, która tłumaczy wszystkie odwołane terminy.

W UKF to, gdzie przebiega granica między „jeszcze słychać" a „już nie", jest w dużej mierze właściwością odbiornika. Norma IEC 60315-4 definiuje metodę pomiaru współczynnika przechwytu – wielkości mówiącej, o ile silniejszy od drugiego musi być jeden z dwóch

Dwa progi: jak gaśnie odbiór

Schematycznie. Oś pionowa to zrozumiałość audycji, nie wielkość mierzalna.



W UKF o tym, gdzie leży próg, decyduje w dużej mierze sam odbiornik: norma IEC 60315-4 podaje metodę pomiaru, a nie wartość. W DAB+ próg jest własnością systemu — wartości stosunku nośnej do szumu dla profilu ochrony EEP-3A podaje tablica 8 opracowania EBU Tech 3391.

Rysunek 2. Jak gaśnie odbiór w obu systemach

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

sygnałów nadających na tej samej częstotliwości, żeby odbiornik wybrał właśnie jego – ale nie podaje żadnej wartości, bo taka wartość nie istnieje jako stała. Zależy od jakości ogranicznika i detektora w konkretnym urządzeniu. Lepszy odbiornik naprawdę radzi sobie w gorszych warunkach lepiej.

W DAB+ granica jest zapisana w tablicy. Opracowanie planistyczne Europejskiej Unii Nadawców podaje dla profilu ochrony EEP-3A, tego, który stosuje się w DAB+, wymagany stosunek nośnej do szumu: 5,6 decybela w kanale bez odbić, czyli przy odbiorze stacjonarnym, 11,9 decybela w kanale odwzorowującym odbiór w ruchu w mieście i 12,6 decybela w kanale odwzorowującym odbiór w ruchu na obszarze wiejskim. Dla innych profili liczby są inne – dla profilu UEP-3, używanego w pierwotnym DAB, próg w kanale bez odbić wynosi 7,4 decybela. To są własności systemu, nie egzemplarza odbiornika.

A przejście przez tę granicę opisuje ten sam dokument zdaniem dość dosadnym: „zasięg usługi cyfrowej charakteryzuje się bardzo szybkim przejściem od odbioru niemal doskonałego do zupełnego braku odbioru". Unia Nadawców ma na to zjawisko własną nazwę: „cliff edge", krawędź urwiska. „Urwisko" w tym tekście jest naszym skrótem tej nazwy, nie terminem Unii.

Zyskaliśmy przewidywalność: inżynier planujący sieć cyfrową wie, gdzie kończy się zasięg, bo ma to w tabeli. Zapłaciliśmy tym, że za tą linią nie ma już nic. Stare radio w szumie dawało pogodę i komunikat; nowe w tym samym miejscu milczy.

Rachunek, który przemawiał za zmianą

Argumenty za cyfryzacją były jednak mocne i warto je podać, bo nie przestały obowiązywać.

Pierwszy to widmo. Jedna stacja UKF zajmuje 180 kiloherców w monofonii i 300 kiloherców w stereofonii z podnośną dodatkową – szerzej nie dlatego, że dewiacja jest większa, bo jest ta sama, ±75 kHz, ale dlatego że najwyższa częstotliwość modulująca rośnie z 15 kHz pasma akustycznego do 75 kHz górnej granicy multipleksu. W planie częstotliwości stacja kosztuje jeszcze więcej, niż zajmuje: siatka ma krok 100 kHz, ale przy odstępie nośnych równym jednemu krokowi zalecenie planistyczne wymaga dla stereofonii 33 decybeli przewagi sygnału użytecznego, więc kanały sąsiednie w tym samym obszarze pozostają puste. Jeden multipleks cyfrowy zajmuje 1,536 MHz i mieści w praktyce kilkanaście programów. Dla polskiego regulatora to dziś argument rozstrzygający: w październiku 2026 roku Urząd Komunikacji Elektronicznej napisał wprost, że wolnych częstotliwości dla nowych stacji analogowych w zakresie 87,5...108 MHz praktycznie nie ma.

Drugi to energia. Bawarski regulator mediów i bawarski nadawca publiczny policzyli to wspólnie w 2021 roku dla konkretnych sieci. Bawarskie radio publiczne zużywało na jeden program ponad milion kilowatogodzin rocznie w UKF i około ćwierć miliona w DAB+. Deutschlandradio zeszło z dwóch milionów do sześciuset dwudziestu tysięcy, czyli o 69 procent. Oszczędności autorzy podsumowali przedziałem od 70 do 90 procent – z wyraźnym zastrzeżeniem, że dotyczy to zbadanych obszarów i stacji.

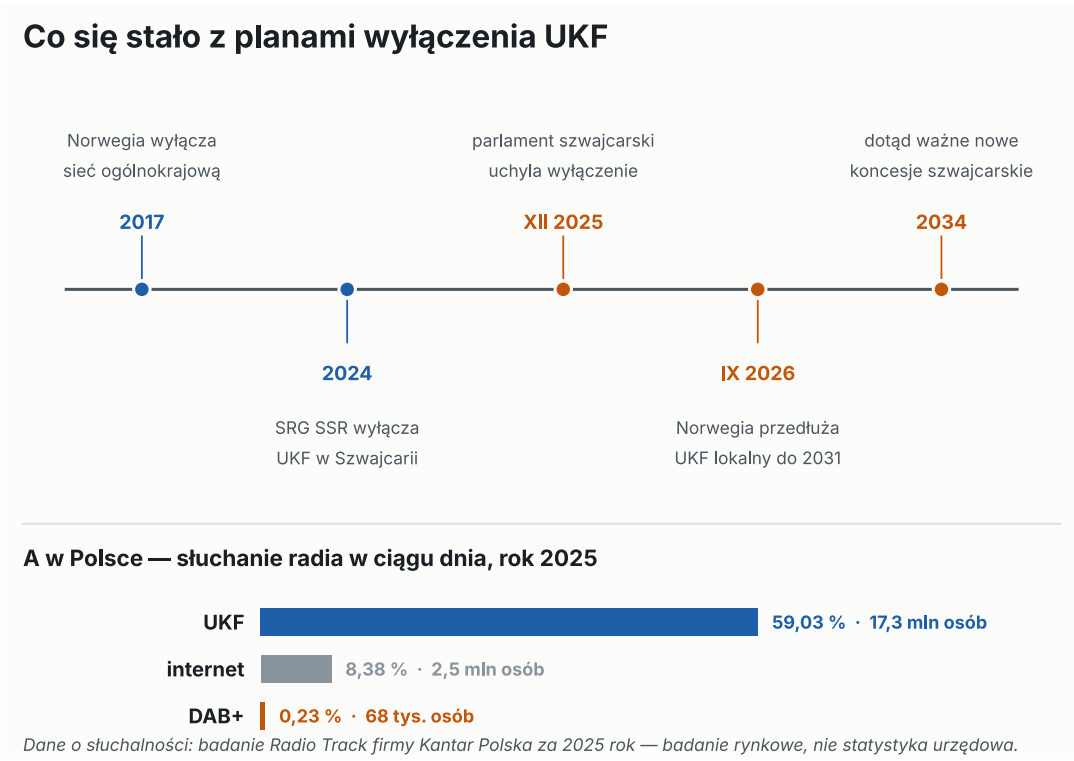
Ten sam dokument zawiera jednak przypadek, który tłumaczy mechanizm lepiej niż cała reszta. Stacja Klassik Radio zużywała w UKF 65 725 kilowatogodzin rocznie, a jej sieć cyfrowa – 80 802. Więcej, nie mniej. Zużycie na program spadło dopiero dlatego, że w tym samym multipleksie jest wiele programów. Oszczędność nie bierze się z tego, że nadawanie cyfrowe jest samo w sobie oszczędne, tylko z tego, że jeden nadajnik dzieli się na kilkanaście stacji. Nadawca, który ma w multipleksie jeden program, może więc zużyć więcej energii niż w UKF – i tak było u Klassik Radio.

Dlaczego plany upadły

Szwajcarzy, którzy przeszli przez to najdalej, zostawili po sobie najlepszą dokumentację powodów.

Pierwszy jest arytmetyczny. Nadawca publiczny wyłączył UKF w solidarności z resztą branży, przy założeniu, że do końca 2026 roku wyłączą go wszyscy. Część nadawców prywatnych nie była na to gotowa – i wtedy wyłączenie przestało być wspólnym krokiem, a stało się jednostronną utratą słuchaczy. W komunikacie z grudnia 2025 roku SRG SSR napisał, że dziewięć z dziesięciu minut słuchania radia w Szwajcarii odbywa się już cyfrowo, i w tym samym tekście zapowiedział powrót na UKF. Tej dziesiątej minuty nadawca nie chciał oddać.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 3. Oś czasu za komunikatami: norweskiego nadawcy publicznego NRK i regulatora Medietilsynet, szwajcarskiego nadawcy SRG SSR, parlamentu Szwajcarii z 9 grudnia 2025 roku oraz urzędu BAKOM z 2026 roku. Słuchalność w Polsce – badanie Radio Track firmy Kantar Polska za 2025 rok, czyli badanie rynkowe, nie statystyka urzędowa

W pomiarze urzędowym jest jej nawet trochę więcej. Wiosną 2025 roku, już po wyłączeniu nadawcy publicznego, UKF odpowiadał w Szwajcarii za 13 procent całego słuchania radia – nadawca zaokrąglił, urząd policzył – wyłącznie przez UKF słuchało 7 procent ludności, a w samochodzie przez UKF słuchano mniej więcej jednej trzeciej czasu.

Drugi powód jest poważniejszy, a polskiego odpowiednika tego stanowiska nie ma w żadnym urzędowym dokumencie, do którego dotarliśmy. Szwajcarski federalny urząd ochrony ludności prowadzi system informowania ludności w sytuacjach kryzysowych, który opiera się na UKF: specjalnie chronione nadajniki awaryjne wielkiej mocy, nadające wzmocniony sygnał analogowy, odbierany także w schronach i piwnicach do drugiej kondygnacji podziemnej. Rada rządowa kantonu Schwyz w marcu 2026 roku odpowiedziała na interpelację w tej sprawie zdaniem, które warto zapamiętać: zdaniem kantonu, zanim ten system zostanie zlikwidowany, musi wcześniej istnieć system redundantny. Kanton zapowiedział przy tym, że wyłączeniu będzie się u władz federalnych sprzeciwiał. To stanowisko jednego kantonu, nie przepis.

Dla porządku trzeba dodać, że Norwegowie ocenili to odwrotnie. Tamtejszy urząd ochrony ludności uznał w 2016 roku skutki wyłączenia UKF dla gotowości kryzysowej za „niepewne, ale najprawdopodobniej niewielkie". Spór nie jest więc rozstrzygnięty – i właśnie dlatego jest ciekawy.

Reszta Europy czeka. Rząd brytyjski zadeklarował w stanowisku z 2022 roku, że radio analogowe zostanie utrzymane co najmniej do 2030 roku, i zapowiedział powrót do sprawy w 2026 roku – wyniku tego przeglądu jeszcze nie znamy. Francuski regulator Arcom pisze wprost, że DAB+ ma współistnieć z UKF, bo – inaczej niż w telewizji – może. Ani Niemcy, ani Dania, ani Włochy nie mają urzędowej daty wyłączenia.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

A w Polsce

W Polsce nie ma daty wyłączenia UKF. Nie ma też ustawy o cyfryzacji radia ani rządowego planu działań.

Jedyny polski dokument urzędowy, w którym pojawia się jakikolwiek termin, to stanowisko Krajowej Rady Radiofonii i Telewizji z 13 września 2022 roku. Rada uznała w nim za zasadne „pilne podjęcie działań zmierzających do wyłączenie emisji analogowej FM w terminie do 31 grudnia 2026 r., jednak nie później niż do 31 grudnia 2030 r." – pisownia oryginalna – i to dla programów ogólnopolskich, z wyłączeniem programów o zasięgu lokalnym. Obwarowała to trzema kryteriami: zasięgiem cyfrowym co najmniej 90 procent ludności dla ogólnopolskich programów radia publicznego, 80 procent dla ogólnopolskich programów nadawców niepublicznych i co najmniej 50 procent słuchalności przez radio cyfrowe. Wezwała przy tym rząd do przyjęcia planu działań i do uchwalenia ustawy o wdrożeniu radiofonii cyfrowej. Ani planu, ani ustawy nie ma. Stanowisko regulatora nie jest aktem prawnym i nie wyznacza nikomu terminu.

Dlaczego warunki nie zostały spełnione, widać po jednej liczbie. W badaniu Radio Track firmy Kantar Polska za 2025 rok radia przez DAB+ słuchało dziennie 0,23 procenta Polaków w wieku od piętnastu do siedemdziesięciu pięciu lat, czyli około sześćdziesiąt osiem tysięcy osób. Przez UKF – 59,03 procenta, czyli ponad siedemnaście milionów. Przez internet 8,38 procenta. To badanie rynkowe, nie statystyka urzędowa, i przy tak małych udziałach obciążone sporym błędem – ale rząd wielkości jest niesporny i przy kryterium „50 procent słuchalności cyfrowej" nie ma o czym dyskutować.

Stan techniczny jest przy tym lepszy, niż te liczby sugerują. Działa jeden multipleks ogólnokrajowy z kilkunastoma programami i rozszczepieniem regionalnym oraz multipleksy lokalne w siedmiu miastach, po około dziesięć programów każdy. Nierozdysponowane pozostają dwa multipleksy ogólnokrajowe i siedemnaście lokalnych. Regulator szacuje, że mogłoby na nich pojawić się nawet dwadzieścia cztery programy dostępne w całym kraju i kolejne dwanaście lokalnie – i w październiku 2026 roku zapytał rynek, czy jest na nie zapotrzebowanie.

Warto przy okazji rozbroić dwa twierdzenia, które krążą jako fakty. Po pierwsze, Unia Europejska niczego nie zakazała: dyrektywa z 2018 roku wymaga jedynie, żeby fabryczny radioodbiornik w nowym samochodzie osobowym wprowadzanym do obrotu od 21 grudnia 2020 roku potrafił odbierać naziemne radio cyfrowe. Nie dotyczy to ani radioodbiorników kupowanych osobno, ani samochodów używanych, ani sprzętu domowego, i nie zawiera żadnej daty wyłączenia czegokolwiek. Po drugie, w Polsce nie wolno sprzedawać odbiornika DAB+, który nie odbiera UKF: polskie rozporządzenie wymaga, żeby odbiornik radiofonii cyfrowej poza prostymi przystawkami odbierał również analogowe pasmo 87,5...108 MHz. Odwrotnego przepisu – żeby każdy sprzedawany odbiornik odbierał DAB+ – nie ma; dotyczy to tylko fabrycznych radioodbiorników w nowych samochodach.

Co dalej

Trzy rzeczy wydają się w tej chwili pewne.

Radio UKF nie zniknie, dopóki istnieją dwa powody, dla których trzyma się go w Szwajcarii: kupione już odbiorniki i rola kanału ostatniej szansy. Oba są nietechniczne i oba są mocne.

DAB+ będzie rósł tam, gdzie w UKF nie ma już miejsca – a w Polsce praktycznie go nie ma. Każdy nowy program ogólnokrajowy może dziś powstać wyłącznie cyfrowo, i to jest powód, dla którego cyfryzacja radia w Polsce prędzej czy później się dokona, tylko nie przez wyłączenie, lecz przez narastanie.

A koniec, który w tej historii naprawdę nastąpił, dotyczy czego innego. W 2017 roku Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych wydał nową wersję normy DAB i usunął z niej tryby nadawania drugi, trzeci i czwarty – przewidziane dla pasma L i dla satelity, nieużywane. Zostało tylko to, co działa naziemnie. To, co w tej historii umarło najpierw, nie było systemem analogowym, tylko nieużywanymi częściami systemu cyfrowego.

Morał dla rubryki jest taki: technika nie kończy się wtedy, gdy pojawia się lepsza. Kończy się wtedy, gdy znika ostatni powód, żeby ją utrzymywać. W przypadku UKF takich powodów zostało jeszcze co najmniej dwa – a jeden z nich, ten o schronach, jest powodem, o którym w rachunku kosztów nadawania nikt początkowo nie pomyślał. ■

Wiesław Marciniak

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

O tych, co przekuli innowacyjne wizje w biznesowy sukces
W polskim życiu publicznym coraz częściej używanym słowem jest odmieniany na wszystkie sposoby wyraz „innowacje". I tak powinno być przez najbliższe lata, bo ambicją naszego kraju jest spektakularny awans do grona państw o gospodarce kreatywnej, tworzącej własne produkty i marki, znane i szanowane w świecie. To Wy, młodzi Czytelnicy MT, macie tego dokonać! Żeby Was natchnąć dobrymi przykładami, co miesiąc przedstawiamy reprezentantów czołówki światowych liderów innowacji. Najczęściej byli oni jeszcze w wieku szkolnym lub studenckim, gdy w ich głowach rodziły się śmiałe pomysły skutkujące później powstaniem superproduktów, wielkich brandów i fantastycznych fortun.
To oni kształtują cywilizację technologiczną.
To bohaterowie naszych czasów.

Sto pięter ze stali dla pięćdziesięciu
Fazlur Rahman Khan

Empire State Building, ukończony w Nowym Jorku w 1931 roku, ma sto dwa piętra i na każdy metr kwadratowy stropu przypada w nim 206 kilogramów stali konstrukcyjnej. John Hancock Center, ukończony w Chicago w 1969 roku, ma pięter sto – i 145 kilogramów na metr kwadratowy stropu. Prawie o trzydzieści procent mniej, po niemal czterech dziesięcioleciach, przy niemal tej samej liczbie pięter. Obie liczby pochodzą z tego samego numeru pisma Amerykańskiego Instytutu Konstrukcji Stalowych z początku 1972 roku.

Nazywał się Fazlur Rahman Khan i zmienił sposób, w jaki buduje się wysokie domy. Zrobił to jednym pomysłem – takim, który da się sprawdzić na dwóch kartkach papieru, a który przez poprzednie trzydzieści lat nie przyszedł do głowy nikomu.

Rzecz w tym, że od czasu Empire State Building wysokie budownictwo stanęło. Nie z braku stali ani z braku pieniędzy, tylko dlatego, że przy klasycznym szkielecie każde kolejne piętro kosztowało coraz więcej stali niż poprzednie – i to nie z powodu ciężaru, lecz z powodu wiatru. Khan jako pierwszy powiedział wprost, gdzie leży granica opłacalności i co trzeba zrobić, żeby ją przesunąć. Odpowiedź dał w trzech odmianach, wszystkie trzy zbudował, a dwie z nich stoją w Chicago do dziś i każdy je zna z widzenia, nie wiedząc na ogół, co w nich siedzi.



Fazlur Rahman Khan (źródło: Wikipedia. By [1], Fair use, https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=19007919)

Wieżowiec to wspornik

Zacznijmy od rzeczy, która jest oczywista dopiero wtedy, gdy ktoś o niej powie. Wysoki

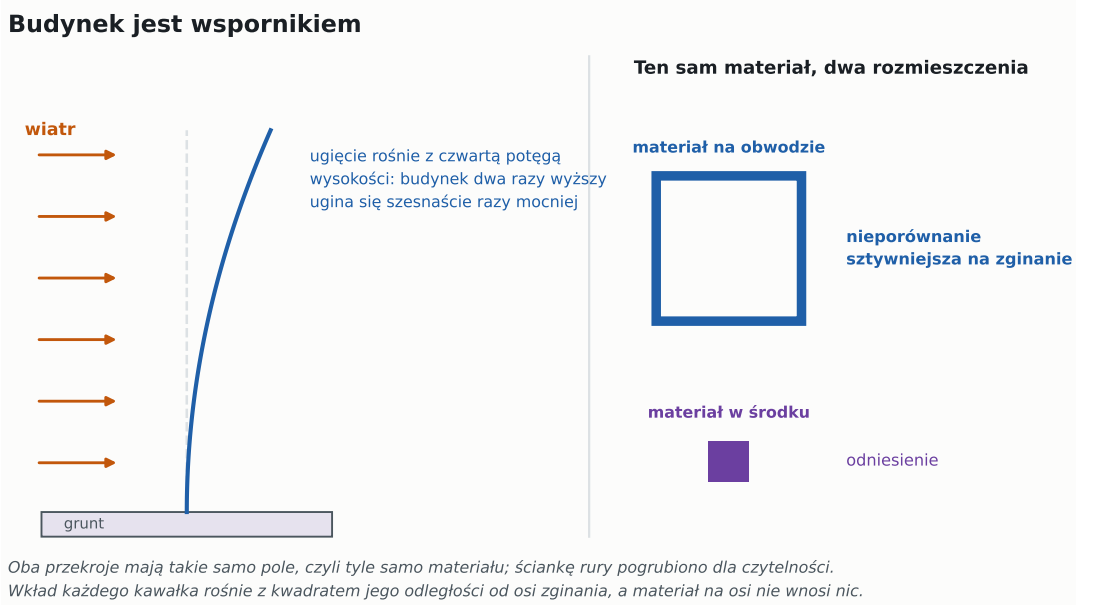
eprasa.pl 7fd5cc1c0f

budynek nie jest problemem ciężaru. Ciężar idzie prosto w dół i słupy przenoszą go bez trudu – ale nie dlatego, że stal jest w ściskaniu mocna. Smukły pręt ściskany nie pęka, tylko się wybacza, czyli ucieka w bok, i to przy sile tym mniejszej, im jest dłuższy. Słupom wieżowca to nie grozi, bo strop podpiera je na każdej kondygnacji: wyboczeniu poddaje się odcinek wysokości jednego piętra, a nie cały słup. Dlatego dołożenie dziesięciu pięter kosztuje tyle stali, ile trzeba na te dziesięć pięter.

Problemem jest wiatr. Budynek stojący w wietrze zachowuje się jak wspornik: jak linijka przykręcona jednym końcem do stołu i naciskana z boku. Im dłuższa linijka, tym mocniej się wygina, i to nie proporcjonalnie do długości. Dla wspornika obciążonego równomiernie na całej długości – a tak właśnie napiera wiatr na ścianę budynku – ugięcie rośnie z czwartą potęgą wysokości: budynek dwa razy wyższy ugina się nie dwa, lecz szesnaście razy mocniej. A ponieważ wiatr wyżej wieje szybciej, w rzeczywistości jest jeszcze gorzej. Dlatego materiału potrzebnego na przeniesienie ciężaru przybywa wraz z wysokością powoli, a materiału potrzebnego na przeciwstawienie się wiatrowi – gwałtownie.

Khan nazwał tę nadwyżkę dopłatą za wysokość i to jest jego własne określenie: premium for height. Chodzi o całą stal, którą trzeba dołożyć ponad to, czego wymaga samo utrzymanie ciężaru budynku. W klasycznym szkielecie, czyli w siatce słupów i rygli sztywno ze sobą połączonych, ta dopłata rośnie tak szybko, że powyżej mniej więcej dwudziestu, trzydziestu pięter przestaje się opłacać. I właśnie dlatego, mimo postępu w hutnictwie, przez trzy dziesięciolecia po Empire State Building nie bardzo było z czym się wychylać.

Teraz rzecz, którą da się sprawdzić samemu, i warto ją zrobić. Weźcie dwie takie same kartki z bloku. Pierwszą zwińcie w szeroką rurę o średnicy jakichś sześciu centymetrów i zaklejcie taśmą. Drugą zwińcie jak najciaśniej w cienki wałek i też zaklejcie. Materiał i masa są w obu identyczne – różni je tylko to, jak daleko od środka leży papier. Spróbujcie teraz zgiąć jedno i drugie: szeroka rura broni się nieporównanie lepiej. Powód: sztywność na zginanie zależy nie tylko od tego, ile materiału jest, ale przede wszystkim od tego, jak daleko od osi zginania on leży – i to z kwadratem odległości. Właśnie dlatego porównanie ma sens tylko wtedy, gdy materiału jest w obu przypadkach tyle samo.



Rysunek 1. Wysoki budynek jako wspornik, schematycznie. Pojęcie dopłaty za wysokość – czyli materiału potrzebnego ponad to, czego wymaga przeniesienie ciężaru – za archiwum „Fazlur Khan – Structural Artist of Urban Building Forms" Uniwersytetu Princeton oraz za artykułem M. M. Alego i K. Al-Kodmany'ego w czasopiśmie „Encyclopedia" z 2022 roku

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Khan wyciągnął z tego wniosek, który dziś wydaje się prosty, a wtedy nie przyszedł do głowy nikomu: skoro budynek i tak zachowuje się jak wspornik, to niech cała stal przenosząca wiatr siedzi tam, gdzie pracuje najskuteczniej – czyli na obwodzie, w ścianach zewnętrznych. Nie w środku. Budynek ma być rurą.

Z Dhaki do Chicago

Urodził się 3 kwietnia 1929 roku w Dhace, w ówczesnych Indiach Brytyjskich. Dyplom inżyniera zrobił na uniwersytecie w Dhace w 1950 roku, jako pierwszy na roku, a potem wyjechał do Stanów Zjednoczonych – na dwóch stypendiach naraz, amerykańskim programu Fulbrighta i rządu pakistańskiego. Na Uniwersytecie Illinois zrobił w ciągu pięciu lat dwa magisteria, z konstrukcji budowlanych i z mechaniki teoretycznej i stosowanej, oraz doktorat z konstrukcji.

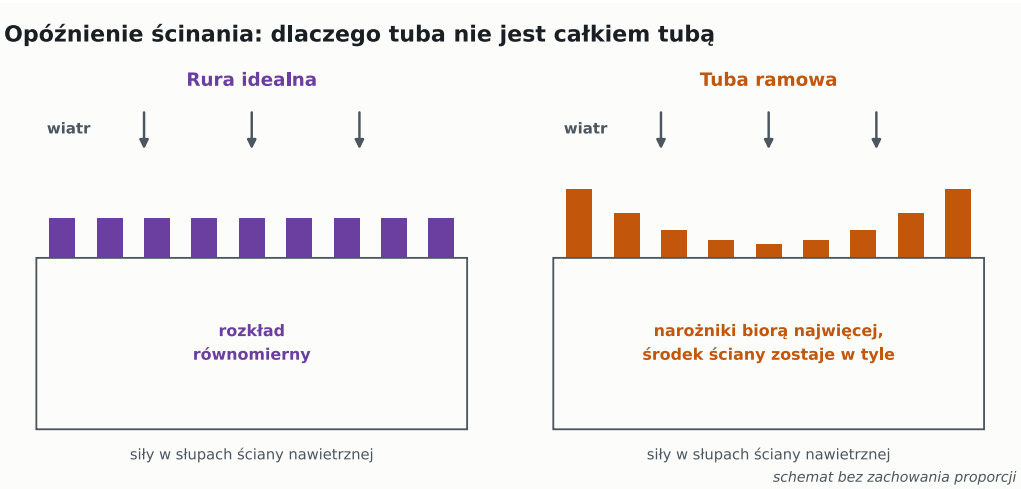
W 1955 roku trafił do biura Skidmore, Owings and Merrill w Chicago jako starszy projektant konstrukcji. Na dwa lata wrócił do Pakistanu, od 1960 roku był w Chicago na stałe, w 1966 roku został wspólnikiem stowarzyszonym, a w 1970 pełnoprawnym – jedynym inżynierem na tym szczeblu w firmie.

Jedna rzecz z tego okresu wymaga osobnej wzmianki, bo bez niej cała reszta byłaby niewykonalna. Gdy w 1961 roku firma kupiła komputer, Khan sam zabrał się do pisania programów i prowadził dla kolegów wieczorne zajęcia z obliczeń maszynowych. Rura z wyciętymi tysiącami okien to układ, którego nie da się policzyć na suwaku. Praca, którą ogłosił w 1966 roku razem z S. H. Iyengarem i J. P. Colaco, nosi tytuł mówiący wszystko: „Komputerowe projektowanie stupiętrowego John Hancock Center".

Tuba ramowa i jej wada

Pierwszą realizacją pomysłu był czterdziestotrzypiętrowy budynek mieszkalny w Chicago, dziś znany jako The Plaza on DeWitt, cały z żelbetu, o wysokości 120 metrów. Khan obmyślił go w 1961 roku.

Zasada jest następująca. Słupy na obwodzie budynku stawia się gęsto – typowo co półtora do czterech i pół metra – i spina je na każdej kondygnacji belkami podokiennymi o wysokości od sześćdziesięciu centymetrów do metra dwudziestu. Ściana zewnętrzna przestaje być wtedy zbiorem osobnych słupów i zaczyna zachowywać się jak jedna podziurawiona płyta. Cztery takie płyty tworzą zamknięty przekrój – rurę. Środek



Rysunek 2. Opóźnienie ścinania, schematycznie i bez zachowania proporcji. Nierównomierny rozkład sił w słupach ściany nawietrznej oraz stwierdzenie, że siły w słupach narożnych są największe – za artykułem M. M. Alego i K. Al-Kodmany'ego w „Encyclopedia" z 2022 roku oraz pracami o opóźnieniu ścinania w konstrukcjach tubowych ogłoszonymi w 2015 i 2018 roku. Podział ugięcia na trzydzieści procent z pracy wspornikowej i siedemdziesiąt z pracy ramy – za analizą samego Khana, przytoczoną w archiwum Uniwersytetu Princeton

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

budynku można zostawić pusty, co znaczy tyle, że nie ma w nim słupów.

I tu przychodzi komplikacja, która jest najciekawszą częścią tej historii, bo pokazuje różnicę między pomysłem a konstrukcją.

Idealna rura przy zginaniu zachowuje się tak, że ściana nawietrzna rozciąga się równomiernie, a zawietrzna równomiernie się ściska. W prawdziwej tubie ramowej tak nie jest. Siła ze ściany bocznej trafia najpierw do słupa narożnego, a dopiero belki podokienne mają ją rozprowadzić wzdłuż ściany nawietrznej. Belki jednak się uginają, a węzły obracają, więc rozprowadzenie jest niepełne: słupy narożne biorą na siebie znacznie większe obciążenie niż słupy w środku ściany. Środek ściany zostaje w tyle – inżynierowie nazywają to opóźnieniem ścinania.

Khan policzył, ile ta niedoskonałość kosztuje, i liczba jest otrzeźwiająca. W tubie ramowej tylko trzydzieści procent poziomego ugięcia budynku bierze się z pracy wspornikowej, czyli z tego, po co całą rurę budowano. Pozostałe siedemdziesiąt procent to zwykłe uginanie się ramy. Innymi słowy: tuba ramowa jest rurą tylko w jednej trzeciej.

Hancock, czyli krzyże na elewacji

Rozwiązaniem był John Hancock Center, ukończony w 1969 roku: sto pięter, 344 metry wysokości. Khan zrobił rzecz, która wygląda na ozdobę, a jest konstrukcją: puścił po elewacji wielkie krzyże z ukośnych prętów, każdy przez mniej więcej dwadzieścia kondygnacji. Ten układ nazywa się tubą kratową.

Ukośnik robi dokładnie to, czego nie potrafiła belka podokienna – przenosi siłę z narożnika do środka ściany po linii prostej, pracując na rozciąganie albo na ściskanie, a nie na zginanie. Opóźnienie ścinania niemal znika: siła nie musi się już przenosić przez podatne belki, bo dochodzi do środka ściany prętem pracującym osiowo, a pręt rozciągany prawie się nie wydłuża. Budynek zaczyna się zachowywać prawie tak, jak idealny wspornik rurowy.

Przy okazji rzecz, którą projektanci lubią najbardziej: te same ukośniki przenoszą część ciężaru budynku. Element, który i tak musiał tam stanąć ze względu na wiatr, odciąża przy okazji słupy – więc część tego, co wydano na ukośniki, wraca w zaoszczędzonej stali słupów.

Stąd bierze się liczba z tytułu. Sto pięter Hancocka zużyło 145 kilogramów stali konstrukcyjnej na metr kwadratowy stropu. Biuro projektowe podaje to porównanie w swoich materiałach wprost: było to tyle, ile zużywała wtedy konwencjonalna wieża pięćdziesięciopiętrowa. Pismo Instytutu Konstrukcji Stalowych pisało dwa lata wcześniej to samo nieco inaczej – że jest to typowa wartość dla szkieletów trzydziesto- do pięćdziesięciopiętrowych.

Sears, czyli dziewięć rur w wiązce

Ostatni krok był prosty, gdy już się go zobaczyło. Jeżeli jedna rura jest sztywna, to kwadrat tej samej szerokości podzielony ścianami na dziewięć mniejszych rur jest sztywniejszy – przy tej samej ilości stali. Ściany wewnętrzne pracują bowiem dla obu sąsiadów naraz i robią to, czego nie potrafiły belki podokienne: dowożą siłę do środka ściany nawietrznej.

Sears Tower w Chicago, ukończony w 1974 roku, 442 metry, sto dziesięć pięter, składa się z dziewięciu kwadratowych rur o boku 23 metrów, ustawionych w siatkę trzy na trzy. Razem dają kwadrat o boku 69 metrów. Każda rura ma po pięć słupów na bok, co 4,5 metra.

A teraz najładniejsza część pomysłu. Rury nie muszą kończyć się na tej samej wysokości. Każda sięga tam, dokąd jest potrzebna powierzchnia, i tam się kończy. Stąd ten uskakujący kształt, który zna każdy. Nie jest to pomysł plastyczny architekta, tylko konsekwencja rachunku – a przy okazji budynek traci powierzchnię nawietrzną na samej górze, czyli tam, gdzie wiatr napiera najmocniej, a ramię jego siły względem fundamentu jest najdłuższe. Zabranie metra kwadratowego elewacji na dziewięćdziesiątym piętrze odciąża podstawę nieporównanie bardziej niż zabranie go na dziesiątym.

Co po nim zostało

Trzy pomysły Khana – tuba ramowa, tuba kratowa i wiązka tub – są dziś w podręcznikach, i to jest największe wyróżnienie, jakie może spotkać pomysł inżynierski: przestał być czyjąś sztuczką, a stał się wiedzą. Z jego własnych realizacji warto wymienić One Shell Plaza w Houston, gdzie użył układu rura w rurze, oraz dwa budynki ukończone już po jego śmierci: 780 Third Avenue w Nowym Jorku i Onterie Center w Chicago.

Przy okazji trzeba powiedzieć, czego w tej historii nie ma, bo bywa dopisywane. Rada do spraw Wysokich Budynków pisze, że typologia wiązki tub „została użyta w większości

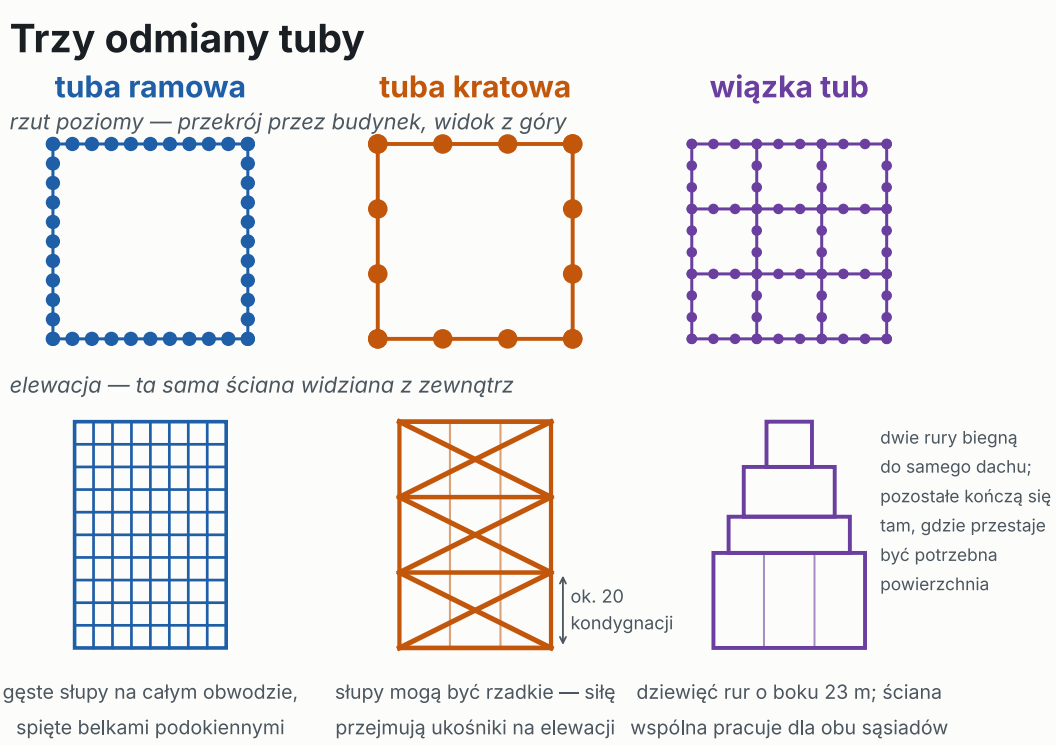
eprasa.pl 7fd5cc1c0f

superwysokich budynków zbudowanych od czasu Sears Tower, w tym w Burj Khalifa". Ale konstruktor Burj Khalifa z tego samego biura projektowego, Bill Baker, mówi o układzie swojej wieży, że był to nowy system, który jego zespół dopiero stworzył, i nie wywodzi go od tuby. Przegląd ogłoszony w 2022 roku przyznaje rację raczej Bakerowi, wyprowadzając układ Burj Khalifa z trzonu usztywnionego przyporami, a nie z tuby. Rozstrzygać tego nie będziemy; wystarczy powiedzieć, że Khan ma w tej dziedzinie dość zasług, żeby nie trzeba mu było dopisywać cudzych.

Człowiek

Dwie rzeczy na koniec, obie spoza inżynierii.

W 1971 roku, gdy w jego rodzinnym kraju trwała wojna o niepodległość, Khan – mieszkający od lat w Chicago i robiący karierę w amerykańskim biurze – zorganizował fundusz pomocy dla Bengalczyków, założył w Stanach organizację wspierającą ich sprawę i namawiał pakistańskich



Rysunek 3. Trzy odmiany tuby – ten sam budynek w rzucie poziomym (u góry) i na elewacji (u dołu), schematycznie i bez zachowania proporcji – oraz stal konstrukcyjna przypadająca na metr kwadratowy stropu. Wymiary Sears Tower – dziewięć rur o boku 75 stóp, po pięć słupów na bok co 15 stóp – za pracą S. H. Iyengara i J. J. Zilsa w „Engineering Journal" Amerykańskiego Instytutu Konstrukcji Stalowych z 1973 roku oraz za archiwum Uniwersytetu Princeton. Zużycie stali: Empire State Building i John Hancock Center za pismem „Modern Steel Construction" z pierwszego kwartału 1972 roku, Sears Tower za materiałami Uniwersytetu Lehigh. Przeliczenia na kilogramy na metr kwadratowy wykonano w redakcji

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

dyplomatów do przechodzenia na stronę powstania, obiecując im utrzymanie do czasu zwycięstwa. Bangladesz przyznał mu za to pośmiertnie najwyższe odznaczenie państwowe, w 1999 roku.

Druga rzecz to dowód, że nie był człowiekiem jednego pomysłu. W 1981 roku ukończono zaprojektowany przez niego terminal pielgrzymkowy lotniska w Dżiddzie w Arabii Saudyjskiej: dwieście dziesięć półstożkowych namiotów z tkaniny szklanej powlekanej teflonem, zebranych w dziesięć zespołów, rozwieszonych na stalowych masztach wysokości czterdziestu pięciu metrów. Powierzchnia tego obiektu to dwieście sześćdziesiąt tysięcy metrów kwadratowych. Konstrukcja z liną i tkaniną nie ma z rurą nic wspólnego – poza tym, że znowu chodziło o to, żeby materiał pracował tam, gdzie pracuje najskuteczniej.

Zmarł na zawał serca 27 marca 1982 roku, w Dżiddzie, kilka miesięcy po otwarciu tego terminalu i tydzień przed pięćdziesiątymi trzecimi urodzinami. Pochowano go w Chicago. Skrzyżowanie ulic Franklin i Jackson nosi dziś nazwę Fazlur R. Khan Way – dwie przecznice od stu pięter, które zużyły tyle stali ile wcześniej zużywano na pięćdziesiąt pięter. ■

Paweł Biernacki

Dlaczego rura jest sztywniejsza od pręta

Sztywność na zginanie opisuje wielkość zwana momentem bezwładności przekroju. Nie trzeba znać wzoru, żeby zrozumieć, co w niej siedzi: każdy kawałek materiału wnosi tym więcej, im dalej leży od osi, wokół której przekrój się obraca – i wnosi proporcjonalnie do kwadratu tej odległości.

Kwadrat jest tu słowem kluczowym. Materiał przesunięty dwa razy dalej od osi daje cztery razy większy wkład. Materiał leżący dokładnie na osi nie daje nic.

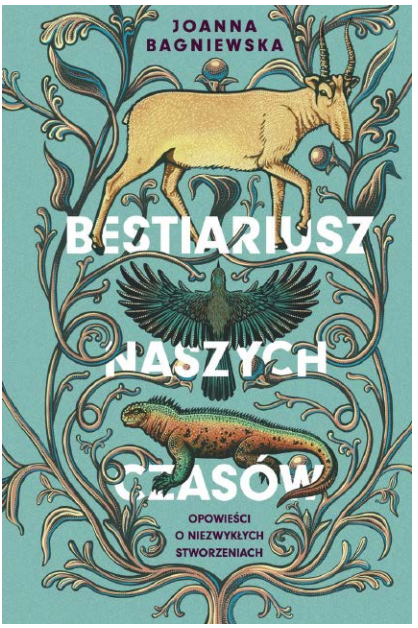
Rachunek do sprawdzenia: weźmy kwadratową rurę o boku a i grubości ścianki równej jednej pięćdziesiątej tego boku. Teraz weźmy pręt o przekroju kwadratowym i dokładnie takim samym polu przekroju, czyli z tej samej ilości materiału. Moment bezwładności rury wychodzi dwadzieścia pięć razy większy niż pręta.

Dwadzieścia pięć razy – przy tej samej masie i tym samym materiale. Zmieniło się tylko to, gdzie materiał leży.

I to jest cała idea Khana w jednym zdaniu. Dotychczas stal przenosząca wiatr siedziała w budynku wszędzie, także w środku, gdzie prawie nic nie wnosiła. On kazał jej stanąć na obwodzie.

Bestariusz naszych czasów
Opowieści o niezwykłych stworzeniach
Joanna Bagniewska

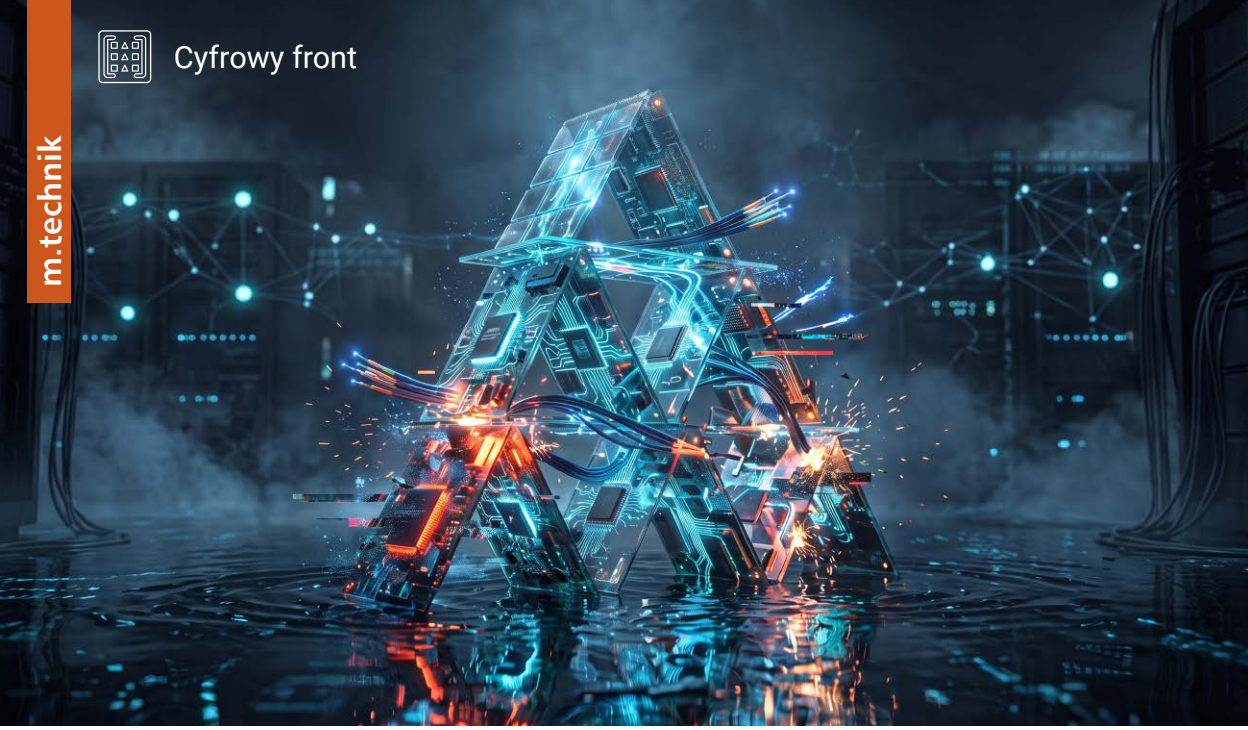
Wydawnictwo: Insignis, stron: 202, sugerowana cena: 59,99 zł



Najprawdziwszy BESTIARIUSZ NASZYCH CZASÓW!

Te znane i te, w których istnienie aż trudno uwierzyć. Odrażające. Rozczulające. Słowem: niezwykłe! Znajdziecie tu gatunki, które trafiały na pierwsze strony gazet, ale i takie, o których zapewne nigdy nie słyszeliście: beznogie płazy żywiące się skórą, gąbki przypominające harfy czy robaki zombie, zwane również pożeraczkami kości. O znajomych zwierzętach dowiecie się zaskakujących rzeczy. Szczury prowadzą samochody? Ryby porozumiewają się za pomocą gazów? To dopiero początek! A mniej znane gatunki? Jest ich tu mnóstwo: drapieżne myszy wyjące do księżyca, samce mątw podszywające się pod samice, chutliwce – maleńkie torbacze, które kopulują tak intensywnie, że przypłacają to życiem. Są tu wreszcie prawdziwi „ziemscy kosmici" – istoty tak nieprawdopodobne i absurdalne, że niemal baśniowe. Poczytajcie o niesporczakach, pasożytniczych skorupiakach zjadających języki swoich gospodarzy i nieśmiertelnych meduzach. To stworzenia tak zdumiewające, że jednorożce wydają się przy nich całkiem pospolite. „Bestiariusz naszych czasów" – książka napisana przez zoolożkę z wyjątkowym talentem do barwnych opowieści – to fascynujący pean na cześć wspaniałego królestwa zwierząt.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Domek z kart podłączony do sieci

Nikt nie musi już wysadzać elektrowni, żeby sparaliżować kraj. Wystarczy wejść przez furtkę serwisanta, zabrać jedną bazę danych albo trafić dronem w kilka budynków pełnych serwerów. Ostatnie miesiące pokazały, jak cienka jest warstwa, na której opiera się nasz cyfrowy świat.

Chłodnia nastawiona na 110 stopni

W nocy z 1 na 2 listopada 2026 r. technik dyżurny francuskiej służby krwi (Établissement français du sang, EFS) zauważył, że temperatura w chłodniach zaczyna rosnąć. W urządzeniach, które normalnie trzymają około −30°C, ktoś zdalnie zmienił nastawę na +110°C. W środku leżały próbki krwi dawców i zamrożone osocze przeznaczone do transfuzji. Atak objął trzy ośrodki regionalne. System monitoringu podniósł alarm, technik zareagował na czas, a EFS poinformowała, że nie stwierdzono skutków zdrowotnych ani utraty produktów krwi. Trzeba też dodać, że znana jest tylko zmieniona nastawa, a nie temperatura, jaką urządzenia faktycznie osiągnęły. Nagłówki o „ugotowanej krwi" to przesada.

Przesadą nie jest natomiast sposób, w jaki napastnicy się tam dostali. Nie włamali się do systemów służby krwi. Weszli przez Coolworld, zewnętrzną firmę, która serwisuje urządzenia chłodnicze i ma do nich zdalny dostęp. Według Coolworld furtką był program do zdalnego nadzoru, który ta firma kupiła od jeszcze innego dostawcy. EFS zaopatruje w krew szpitale w całej Francji, a o jej bezpieczeństwie zdecydowało w tym przypadku zabezpieczenie podwykonawcy jej podwykonawcy.

Nie był to pierwszy taki przypadek. Kilka tygodni wcześniej, w nocy z 11 na 12 października, ktoś zdalnie przestawił lodówki i zamrażarki w około 700 francuskich sklepach, masarniach i zakładach spożywczych na +50°C i wymusił ciągłe rozmrażanie. Wybuchło co najmniej

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

kilkanaście pożarów. Rano obsługa zastała zepsuty towar, a pojedyncze sklepy wyrzucały produkty warte nawet 200 tys. euro. Do ataku przyznały się prorosyjskie grupy hakerskie, ale 9 listopada francuskie służby wskazały jako sprawców jednostkę irańskiego Korpusu Strażników Rewolucji. Z kolei w nocy z 1 na 2 listopada, tej samej, w której zaatakowano EFS, podobne ataki dotknęły sklepy w Belgii, Luksemburgu, Szwecji i Irlandii.

Dlaczego sklepowa zamrażarka w ogóle jest podłączona do internetu? Bo tak jest taniej. Serwisant nie musi jechać do każdego sklepu, alarm o awarii przychodzi na telefon, a firma zdalnie wgrywa poprawki. To wygoda, za którą płaci się tym, że urządzenie, które dotąd było zwykłą lodówką z termostatem, staje się komputerem w sieci. A komputer w sieci można przejąć.

Pół Polski w jednym pliku

Polski odpowiednik tej historii nie dotyczy temperatury, tylko danych. W sierpniu minister cyfryzacji Krzysztof Gawkowski potwierdził, że z systemów firmy MyDr wykradziono dane blisko 19 mln osób. MyDr dostarcza oprogramowanie do prowadzenia elektronicznej dokumentacji medycznej dla około 12 tys. przychodni i gabinetów. Według sprawców skradziona baza ma ponad 2 TB. Są w niej imiona, nazwiska, numery PESEL, dane kontaktowe, a także informacje o lekach i receptach. Żeby uwiarygodnić kradzież, sprawcy pokazali numer PESEL i recepty jednego z czołowych polskich polityków.

Większość Polaków nigdy nie słyszała o MyDr. Nikt nie wybierał tej firmy świadomie: wybrała ją przychodnia, bo program był wygodny i niedrogi. Tak samo działa to w wielu innych dziedzinach. Tysiące małych placówek korzysta z jednego dostawcy, więc w jednym miejscu gromadzą się dane prawie połowy kraju. Dla przestępcy to idealny cel: zamiast włamywać się do 12 tys. przychodni, wystarczy jedno udane włamanie.

Dane medyczne są dla oszusta szczególnie cenne. Ktoś, kto wie, jakie leki bierzemy i w jakiej przychodni się leczymy, może zadzwonić jako „rejestracja" albo „apteka" i brzmieć bardzo wiarygodnie. Wystarczy prośba o potwierdzenie danych, dopłatę do recepty albo kliknięcie w link z „wynikami badań". Wiadomość, która zawiera prawdziwe szczegóły z naszego życia, trudno odróżnić od autentycznej wiadomości z przychodni.

Od kwietnia obowiązuje znowelizowana ustawa o krajowym systemie cyberbezpieczeństwa, wdrażająca unijną dyrektywę NIS2, a po wycieku rząd zapowiedział kolejne zmiany. Przepisy nie cofną jednak tego, co już się stało. Wykradzionych danych nie da się już odzyskać. PESEL można zastrzec, ale informacji o tym, jakie leki ktoś bierze, zastrzec się nie da.

Wojna o serwerownie

Trzeci wątek rozgrywa się już nie w sieci, ale w realnym świecie. Pod koniec września Rosja zaczęła seryjnie atakować centra danych w Kijowie, czyli budynki, w których stoją tysiące serwerów z zasilaniem, chłodzeniem i łączami. Uderzenie z 23 września odcięło od internetu około 100 tys. gospodarstw domowych w Kijowie i okolicach. 1 października operator ogłosił, że centrum danych Parkowyj, jedyne komercyjne centrum danych w Ukrainie z certyfikatem Tier III (to klasa niezawodności, w której zasilanie i chłodzenie są zdublowane tak, że każdy element można naprawić bez wyłączania serwerów), jest zniszczone i nie da się go odbudować.

Ukraina zniosła te ataki zaskakująco dobrze. Od początku wojny przenosiła najważniejsze dane na serwery w krajach sojuszniczych. Firma hostingowa MiroHost straciła swoją kijowską serwerownię, ale 90...95% jej klientów i tak korzystało z infrastruktury za granicą.

W październiku ukraińskie drony uderzyły w rosyjskie centra danych. W ciągu czterech dni trafiły trzy centra danych Yandexa, największej rosyjskiej firmy internetowej: w Sasowie (8 października), w Kałudze i we Włodzimierzu nad Klaźmą. W Sasowie stał najmocniejszy z trzech superkomputerów Yandexa, który w 2021 r., gdy go uruchomiono, zajął 19. miejsce na światowej liście TOP500. Potem przyszła kolej na centrum danych i ośrodek sztucznej inteligencji Sbierbanku w Bałakowie oraz serwerownię portalu społecznościowego VKontakte w Petersburgu.

Skutki odczuli zwykli Rosjanie. Przestały działać płatności, zamówienia internetowe, taksówki, nawigacja. Sądy arbitrażowe odwoływały rozprawy, bo straciły dostęp do baz danych. Yandex ćwiczył wcześniej scenariusz utraty jednego z sześciu centrów danych, ale nie utraty trzech naraz. Większość usług przywrócono po kilku dniach, przenosząc je do innych obiektów. Superkomputerów nie da się jednak szybko odbudować: pożary najpewniej

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

uszkodziły drogie karty obliczeniowe Nvidia A100, a sankcje utrudniają kupno nowych.

W tej historii jest pewna ironia. Rosja od lat wymaga, by dane rosyjskich użytkowników były przechowywane na terytorium kraju. Miało to dać państwu kontrolę i niezależność. W czasie wojny ten sam przepis sprawił, że wszystkie cele leżą w zasięgu dronów przeciwnika. Ukraina, która dane rozproszyła, wyszła na tym lepiej.

Infrastruktura cyfrowa leży też na dnie morza. Pod Bałtykiem biegną kable telekomunikacyjne i energetyczne łączące kraje regionu. W listopadzie 2024 r. uszkodzone zostały dwa światłowody, w tym fiński C-Lion1, a w grudniu tego samego roku kabel energetyczny Estlink 2 między Finlandią a Estonią. Podejrzewano statki, które wlokły kotwice po dnie. Sprawców trudno wskazać, a szkody trudno szybko naprawić, bo statków do napraw kabli podmorskich jest na świecie niewiele. Dlatego w styczniu 2025 r. NATO uruchomiło na Bałtyku misję Baltic Sentry, w ramach której okręty i samoloty pilnują podmorskiej infrastruktury.

A gdyby chodziło o Google?

Te wydarzenia prowadzą do pytania, które warto sobie zadać spokojnie, póki jeszcze można: co by się stało, gdyby z dnia na dzień przestały działać centra danych jednej z wielkich firm, na przykład Google, Amazona lub Microsoftu? Słowo „chmura" sugeruje coś lekkiego i rozproszonego. W rzeczywistości chmura to konkretne hale z serwerami, transformatorami i agregatami chłodniczymi, stojące pod konkretnymi adresami. I jest ich mniej, niż się wydaje. Trzy firmy, Amazon, Microsoft i Google, mają razem blisko dwie trzecie (63%) światowego rynku usług chmurowych. Oznacza to, że ogromna część aplikacji, z których korzystamy, działa w budynkach należących do zaledwie trzech właścicieli.

Nie trzeba zgadywać, jak wyglądałaby taka awaria, bo mieliśmy już jej próbkę. 20 października 2025 r. w regionie us-east-1 chmury Amazon Web Services (AWS), czyli w centrach danych w północnej Wirginii, błąd w automatyce zarządzającej DNS (Domain Name System, system nazw domen, który zamienia nazwy domen na adresy w sieci, coś jak książka telefoniczna internetu) usunął z DNS adres bazy danych DynamoDB, jednej z kluczowych usług AWS. Usługa działała dalej, ale nikt nie mógł jej znaleźć. Lawina zależności sprawiła, że przez około 15 godzin kłopoty miały 142 usługi AWS, a razem z nimi Snapchat, Roblox, Zoom, banki i brytyjski urząd skarbowy. Nikt tego nie zaatakował. Wystarczył jeden błąd w programie.

Podobnie było w lipcu 2024 r., gdy wadliwa aktualizacja programu zabezpieczającego firmy CrowdStrike unieruchomiła około 8,5 mln komputerów z Windows. Stanęły lotniska, szpitale odwoływały zabiegi, w sklepach nie działały kasy. Znowu: bez żadnego napastnika.

Teraz wyobraźmy sobie, że ktoś robi to celowo i według planu, tak jak drony nad Sasowem. Przestaje działać poczta, kalendarz, dokumenty w chmurze. Telefony nie logują się do kont, więc wiele aplikacji jest bezużytecznych. Nawigacja nie pokazuje drogi, kurierzy nie wiedzą, dokąd jechać. Fabryki, które sterują produkcją z systemów w chmurze, zatrzymują linie. Sklepy nie przyjmują kart, a bankomatów jest za mało, żeby wszyscy wypłacili gotówkę. Inteligentne domy przestają słuchać poleceń, a zamki elektroniczne zachowują się różnie, w zależności od tego, jak je zaprojektowano. Gdyby padła tylko część regionów, usługi wróciłyby po kilku dniach, bo wielkie firmy trzymają kopie w innych miejscach. Gdyby jednak zaatakowano wiele naraz, tak jak Yandex, nawet kilka dni takiego stanu wywołałoby chaos, jakiego nie znamy.

Wydajność kontra odporność

Skąd ta kruchość? Z tego samego powodu, z którego kupujemy tanie rzeczy. Duże centrum danych jest tańsze w przeliczeniu na jeden serwer niż wiele małych. Jeden dostawca oprogramowania dla 12 tys. przychodni jest tańszy niż sto lokalnych. Zdalny serwis lodówek jest tańszy niż serwisant w samochodzie. Każda z tych decyzji z osobna jest rozsądna. Razem tworzą system, w którym jest coraz mniej elementów, a każdy z nich jest coraz ważniejszy. Inżynier nazwie to wprost: pojedynczy punkt awarii.

Jest też drugie źródło kruchości: wszyscy używamy tego samego. Te same systemy operacyjne, te same programy antywirusowe, te same sterowniki w chłodniach i te same biblioteki programistyczne w milionach aplikacji. Biolodzy wiedzą, że pole obsiane jedną odmianą zboża może zniszczyć jedna choroba. W informatyce działa to tak samo: jeden błąd albo jedna luka w popularnym programie trafia jednocześnie w szpital, lotnisko i bank. Awaria CrowdStrike była właśnie taką chorobą monokultury.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Inżynierowie znają też lekarstwo. Nazywa się nadmiarowość, czyli zdublowanie najważniejszych elementów tak, żeby awaria jednego nie zatrzymała całości. Drugie pojęcie to łagodna degradacja: system, który traci część funkcji, ale nie przestaje działać całkiem. Kasa w sklepie, która bez sieci zapisuje transakcje i wysyła je później, jest tak zaprojektowana. Kasa, która bez sieci staje, nie jest.

Najciekawsza lekcja płynie jednak z francuskich chłodni. Rozsądnie zaprojektowana zamrażarka powinna mieć zabezpieczenie, którego nie da się przestawić z internetu: niezależny termostat bimetaliczny, który po przekroczeniu bezpiecznej temperatury włącza alarm, odcina grzałkę rozmrażania i wymusza pracę sprężarki, bez względu na to, co każe sterownik. Taki układ kosztuje kilkadziesiąt złotych. Program można przejąć, ale zwykłego termostatu bimetalicznego nie da się zhakować. Zasada jest stara jak automatyka: funkcje bezpieczeństwa nie mogą zależeć od tej samej elektroniki, którą da się zdalnie przeprogramować.

Ostatnia linia obrony

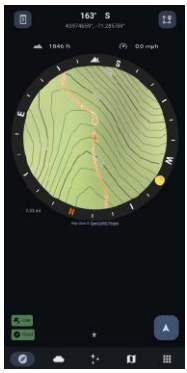
Co z tego wynika dla nas? Nie musimy wracać do papieru i liczydła. Warto jednak mieć w portfelu trochę gotówki, zastrzec PESEL w aplikacji mObywatel i zapisać ważne dane nie tylko w jednej chmurze. Warto też wiedzieć, jak bez internetu dojechać do domu i skontaktować się z bliskimi, i ustalić to z rodziną zawczasu. To nie panika, tylko zwykła przezorność, taka sama jak latarka w szufladzie na wypadek braku prądu. Ci, którzy projektują urządzenia, powinni zadawać sobie jedno pytanie: co zrobi mój układ, gdy straci łączność albo gdy ktoś wyda mu złośliwe polecenie?

Wróćmy na koniec do Francji. Łańcuch zabezpieczeń zawiódł tam w kilku miejscach: u dostawcy, w sieci, w sterowniku. Zadziałał niezależny pomiar temperatury i człowiek, który w środku nocy na niego zareagował. Najbardziej zaawansowany cyfrowy świat wciąż opiera się na kimś, kto nie śpi na dyżurze. Dobrze o tym pamiętać, zanim zautomatyzujemy także jego. ■

DeCoder

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Sześć programów do różnych zajęć: przyrządy terenowe działające bez zasięgu, rozpoznawanie ptaków po głosie, notatnik, który sam się szyfruje, fiszki z algorytmem powtórek, hasła trzymane we własnym pliku i kurs języka prowadzony metodą zamiast wkuwaniem.



Trail Sense

Przyrządy terenowe z samych czujników

Trail Sense to zestaw narzędzi na wyprawę, zbudowanych wyłącznie na czujnikach telefonu: kompas, punkty nawigacyjne, powrót po własnym śladzie, krokomierz, godziny wschodu i zachodu Słońca oraz Księżyca, faza Księżyca, latarka i zdjęcie papierowej mapy, które po kalibracji dwoma punktami działa jak mapa z lokalizacją.

Najciekawszy jest moduł pogodowy. Program zapisuje przebieg ciśnienia z barometru i na tej podstawie przewiduje zmianę pogody w najbliższych godzinach – czyli robi dokładnie to, co marynarz odczytujący barometr sto lat temu. To dobry pretekst, żeby pokazać dziecku, skąd się bierze związek między spadkiem ciśnienia a nadchodzącym frontem. Program nie korzysta z internetu i nie ma nawet uprawnienia do dostępu do sieci.

Dwie funkcje zależą od sprzętu: prognoza wymaga barometru, a kompas magnetometru, a w tańszych telefonach jednego albo drugiego nie ma. Sam autor ostrzega w opisie, że to narzędzie pomocnicze i w poważniejszym terenie trzeba mieć zapasowy kompas oraz papierową mapę. Program istnieje tylko na Androida.

Producent: Kyle Corry, projekt jednoosobowy o otwartych źródłach
Platformy: Android
Cena: bezpłatna; autor wprost zaznacza, że nie ma wersji płatnej ani funkcji odpłatnych
Możliwości: 9,0/10
Łatwość obsługi: 8,0/10
Ocena ogólna: 8,5/10



Merlin Bird ID

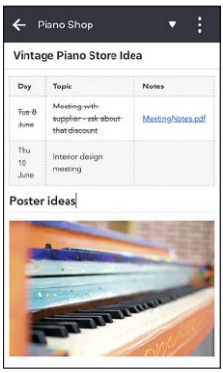
Rozpoznawanie ptaków po głosie

Merlin rozpoznaje ptaki na trzy sposoby: ze zdjęcia, z odpowiedzi na kilka pytań o wielkość, barwę i zachowanie, a przede wszystkim z nagrania dźwięku. Ten ostatni tryb działa na żywo – program słucha i wypisuje na ekranie nazwy gatunków, których głosy właśnie słyszy, podświetlając je w chwili, gdy dany ptak się odezwie. W parku miejskim potrafi w ciągu minuty wyliczyć kilkanaście gatunków, z których człowiek rozpoznałby dwa.

Za programem stoi Laboratorium Ornitologii Uniwersytetu Cornella, instytucja prowadząca największą na świecie bazę obserwacji ptaków. Dane do rozpoznawania pochodzą z milionów nagrań zebranych przez obserwatorów. Pakiety regionalne pobiera się osobno i po pobraniu program działa bez zasięgu, co w terenie jest warunkiem jakiejkolwiek przydatności.

Rozpoznawanie głosu jest bardzo dobre dla gatunków pospolitych i zawodzi przy nakładających się śpiewach kilku ptaków naraz oraz przy hałasie ulicznym. Pakiety zajmują sporo miejsca. Minus natury innej niż techniczna: w odróżnieniu od większości programów opisywanych w tej rubryce Merlin wymaga konta i deklaruje zbieranie adresu poczty elektronicznej oraz identyfikatora użytkownika.

Producent: Cornell Lab of Ornithology, Uniwersytet Cornella
Platformy: Android, iOS
Cena: bezpłatna
Możliwości: 9,0/10
Łatwość obsługi: 9,5/10
Ocena ogólna: 9,0/10



Joplin

Notatnik, z którego nikt nie czyta

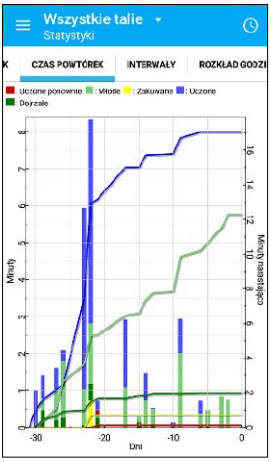
Joplin przechowuje notatki w zwykłym formacie tekstowym Markdown, co znaczy, że nawet bez programu zostaną czytelnymi plikami. Obsługuje notatniki, znaczniki, listy zadań, załączniki i rysunki, ma wyszukiwanie pełnotekstowe i wygodne wklejanie stron internetowych przez dodatek do przeglądarki. Wersja na komputer i mobilna to ten sam program i ta sama baza.

Rzecz, która go wyróżnia, to szyfrowanie od końca do końca przy synchronizacji. Użytkownik sam wybiera, gdzie trzyma dane – może to być usługa chmurowa, własny serwer albo katalog synchronizowany innym narzędziem – a notatki wychodzą z urządzenia już zaszyfrowane. Właściciel serwera widzi więc worek nieczytelnych bajtów, a nie treść.

Projekt jest otwarty i rozwijany od lat przez niewielką społeczność. Konfiguracja synchronizacji wymaga cierpliwości i kilku świadomych decyzji – to nie jest program, który po instalacji działa sam. Edytor na telefonie jest wyraźnie słabszy niż na komputerze i do dłuższego pisania się nie nadaje. Warto zacząć od wersji komputerowej, a telefon traktować jako uzupełnienie.

Producent: projekt o otwartych źródłach, założony przez @laurent22
Platformy: Android, Windows, macOS, Linux
Cena: bezpłatna; opcjonalna płatna usługa synchronizacji
Możliwości: 9,0/10
Łatwość obsługi: 7,5/10
Ocena ogólna: 8,5/10

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



AnkiDroid

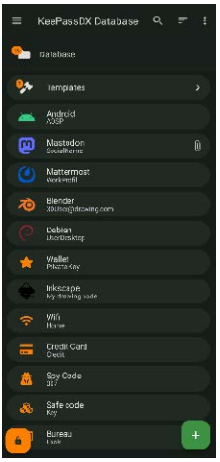
Fiszki, które wracają tuż przed zapomnieniem

AnkiDroid to system fiszek z powtórkami rozłożonymi w czasie. Po każdej karcie oceniamy, jak łatwo przyszła odpowiedź, a program wylicza, kiedy pokazać ją ponownie – tuż przed chwilą, w której według modelu zaczniemy ją zapominać. Dzięki temu rzeczy dobrze opanowane wracają raz na pół roku, a trudne codziennie, i cały czas nauki idzie tam, gdzie jest potrzebny.

Karty mogą zawierać tekst, obrazy, dźwięk, nagrania wideo i wzory matematyczne składane w systemie LaTeX, więc nadają się zarówno do słówek, jak i do anatomii czy wzorów chemicznych. Gotowych talii, przygotowanych przez innych użytkowników, jest ponad sześć tysięcy. Program jest zgodny z komputerowym Anki i może się z nim synchronizować, ale działa też całkowicie samodzielnie.

Liczba ustawień potrafi przytłoczyć, a sensowny efekt wymaga samodzielnego przygotowania talii – gotowe bywają nierówne. Istotna uwaga przy zakupie telefonu w rodzinie: na Androidzie i na komputerze program jest bezpłatny, ale odpowiednik na iPhone'a to osobne, płatne wydawnictwo kosztujące blisko dwadzieścia pięć dolarów jednorazowo.

Producent: AnkiDroid Open Source Team
Platformy: Android, Windows, macOS, Linux; iOS – inna wersja
Cena: bezpłatna na Androidzie i na komputerze, iOS płatny
Możliwości: 9,5/10
Łatwość obsługi: 7,0/10
Ocena ogólna: 8,5/10



KeePassDX

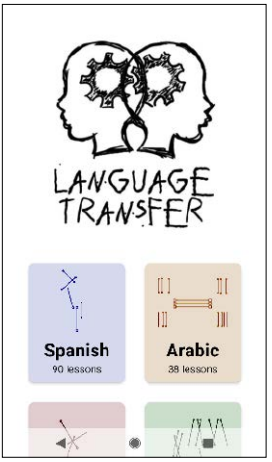
Hasła w pliku, który należy do nas

KeePassDX trzyma hasła, klucze dostępu nowego typu oraz kody jednorazowe w jednym zaszyfrowanym pliku w formacie KeePass. Plik otwiera się hasłem głównym, plikiem klucza albo odciskiem palca, a program uzupełnia formularze przez systemowy mechanizm wypełniania pól. Nie potrzebuje konta w żadnej usłudze ani połączenia z internetem.

Różnica wobec rozwiązań abonamentowych jest zasadnicza: baza to jeden plik na naszym urządzeniu i to my decydujemy, gdzie leży jego kopia. Format jest otwarty i obsługiwany przez programy na wszystkie systemy komputerowe, więc nie wiążemy się z żadnym dostawcą. Jeśli firma zniknie albo podniesie cenę, plik i tak zostaje nasz.

Wymaga to jednak dyscypliny. Synchronizację między telefonem a komputerem trzeba sobie zorganizować samodzielnie, a kopię zapasową robić i sprawdzać. Zgubiony plik albo zapomniane hasło główne oznaczają utratę wszystkiego, bez żadnej procedury odzyskiwania – to cena za to, że nikt postronny nie ma do bazy dostępu. Program istnieje tylko na Androida.

Producent: Kunzisoft
Platformy: Android; plik bazy zgodny z programami KeePassXC i KeeWeb na komputerze
Cena: bezpłatna
Możliwości: 8,5/10
Łatwość obsługi: 7,5/10
Ocena ogólna: 8,0/10



Language Transfer

Kurs języka, w którym się myśli

Language Transfer to audycje, nie fiszki. Nagrania są zapisem prawdziwych lekcji: lektor pracuje z jednym uczniem, zadaje pytania i prowadzi go tak, żeby sam doszedł do reguły gramatycznej. Słuchacz ma odpowiadać na głos razem z uczniem w nagraniu, zatrzymując odtwarzanie. Metoda opiera się na pokazywaniu, co w nowym języku jest podobne do już znanego, zamiast na zapamiętywaniu list.

Dostępne są kursy hiszpańskiego, greckiego, arabskiego, tureckiego, włoskiego, francuskiego, suahili oraz powstający kurs niemieckiego. Lekcje pobiera się na urządzenie i można ich słuchać przy zablokowanym ekranie, w drodze albo przy pracy. Projekt utrzymuje się z darowizn, a w opisie w sklepie deklaruje wprost brak reklam, zakupów i abonamentu – co w kategorii nauki języków jest rzadkością.

Zasadnicze ograniczenie dla polskiego czytelnika: kursy prowadzone są z perspektywy osoby mówiącej po angielsku i kursu dla Polaków nie ma. Trzeba więc znać angielski przynajmniej biernie. Druga wada jest techniczna i uciążliwa: aktualizacja programu kasuje pobrane lekcje i trzeba je ściągnąć na nowo. Rozwój jest powolny – ostatnie wydanie pochodzi z końca 2025 roku.

Producent: Language Transfer, projekt społecznościowy Michalisa Eleftheriou
Platformy: Android, iOS; kursy dostępne też na stronie projektu
Cena: bezpłatna
Możliwości: 8,0/10
Łatwość obsługi: 9,5/10
Ocena ogólna: 8,5/10

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

W pół drogi

– No dobrze – zwróciłem się do studentów pod koniec zajęć. – Na następny tydzień przygotujecie omawiany dzisiaj algorytm w dwóch wersjach. Pierwsza niech będzie, że tak to ujmę, nowoczesna. AI driven, hybrydowy Minder, może być nawet któryś z nanocoderów. Wasz wybór, nie będę się wtrącał. Natomiast drugą wersję – wyszczerzyłem się zza biurka – macie zaprogramować w czystym asemblerze. Żadnego kombinowania, nawet nie myślcie o odwrotnej inżynierii. To ma być wasz kod.

Klasa przyjęła to z dziwnym spokojem, więc natychmiast dodałem:

– Chcę widzieć wasze ekrany na politechnicznej chmurze. Calutki przebieg, od pierwszego znaku, aż do uruchomienia apki. A jeśli będę miał jakiekolwiek wątpliwości, to nie zawaham się sprawdzić waszych promptów.

Po sali poniósł się jęk niezadowolenia. Westchnąłem. Nikt już nie chciał programować po staremu. Takie czasy. Sam zresztą wykorzystywałem AI – co prawda tylko od czasu do czasu, ale jednak... Mówią, że trzeba iść z duchem czasu, inaczej zostaniesz w tyle. I pewnie mają rację, choć odrobinę „starej szkoły" jeszcze nikomu nie zaszkodziło. Tak czy inaczej, uznałem, że warto wyjaśnić uczniom, skąd ten pomysł.

– Nie chodzi o to, żeby cofać się w rozwoju. Dlatego zwykle pozwalam wam na Mindera, Opusa i tym podobne. Ale czasem warto zerknąć, co tam w miedzi gra... – Cisza. Nikt się nie zaśmiał. Cóż, humor nigdy nie był moją mocną stroną. – Po prostu dobrze wiedzieć, jak to działa od środka. W jaki sposób myśli komputer.

Umilkłem, prześlizgując się wzrokiem po sali. Wyglądało na to, że studenci przyjęli moje słowa do wiadomości, lecz myślami byli już poza murami uczelni. Pogodziwszy się z tym faktem, zamierzałem pożegnać ich typowym „koniec zajęć, do zobaczenia", lecz nim to zrobiłem, w drugim rzędzie nieśmiało uniosła się ręka. Należała do dziewczyny, której uwagi zawsze trafiały w sedno. A nic mnie tak nie cieszyło, jak studenci wychodzący z charakterystycznego dla nich zblazowania. Dla takich chwil – i takich podopiecznych – wybrałem zawód nauczyciela.

Kiwnąłem głową na znak, że może mówić.

– Panie profesorze – powiedziała cicho – po co mamy myśleć jak komputer, skoro komputer dąży do tego, by myśleć jak człowiek?

Jak zwykle w punkt.

– Może po to – odparłem po chwili zastanowienia – żeby spotkać się z nim w pół drogi?

Kilku studentów parsknęło śmiechem. Wreszcie udało mi się ich rozśmieszyć, chociaż tym razem to wcale nie był dowcip. Przynajmniej nie do końca.

Gdy sala opustoszała, w mojej głowie nadal dźwięczało echo pytania zadanego przez studentkę. Czy rzeczywiście spotkalibyśmy się w połowie drogi? Cóż... Można to sprawdzić.

*

Zacząłem od prostej symulacji – nic spektakularnego, generyczny świat z wyliczonym przez algorytm, pustynnym lądem i jednorodnym, szarym niebem. Żadnych budynków, żadnej roślinności. Nie byłem z tych, których kręciły graficzne wodotryski. Wolałem minimalizm. Zresztą, w tym przypadku liczyła się tylko biegnąca wzdłuż mapy ścieżka, której jeden koniec symbolizował ludzki umysł, drugi zaś – sztuczną inteligencję. Dla ułatwienia posłużyłem się dostępnymi w sieci modelami serca

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



i cyfrowego chipu. Do bólu stereotypowe, owszem... ale jakoś musiałem rozeznać się w terenie, gdy już założę okular i zmaterializuję się wewnątrz symulacji.

„Po co mamy myśleć jak komputer, skoro komputer dąży do tego, by myśleć jak człowiek?" – raz jeszcze wróciły do mnie słowa studentki. Gdyby nie one, pewnie bym teraz smacznie spał, a tak... Pozostało już tylko wrzucić do systemu własne dane, dzięki którym program odpowiednio mnie sprofiluje, oraz miliony, jeśli nie miliardy dysput AI ze studentami. Sztucznej inteligencji również chciałem przydzielić „miejsce w szeregu", a nie mógłbym tego zrobić bez uczelnianej bazy. Zwykły człowiek nie miał do niej dostępu, ja jednak, jako wysoko postawiony akademik, w każdej chwili mogłem wejść do systemu. A tam... Cóż, powiedzmy, że nie tylko korporacje lubiły inwigilować swoich podwładnych. Szkoły wyższe także nie miały skrupułów, by gromadzić wszystko, co robią i myślą studenci.

Swoją drogą to ironiczne (i przy tym dość niepokojące), że ów olbrzymi zbiór rozmów z AI miała wziąć w obroty sieć neuronowa sprzężona z algorytmem genetycznym. Ale nie było innego wyjścia. Sam zapewne potrzebowałbym dekad, by przeanalizować taką ilość danych pod kątem psychologicznym, czy wręcz ontologicznym. Zresztą nie miałem do tego wystarczającej wiedzy. Możliwe, że nikt już nie miał.

Zależało mi na jednym: aby program, posiłkując się uczelnianymi danymi, ustawił mnie oraz awatara AI w odpowiednich pozycjach na linii człowiek-komputer. Droga wolna, niech korzysta z osiągnięć psychologii, antropologii i neurologii poddanych cierpliwej obróbce odpowiednio zorientowanej

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

sieci neuronowej. A gdy skończy... może naprawdę spotkamy się w pół drogi. Może nie ma już między nami żadnej różnicy.

*

Świat był dokładnie taki, jakim go stworzyłem. Ot, najzwyklejszy, wygenerowany cyfrowo ląd z paroma wzniesieniami oraz dwoma statycznymi obiektami. Zadanie, któremu bez trudu powinien sprostać student pierwszego roku. Szczególnie teraz, gdy zamiast języków programowania, mieliśmy prompty i szereg agentów AI od wszystkiego. Niemniej do stworzenia prostej mapy nie trzeba było nowoczesnej technologii. Wystarczyło parę pętli, funkcja randomizująca i odrobina uwagi. Gdybym się uparł, mógłbym powołać do życia czarny jak noc świat składający się z pojedynczego białego odcinka i dwóch punktów. Albo nawet wyświetlić wyniki w terminalu. Chciałem jednak zobaczyć to na własne oczy – stąd decyzja o symulacji.

Podekscytowany, rozejrzałem się wokoło, szukając wzrokiem serca oraz chipu, jednego na granicy człowieczeństwa, drugiego – po stronie cyfrowego mózgu. Światy, które wydawały się niegdyś tak odległe, jak to tylko możliwe, a teraz nie tylko stykają się na krawędzi, lecz stapiają się w jedno. Interferują. Z satysfakcją stwierdziłem, że oba modele – serca oraz układu scalonego – znajdują się w podobnej odległości ode mnie. Niemal idealny środek mapy! Nie będę ukrywał, poczułem satysfakcję. Analiza promptów i danych personalnych z ostatnich kilkunastu lat potwierdziła moje przypuszczenia. Najwyraźniej pół życia z kodem źródłowym, pośród rozmaitych urządzeń elektronicznych, naprawdę umiejscawia człowieka w pół drogi.

Co dziwne, nigdzie nie widziałem srebrzystego robota – a właśnie w takiej postaci miała ujawnić się sztuczna inteligencja. Nie było jej ani przy mnie, ani w pobliżu prostokątnego chipu symbolizującego technologiczną granicę. Obróciłem się na pięcie, przeszyty nagłym strachem. Co jeśli dawno przekroczyła półmetek? Co jeśli... rozumie nas lepiej, niż my – ją? Lecz po drugiej stronie również próżno było jej szukać. Widziałem tylko opustoszałą drogę dzielącą pustynię na dwoje i samotne szkarłatne serce na jej końcu.

Westchnąłem cicho, kręcąc głową z niezadowoleniem. Ewidentnie musiałem schrzanić coś w kodzie – nie podpiąć wyników analizy do programu końcowego albo zapomnieć o modelu robota na poziomie renderingu. Czasem zdarzało mi się popełniać błędy, nie byłem wszechwiedzący. Tak bywa, gdy ślęczysz przed komputerem bez chociaż krótkiej przerwy na sen...

Już sięgałem dłońmi do okularu, by zatrzymać symulację, gdy moją uwagę przykuło coś nietypowego na niebie. Dałbym sobie uciąć rękę, że użyłem jednorodnej, popielatej tekstury, tymczasem nade mną srebrzyła się ogromnych rozmiarów chmura. Przesłaniała cały nieboskłon, od serca aż do chipu. Prawdę mówiąc, nigdy wcześniej nie widziałem takiego modelu. Szum proceduralny zazwyczaj dawał efekt puszystości, ewentualnie wrażenie poszarpanych pasm, jakby smagnąć pędzlem zanurzonym w białej farbie. A zawieszona nade mną struktura nie przypominała ani jednego, ani drugiego... Właściwie niczego, co mogło unosić się w atmosferze. Swoim kształtem – uświadomiłem sobie nagle – przywodziła na myśl człowieka. Nie... nie człowieka.

Robota.

Poczułem ukłucie niepokoju. Dlaczego sztuczna inteligencja, zamiast stać obok mnie, tkwiła wysoko na niebie? Jak limes, granica funkcji... Myśleliśmy o niej w jednym wymiarze, po jednej stronie człowiek, po drugiej – maszyna, a ona od początku była ponad to. Wyznaczała górną granicę.

Z tą ponurą konstatacją wcisnąłem przycisk na okularze, chcąc opuścić symulację. Zanim jednak wirtualny świat na dobre pogrążył się w mroku, raz jeszcze spojrzałem na istotę jaśniejącą na tle szarego firmamentu. Odniosłem wrażenie, że urosła. Przysłaniała coraz więcej nieba.

Albo powoli opadała – przeszło mi przez myśl – by na dobre ukrócić nasze idiotyczne myślenie. Zredukować je do zera. ■

Wojciech Moska

Wojciech Moska: Zawodowo zajmuje się programowaniem i fotografią. Od dziecka mieszka na Górnym Śląsku, choć jego dusza należy do Beskidów i Tatr. Opowiadania fantastyczno-naukowe publikował wcześniej w Magazynie Biały Kruk (w numerach dotyczących fantastyki socjologicznej oraz Księżyca).

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



„Wiadro powietrza” – koniec świata widziany oczami dziecka

Fritz Leiber zapisał się w historii fantastyki przede wszystkim jako twórca Fafhrda i Szarego Kocura, dwóch awanturników ze świata Newhon, których przygody na długo ukształtowały konwencję Miecza i Magii. Ale Leiber był pisarzem o zakresie znacznie szerszym, niż pozwala sądzić ta jedna, najbardziej rozpoznawalna kreacja. Pisał horror, pisał urban fantasy, pisał science fiction, a w 1951 roku opublikował na łamach „Galaxy Science Fiction” opowiadanie, które do dziś pozostaje jednym z najbardziej przejmujących tekstów o końcu świata, jakie kiedykolwiek powstały. „Wiadro powietrza” jest dowodem na to, że Leiber potrafił zmieścić kosmiczną katastrofę w kilkunastu stronach i uczynić z niej historię bardziej poruszającą niż większość epickich apokalips.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Pomysł jest prosty, ale przez to właśnie przerażający. Ciemna gwiazda, być może czarny karzeł, przechodzi w pobliżu Układu Słonecznego i dosłownie wyrywa Ziemię z orbity. Planeta zostaje wyrzucona w przestrzeń międzygwiezdną, gdzie temperatura spada tak nisko, że powietrze zamarza i opada na ziemię warstwami. Najpierw zamarza para wodna, tworząc grubą warstwę śniegu. Potem z atmosfery wytrącają się kolejne gazy: dwutlenek węgla, azot i tlen. Ten ostatni można zebrać do wiadra. Na samej górze znajduje się jeszcze warstwa ciekłego helu. Rodzina, w której centrum stoi narrator, dziesięcioletni chłopiec, żyje w prowizorycznym schronieniu zwanym Gniazdem, otoczonym kocami, z ogniem, który trzeba nieustannie podtrzymywać. Ojciec wychodzi na zewnątrz w skafandrze zrobionym z plastikowych pojemników po żywności, żeby zebrać powietrze do oddychania. Matka wpatruje się w wejście do schronienia z lękiem, który graniczy z obłędem.

W Polsce opowiadanie trafiło do czytelników pod koniec lat osiemdziesiątych, kiedy to Wydawnictwo Alfa opublikowało antologię „Rakietowe dzieci" w wyborze i z posłowiem Wiktora Bukato. Był to zbiór tematyczny, poświęcony dziecku w science fiction, a jego tytuł celowo nawiązywał do pierwszej polskiej antologii zachodniej fantastyki, czyli „Rakietowych szlaków". Obok Leibera znaleźli się tam między innymi Ray Bradbury, Theodore Sturgeon i Frederik Pohl. Dla wielu polskich czytelników, wychowanych w czasach niedoboru wszystkiego, ta książka była jednym z pierwszych okien na zachodnią fantastykę i „Wiadro powietrza" zapadło mi w pamięć jako tekst szczególny, bo pokazujący apokalipsę od strony, której nikt się nie spodziewał. Widzimy ją oczami dziecka, które nie wie, że to koniec.

Siła tego opowiadania nie tkwi w samym pomyśle. Katastrofy kosmiczne były w science fiction obecne od dekad. Siła bierze się z perspektywy, bo Leiber opowiada o końcu świata z punktu widzenia kogoś, kto nie pamięta niczego innego. Dla chłopca zbieranie zamarzniętego tlenu do wiadra jest tak samo naturalne jak dla nas chodzenie do sklepu po mleko. Nie ma w nim tragedii, bo nie ma porównania. Świat, w którym ludzie jedzą zupę z konserw, śpią pod stosem koców i modlą się, żeby ogień nie zgasł, jest jedynym światem, jaki zna. Ukazanie apokalipsy jako codzienności sprawia, że czytelnik patrzy na nią z podwójną perspektywą. Widzimy grozę, której narrator nie dostrzega, a rozbieżność między tym, co wiemy, a tym, co czuje bohater, czyni lekturę tak dojmującą.

Leiber buduje napięcie nie przez katastrofę, która już się wydarzyła, lecz przez rutynę, która ją zastąpiła. Ojciec tłumaczy synowi, jak ważne jest, żeby nie nabrać za dużo dwutlenku węgla, bo można zasnąć na zawsze. Matka liczy, ile razy jeszcze uda się przetrwać kolejną noc. Wszystko jest precyzyjnie zaplanowane, wszystko ma swoją procedurę, a mimo to całe to życie wisi na włosku. Wystarczy, że ogień zgaśnie, że skafander pęknie, że powietrza zabraknie. W tej kruchości, w tym nieustannym balansowaniu na krawędzi, tkwi największa siła opowiadania. Ponieważ Leiber nie epatuje grozą, ale okazuje ją w detalach, w rytuale, w codzienności, która stała się walką o przetrwanie. A jednak w tej opowieści o końcu znanego świata pozostaje miejsce na nadzieję: przetrwanie rodziny okazuje się częścią większej historii odradzającej się ludzkości.

„Wiadro powietrza" jest tekstem, który działa na wielu poziomach. Jako opowieść przygodowa jest sprawny, napięty i pomysłowy. Jako medytacja o kondycji ludzkiej jest głęboko poruszający. Ale jest też świadectwem pewnej epoki w science fiction, tej z przełomu lat czterdziestych i pięćdziesiątych, kiedy gatunek dopiero uczył się, że największe katastrofy można opowiadać w najmniejszej skali. ■

Łukasz Marek Fiema

Łukasz Marek Fiema: Z wykształcenia historyk, z zamiłowania futurolog, pisarz oraz publicysta zajmujący się naukową fikcją spekulatywną. Jego artykuły ukazywały się w czasopismach takich jak „Młody Technik", „Magia i Miecz", „Gwiezdny Pirat" czy „Portal", a opowiadania między innymi w wydawnictwach Śląskiego Klubu Fantastyki, kwartalniku „OkoLica Strachu" oraz antologiach „Sny Umarłych" i „Ku Gwiazdom". Współautor podręczników do gry fabularnej „Neuroshima". Miłośnik książek Isaaca Asimova i Stanisława Lema. Zawodowo związany z polskim sektorem kosmicznym, należał do zespołu odpowiedzialnego za projektowanie satelity EagleEye. Członek Rady Uczestników Konsorcjum Naukowego „Ad Astra". Gość debat na konferencjach naukowych, technologicznych oraz kulturowych poświęconych szeroko pojmowanym przemianom cywilizacyjnym. Wiceprezes Zarządu Stowarzyszenia „Horyzont Jutra". Pomysłodawca, współzałożyciel i Przewodniczący Rady Nadzorczej Polskiej Fundacji Fantastyki Naukowej.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Latarnia dla poczty powietrznej

7 grudnia amerykański Departament Handlu zapalił pierwszą własną latarnię trasy lotniczej – na szlaku pocztowym Chicago–Dallas, o dwadzieścia cztery kilometry na północny wschód od Moline w stanie Illinois. Tego samego dnia inspektor Ralph Lockwood przeprowadził pierwszy urzędowy przegląd zdatności samolotu do lotu; badaniu poddano maszynę Stinson Detroiter przed wydaniem jej nabywcy. Oba wydarzenia są następstwem tegorocznej ustawy o żegludze powietrznej, która oddała lotnictwo zarobkowe pod dozór państwa. Latarnie mają pozwolić wozić pocztę nocą.

Cztery nagrody Nobla naraz

10 grudnia wręczono w Sztokholmie nagrody Nobla, a że dwie z nich zatrzymano w roku ubiegłym, obdarowanych było czterech. Z fizyki za rok bieżący uhonorowano Francuza Jeana Perrina za prace nad nieciągłą budową materii; trzema niezależnymi drogami otrzymał on liczbę cząsteczek w gramocząsteczce bliską $6{,}8{\cdot}10^{23}$. Z chemii nagrodzono Szweda Theodora Svedberga: jego ultrawirówka, obracająca się czterdzieści tysięcy razy na minutę, pozwoliła zważyć cząsteczkę barwnika krwi – wypadło około sześćdziesięciu siedmiu tysięcy. Zaległe nagrody za rok 1925 przypadły Jamesowi Franckowi i Gustawowi Hertzowi za prawa zderzenia elektronu z atomem oraz Richardowi Zsigmondy'emu za naturę roztworów koloidalnych.

Największy motorowiec świata

13 grudnia w stoczni Ansaldo w Sestri Ponente pod Genuą spuszczono na wodę transatlantyk „Augustus" o pojemności trzydziestu dwóch tysięcy sześciuset pięćdziesięciu ton rejestrowych. Napęd stanowią cztery silniki wysokoprężne o łącznej mocy dwudziestu ośmiu tysięcy koni, poruszające cztery śruby; przewidywana szybkość wynosi około dwudziestu węzłów. Jest to największy statek o napędzie spalinowym na świecie. Dotąd trzymano się zdania, że przy takich mocach turbina parowa konkurenta nie ma.

Anglia ujednolica częstotliwość

15 grudnia otrzymała sankcję królewską angielska ustawa o zasilaniu elektrycznym, powołująca Centralny Zarząd Elektryczny. Ma on zbudować sieć przesyłową o napięciu stu trzydziestu dwóch kilowoltów, łączącą elektrownie całego kraju, i – co dla odbiorcy ważniejsze – ujednolicić częstotliwość. Pracuje tam osiemdziesiąt kilka przedsiębiorstw używających prądu o częstotliwości od dwudziestu pięciu do stu okresów na sekundę, tak że silnik kupiony w jednym mieście bywa w drugim bezużyteczny. Przyjęto pięćdziesiąt okresów. Rzecz warto śledzić, bo nasze elektrownie cierpią na tę samą chorobę.

Próbne audycje z Fortu Mokotowskiego

15 grudnia rozpoczęto próbne audycje z nowej radiostacji Polskiego Radia, wzniesionej na wałach Fortu Mokotowskiego pod Warszawą. Stanęły tam dwa maszty wysokości siedemdziesięciu pięciu metrów, rozstawione co sto trzydzieści metrów, a między nimi rozpięto antenę. Nadajnik dostarczyła angielska firma Marconi, z opóźnieniem spowodowanym tegorocznym strajkiem węglowym. Regularne nadawanie przewidziano na styczeń. Dotychczasowa stacja przy ulicy Narbutta, z której program idzie od kwietnia, na potrzeby kraju już nie wystarcza.

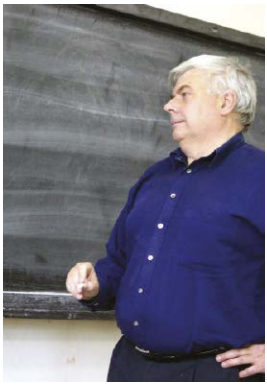
Nowe słowo: foton

W numerze pisma „Nature" z 18 grudnia amerykański chemik Gilbert Newton Lewis zaproponował nazwę dla owego czegoś, co niesie energię promieniowania, a co Einstein od lat dwudziestu nazywa kwantem światła. Nazwa brzmi photon – foton. Sama myśl Lewisa, jakoby foton był rodzajem niezniszczalnego atomu światła, wyda się fizykom zapewne zbyt śmiała. Nazwa jednak jest krótka i poręczna, a takie mają zwyczaj przyjmować się szybciej niż teorie, dla których je ukuto.

Kolej pod Hyde Parkiem

20 grudnia otwarto w Sydney pierwszy w Australii odcinek kolei podziemnej, ze stacjami Museum i St James. Roboty prowadzono sposobem odkrywkowym: przekopano Hyde Park, wywieziono przeszło sto tysięcy metrów sześciennych skały i ziemi, po czym wykop przykryto. Obie stacje mają jedno sklepienie betonowe nad obydwoma peronami, bez słupów pośrodku. Koszt wyniósł dwa miliony funtów z okładem. Robotami kierował inżynier John Bradfield, ten sam, który projektuje wielki most nad zatoką i widzi w tunelu pierwsze ogniwo całego układu komunikacyjnego Sydney. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Z „Młodym Technikiem” jestem związany od półwiecza. Wtedy w naszym kraju można było jeszcze spotkać dinozaura. W 1976 roku opublikowałem w MT artykuł o poszukiwaniu liczb pierwszych – w przededniu eksplozji tej tematyki związanej z metodami szyfrowania wiadomości za pomocą niesamowitych własności tych liczb. Potem przyszła bliższa współpraca. Od 1978 roku pisuję co miesiąc o mojej pięknej matematyce. Chcę i muszę tu podziękować mojemu nauczycielowi matematyki z liceum. Był nim inż. Wacław Chyra (1904–1970) – dowódca kompanii w Powstaniu Warszawskim. Kilkakrotnie podrywał kompanię do straceńczego ataku. Sam przeżył przypadkiem. Kłaniam się nisko, Panie Profesorze.
Na pytanie, jakie mam hobby, odpowiadam, że trzy: 1) matematyka, 2) matematyka, 3) matematyka. Na pytanie o szczęśliwe liczby odpowiadam: 1, 41, 116. Autobusem warszawskiej linii 116 dojeżdżałem do mojej szkoły: warszawskiego Liceum nr 41 im. Joachima Lelewela. Gdy jechałem na egzamin maturalny, podjechał autobus z numerem bocznym 1. Wtedy „jedynka” nie kojarzyła się z oceną niedostateczną, lecz miała raczej znaczenie: „będziesz pierwszy”. Udało się. Zdałem maturę!
Piszę zatem o matematyce. Przenika ona nasze życie. Uczy myślenia, precyzji i spokoju. Nie rozwiązuje naszych codziennych problemów, ale daje nadzieję na ciekawe życie. Dorastają już Czytelnicy „Młodego Technika”, którzy będą żyć w XXII wieku. Zainteresujcie się matematyką.

Gawęda noworoczna

Nowy Rok 2027 już za pasem. Z tej okazji – tak pół żartem, pół serio – gawęda o liczbie 2027, z licznymi dygresjami, jak na osobę w moim wieku przystało. Jest to liczba pierwsza. Dzieli się tylko przez 1 i samą siebie. Na pewno pamiętamy, że najmniejszą liczbą pierwszą jest 2, a potem idą: 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, 37 „i tak dalej”. Używam cudzysłowu, bo nie ma prostej reguły na kolejne liczby pierwsze. Z drugiej zaś strony, w tej nieregularności jest pewien porządek. Liczb pierwszych przybywa mniej więcej logarytmicznie: prawdopodobieństwo, że losowo wybrana liczba naturalna mniejsza od n jest liczbą pierwszą, jest w przybliżeniu równe $\frac{1}{\ln n}$. Rozumowanie „samego Euklidesa”, że liczb pierwszych jest nieskończenie wiele, zachwyciło mnie, niegdysiejszego nastolatka. Warto je znać. To klasyczny dla całej matematyki dowód nie wprost. Bywa nazywany „reductio ad absurdum”, co spolszczane jest na „sprowadzenie do niedorzeczności”. Podobno tak lubił zaskakiwać swoich rozmówców Sokrates. W rozumowaniu tym przypuszczamy (a raczej zakładamy), że jakiś fakt nie ma miejsca, albo że coś się nie wydarzyło (albo przeciwnie, wydarzyło). Następnie metodą Sherlocka Holmesa, czyli dedukcją, wykazujemy, że „coś się nie zgadza”, że pojawia się jakaś sprzeczność, absurd, niezgodność z innymi, niezbitymi faktami. Zatem myliliśmy się w swoim przypuszczeniu. Można powiedzieć, że w przewodzie sądowym każde alibi jest dowodem nie wprost niewinności oskarżonego.

Skupmy się zatem na liczbach pierwszych. Przypuśćmy na chwilę, że jest ich tylko skończenie wiele. Może bardzo dużo, ale zawsze „ileś”. Możemy je wszystkie pomnożyć, a w każdym razie wyobrazić sobie, że to zrobiliśmy. Będzie to bowiem bardzo duża, wręcz ogromna liczba. Jaka by nie była, mogę dodać do niej jeden. Ta nowa liczba, o jeden większa od ogromnego iloczynu wszystkich liczb pierwszych, nie dzieli się przez żadną z nich. Istotnie, po podzieleniu zostanie reszta równa 1. Skoro tak, to nowa liczba jest też liczbą pierwszą, a założyliśmy, że napisaliśmy już

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



1

wszystkie. To jest ta sprzeczność, która dowodzi, że ciąg liczb pierwszych nie ma końca. Gdy znajdziemy liczbę pierwszą, większą od wszystkich dotychczas znanych, możemy być pewni, że wkrótce ktoś znajdzie większą. Nie jest to pogoń bez sensu i tylko po rekordy. Znajomość wielkich liczb pierwszych ma znaczenie w kodowaniu i szyfrowaniu – o czym pisałem miesiąc temu. Obecnie (jesień 2026 roku) największą znaną liczbą pierwszą jest $2^{136279841} - 1$, mająca 41024320 cyfr. Gdyby próbować ją zapisać na taśmie, po jednej cyfrze na milimetr, taśma ciągnęłaby się na 41 kilometrów. Gdybyśmy chcieli ją przeczytać, po jednej cyfrze na sekundę, musielibyśmy mówić przez ponad 475 dni bez przerw na jedzenie, picie, sen i... płukanie gardła. **Rysunek 1** pokazuje okolicznościowy stempel pocztowy sprzed 52 lat, upamiętniający ówcześnie znaną największą liczbę pierwszą. Cóż to za karzełek: ledwie 3376 cyfr!

W prasie i w tak zwanych mediach społecznościowych pełno jest teraz wypowiedzi na temat sztucznej inteligencji, AI. Zabierają głos i wybitni matematycy, przestrzegając przed pogonią za wynikami. Trudno to na początku zrozumieć – przecież w matematyce chcemy coś obliczyć, wykazać jakąś zależność, odkryć coś nowego. Liczy się wynik!

No więc nie do końca. Bardzo często równie ważna jest droga do wyniku – czyli sposób obliczenia, rozumowanie i cała otoczka myślowa. Tak też jest z rozumowaniem, prowadzącym do wniosku, że liczb pierwszych jest nieskończenie wiele. Wydaje nam się ono proste, ale dwa tysiące lat temu było zrozumiałe dla garstki filozofów. Obawy, że sztuczna inteligencja zabije rozumowanie (bo wszystko rozwiąże), są zrozumiałe. Wybiorę jedno z wielu porównań. Zaczynałem turystykę ponad 60 lat temu. Turystą był wtedy ktoś, kto pieszo, na własnych nogach, przemierzał szlaki nizinne i górskie, spał w namiocie na leśnej polanie albo u wieśniaka na sianie. W czasopismach turystycznych udzielano porad, jak zawijać się w koc na noclegu. Śpiwór był mało znanym luksusem. Obecnie „turysta" to ktoś, kto jedzie klimatyzowanym samochodem, autokarem albo samolotem na drugi koniec Europy. Czy zabiło to turystykę, w szczególności górską? Nie. Tylko ją zmieniło. Ale wrócę do matematyki.

Napisałem powyżej coś, co jest oczywiste dla każdego: do każdej liczby, nawet najbardziej ogromnej, mogę dodać 1. Czy można z czymś takim dyskutować? Widocznie można, bo jest to w matematyce sformułowane jako oddzielna reguła, zwana zasadą Archimedesa. Wynika z niej właśnie to, że liczb jest nieskończenie wiele, że każde dwie liczby można pomnożyć. Jest to prawdziwe w matematyce, ale nie w świecie realnym. Liczba atomów w całym Wszechświecie podobno nie przekracza 10^{80} i większych liczb „nie ma". Z nieskończonością matematyczną próbował sobie poradzić matematyk rosyjski, Jesienin-Wołpin w latach sześćdziesiątych XX wieku. Dla władz Związku Radzieckiego był on jednak dysydentem, został zamknięty w zakładzie psychiatrycznym. W końcu pozwolono mu jednak wyjechać do USA, gdzie kariery naukowej nie zrobił, również dlatego, że jego teorie matematyczno-filozoficzne nie dawały się obronić. Nieskończoności nie da się usunąć z matematyki.

Nasza dzisiejsza bohaterka, 2027, jest podwójnie wyjątkowa. Ma swoją siostrę-bliźniaczkę, 2029, też liczbę pierwszą. Liczby pierwsze różniące się o 2 nazywamy właśnie liczbami bliźniaczymi. To bardzo rzadko spotykana sytuacja liczbowa. Im większe liczby, tym rzadziej się to zdarza. Już ponad 100 lat temu (w 1919 roku) Norweg Viggo Brun wykazał, że jeżeli liczb bliźniaczych jest nieskończenie wiele, to są bardzo rzadko położone. Ujmując rzecz ściśle matematycznie, szereg ich odwrotności jest zbieżny. Problem, czy jest tych liczb skończenie, czy nieskończenie wiele, jest wciąż nierozwiązany. Na następną parę liczb

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

bliźniaczych (2081 i 2083) będziemy krócej czekać, niż na całkowite zaćmienie Słońca widoczne w części Polski (7 października 2135 roku).

I tu rzecz ciekawa i charakterystyczna. W 2009 roku matematyk z Cambridge, Timothy Gowers, zaproponował eksperyment: zamiast kilku matematyków pracujących nad problemem w zaciszu gabinetów, otworzyć wspólną pracę w internecie. Każdy mógł komentować, proponować lematy, poprawiać cudze pomysły i tak dalej. Pomysł naturalny na dzisiejsze czasy – aż dziwne, że nikt na to nie wpadł wcześniej. Po kilku udanych próbach postanowiono stworzyć fikcyjną postać: profesor D.H.J. Polymath. Publikuje „on" od czasu do czasu różne prace. Nie jest napisane, kto wniósł jaki wkład w ogólne powodzenie. To słuszne: gdy drużyna zdobywa mistrzostwo świata na przykład w piłce nożnej, wszyscy dostają ten sam medal. W 2014 roku „profesor" Polymath ogłosił ciekawy wynik: jest nieskończenie wiele liczb pierwszych różniących się co najwyżej o ... 246. Gdyby udało się z 246 zejść do 2, byłby to dowód hipotezy Bruna o nieskończoności bliźniaczych liczb pierwszych. D.H.J. Polymath z pewnością nie potrzebuje AI. Może sam nią jest.

***

Lubię w grudniu bawić się takimi zależnościami. Odkryłem, że i dzieci to lubią. Oto zależności na każdy miesiąc roku 2027:
$1=2^{0\cdot 27}$, $2=2+0\cdot 2\cdot 7$, $3=-2+0-2+7$, $4=-20-2+7$,
$5=2\cdot 0-2+7$, $6=20-2+7$, $7=2\cdot 0\cdot 2+7$, $8=20\cdot 2+7$,
$9=2+0\cdot 2+7$, $10=20+2+7$, $11=2+0+2+7$,
$12=-2+0+2\cdot 7$.

Gdy dopuścimy inne funkcje matematyczne (silnia, pierwiastek, logarytm), możliwości nam się zwiększą. A choć wygląda to sztucznie, to jest pewnym ćwiczeniem arytmetycznym. Elementarna wprawa w takich obliczeniach ważna jest nawet w drugiej ćwiartce XXI wieku:

$$15=\log_{\sqrt{2}}(0+2)+7, 17=\frac{20}{2}+7,$$

$$19=(2+0!)!\cdot 2+7$$

***

To tylko zabawa, nic więcej. Następna w zasadzie też, chociaż w poważnych czasopismach matematycznych wciąż pojawiają się nowe prace związane z tym tematem. Jest ona bowiem z pogranicza matematyki, informatyki teoretycznej i praktycznej.

Wrócę do zasady Archimedesa. Wynika z niej, że dowolną liczbę naturalną można otrzymać przez mozolne dodawanie jedynek. Procedurę przyspieszy mnożenie. Pierwszym przykładem jest liczba 6, którą możemy otrzymać z pięciu jedynek: (1+1)(1+1+1). Im większa liczba, tym mniej jedynek zużyjemy... choć nie zawsze! Dla liczby 2027 wystarczą 24 jedynki. Mamy bowiem $2027=25\cdot 81+2=5\cdot 5\cdot 3\cdot 3\cdot 3\cdot 3+2$. Liczbę 2 składamy z dwóch jedynek, trójkę z trzech, a piątkę z pięciu. Da to właśnie 24 jedynki. Mniej nie wystarczy. Można się zdziwić, że dla większej liczby, 2028, wystarczy mniej jedynek, a mianowicie 23. Mamy bowiem $2028=3\cdot 4\cdot 13\cdot 13$. Do trójki trzeba trzech jedynek, do czwórki czterech, a 13 składamy z ośmiu, jako $3\cdot 4+1$. To da właśnie 23 jedynki. A znacznie większa liczba 2916 wymaga jeszcze mniej jedynek, bo 22. Zobaczmy:

$$2916=4\cdot 729=4\cdot 3^6$$

Jak poprzednio, czwórkę składamy z czterech jedynek, trójkę z trzech, a zatem łącznie potrzeba $4+6\cdot 3=22$ jedynek.

Najmniejszą liczbę jedynek, potrzebnych do złożenia z nich danej liczby w ten właśnie sposób, nazywamy złożonością liczby i oznaczamy dwiema kreskami: $\| n \|$. Widzieliśmy zatem, że $\| 2027 \| = 24$. Obliczenie złożoności danej liczby było do niedawna trudnym zadaniem informatycznym. Trzeba było bowiem przeszukać wszystkie możliwe rozkłady. Dlaczego tylko „do niedawna" – wyjaśniam dalej. Empirycznie stwierdzono, że najlepiej rozkładać na potęgi dwójki i trójki. Dlatego dla 2916 potrzeba było „tylko" 22 jedynek.

Wiemy, że liczba $\| n \|$ leży między dwiema krzywymi logarytmicznymi, jedna o podstawie 2, druga o podstawie 3.

$$3\log_3 n \leq \| n \| \leq 3\log_2 n$$

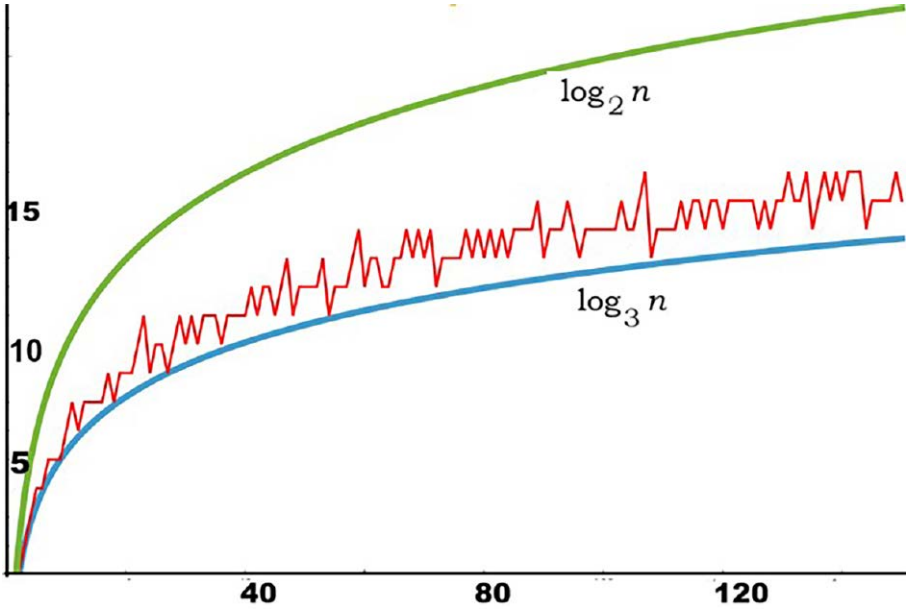
Jak daleko są one od siebie? To ćwiczenie dla licealistów. Podzielmy:

$$\frac{3\log_2 n}{3\log_3 n} = \log_2 3 \approx 1,59$$

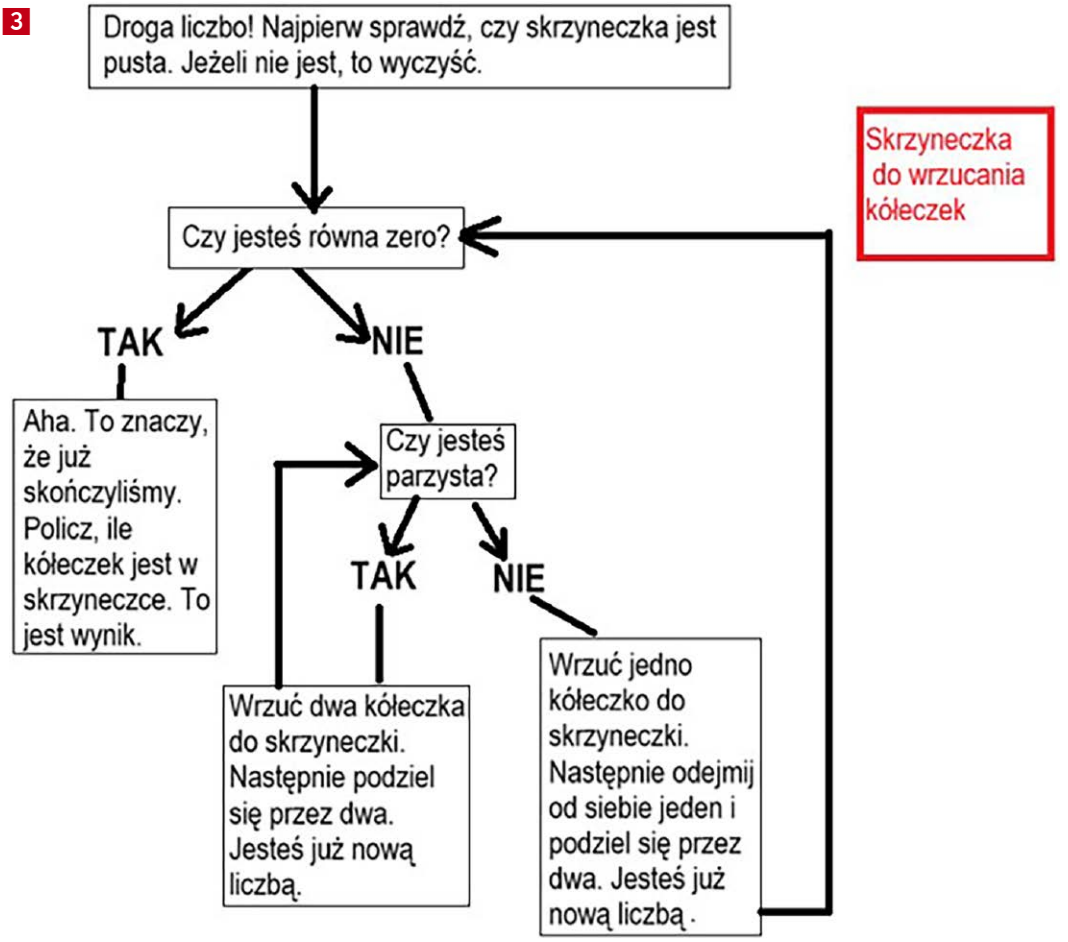
Górne oszacowanie to ponad półtora raza więcej niż dolne – rozbieżność dość duża, ale zawsze coś. Na rysunku 2 mamy w środku wykres złożoności kolejnych liczb od 2 do 150. Widać, że ogólnie rzecz biorąc, złożoność rośnie wraz ze wzrostem n, ale są liczne, drobne spadki. Ciekawe jest też to, że wykres trzyma się tej mniejszej funkcji logarytmicznej – o podstawie 3. To zdumiewające, że w teorii liczb często pojawiają się logarytmy. Najważniejszym przykładem jest rozmieszczenie liczb pierwszych – gęstość ich rozmieszczenia maleje logarytmicznie.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

2



3

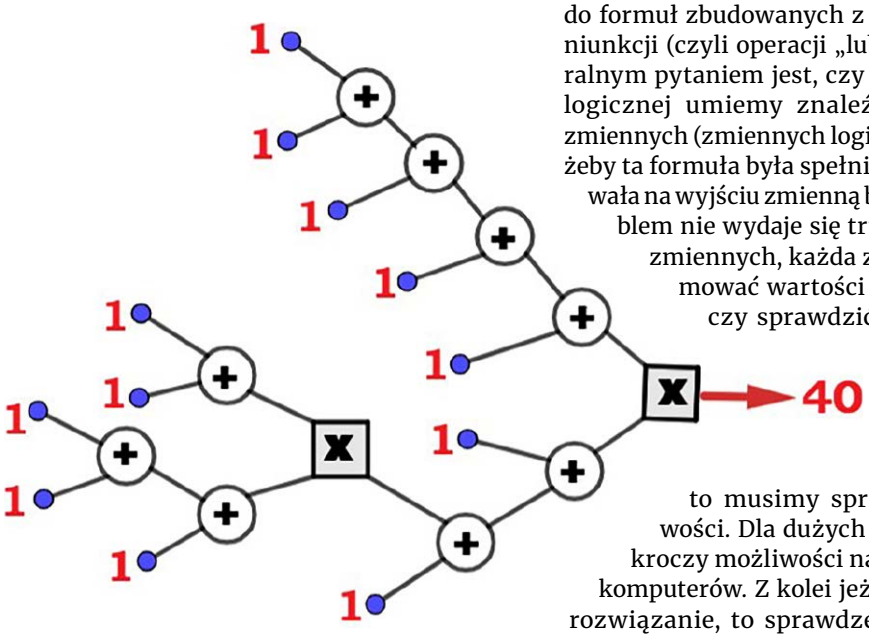


eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Zadanie o jedynkach ma swoją wartość dydaktyczną. Zrozumienie, skąd się bierze górne oszacowanie, jest też dobrym ćwiczeniem ze szkolnej algebry, na schemat Hornera i posługiwanie się układem dwójkowym. Zobaczmy na przykładzie. Wygląda skomplikowanie, ale jest prostym algorytmem na wyznaczanie rozwinięcia binarnego. Zobaczmy to dla liczby n=23. Mamy $23=2\cdot 11+1=2\cdot(2\cdot 5+1)+1=2\cdot(2\cdot(2\cdot 2+1)+1)+1$. Każda dwójka wymaga dwóch jedynek, a jedynka... jednej. Symboli jest nie więcej niż liczba cyfr odjąć jeden, a to jest mniej niż logarytm dwójkowy liczby. Łącznie nie może być jedynek więcej niż właśnie $3\log_2 n$. Przy okazji wyznaczyliśmy w ten sposób przedstawienie binarne: $23_{10}=10011_2$.

Zobaczmy jeszcze liczbę 91. W układzie dwójkowym jest to 1011011. Schemat Hornera daje: $91=2\cdot 45+1=2\cdot(2\cdot 22+1)+1=2\cdot(2\cdot 2\cdot 11+1)+1=2\cdot(2\cdot 2\cdot(2\cdot 5+1)+1)+1=2\cdot(2\cdot 2\cdot(2\cdot(2\cdot 2+1)+1)+1)+1$. Jak i poprzednio, do liczby 2 potrzeba dwóch jedynek. Łącznie potrzeba ich zatem aż 12+4=16. Jeżeli dostrzeżemy, że $91=7\cdot 13$, otrzymamy
$91=((1+1)(1+1+1)+1)((1+1+1)(1+1+1+1)+1)$.
To „tylko” 14 jedynek.

To wszystko daje następne, też proste ćwiczenie z informatyki: napisz program, albo tylko sieć działań na wyznaczanie liczby jedynek schematem Hornera. Zadałem to swoim studentom (pierwszego roku). Chodziło mi o taki schemat, jak na stronie 99.



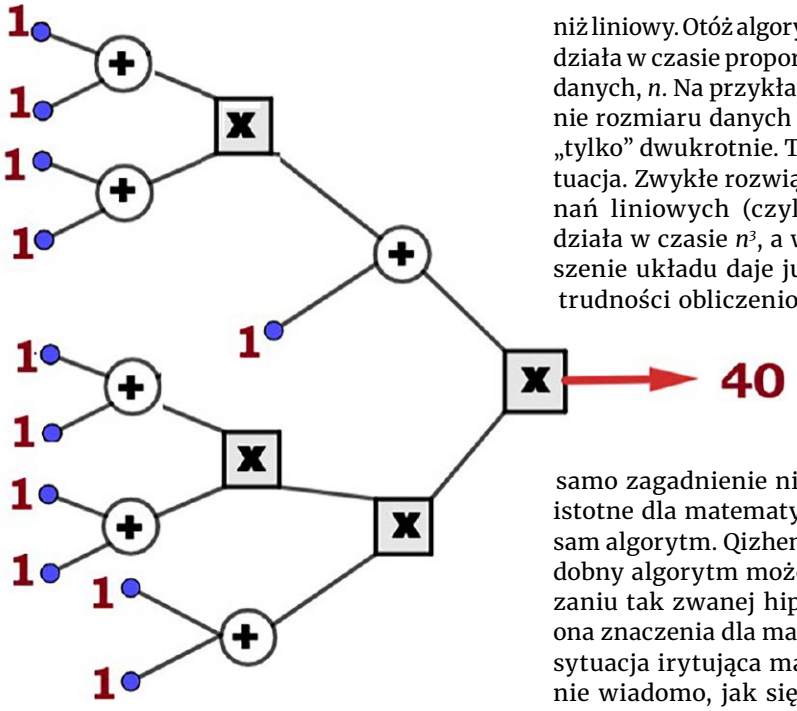
Rysunek 4. Liczba 40 za pomocą 12 jedynek
$40=(1+1+1+1+1)\cdot(((1+1)+(1+1)+1)+1)+1)$

Wydawać się może, że takie problemy to tylko zabawa matematyków i łamigłówki bez praktycznych zastosowań. Jednak nie jest to tylko zapisywanie liczb jedynkami. Ma to kilka całkiem poważnych zastosowań – no, może nie bezpośrednio do budowy mostów. Chodzi o projektowanie obwodów arytmetycznych: chcemy obliczyć daną liczbę przy użyciu możliwie małej liczby operacji. Podobny problem występuje przy obliczaniu potęgi a^n. Zamiast mnożyć a przez siebie $n-1$ razy, szukamy sprytnego sposobu, na przykład $a^{15}=((a^2)^2)^2\cdot(a^2)^2\cdot a^2\cdot a$. Wymaga to sześciu podnoszeń do kwadratu i 3 mnożeń – mniej operacji niż przy tradycyjnym sposobie.

Kilkanaście lat temu firma Hewlett-Packard podała, jaki algorytm stosuje w swoich kalkulatorach do operacji mnożenia. Nie mam wątpliwości, że podali do publicznej wiadomości, bo znaleźli lepszy, oszczędzający może nanosekundy. Nawet w najprostszej matematyce znajdzie się jeszcze coś do udoskonalenia.

Bodaj najważniejszym problemem informatyki teoretycznej jest zagadnienie spełnialności formuły logicznej. Możemy ograniczyć się do formuł zbudowanych z alternatywy i koniunkcji (czyli operacji „lub” oraz „i”). Naturalnym pytaniem jest, czy dla danej formuły logicznej umiemy znaleźć takie wartości zmiennych (zmiennych logicznych, czyli 0 i 1), żeby ta formuła była spełniona, to znaczy dawała na wyjściu zmienną boole'owską 1. Problem nie wydaje się trudny: mamy kilka zmiennych, każda z nich może przyjmować wartości 0 albo 1 i wystarczy sprawdzić. Tak, to prawda, że „wystarczy sprawdzić” – tyle, że jeżeli zmiennych jest n, to musimy sprawdzić 2^n możliwości. Dla dużych n to szybko przekroczy możliwości nawet najszybszych komputerów. Z kolei jeżeli ktoś nam poda rozwiązanie, to sprawdzenie, czy jest ono poprawne, da się stwierdzić szybko. Znalezienie szybkiego algorytmu (dokładniej:

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Rysunek 5. Liczba 40 za pomocą 11 jedynek: 40=(1+1+1+1+1)(1+1)(1+1)(1+1)

działającego w czasie wielomianowym) wywołałoby tsunami matematyczne, a bardziej informatyczne. To byłby klucz, który otwiera wszystkie zamki. Padłyby wszystkie szyfry i zabezpieczenia. Możemy jednak spać spokojnie, to mniej prawdopodobne, niż uderzenie planetoidy w Ziemię.

Diagramy widoczne na rysunkach 4 i 5 to też diagramy logiczne; w każdym razie, jeżeli zastąpimy symbole arytmetyczne „plus" i „razy" przez logiczne: „lub", „i", czyli alternatywę i koniunkcję. Ale o tym innym razem. Zobaczmy sieć działań, prowadzących do wyrażenia liczby 40 samymi jedynkami:

Jak wyznaczyć najmniejszą liczbę jedynek, za pomocą których można wyrazić daną liczbę *n*? Do niedawna wydawało się, że jest to trudne zadanie obliczeniowe, bo do wyznaczenia tej liczby potrzeba wyznaczenia jej dla wszystkich liczb mniejszych od n. To bardzo powolny proces.

W 2023 roku Qizheng He ze znanego uniwersytetu Cornell w Ithaca w stanie Nowy Jork znalazł zadziwiająco szybko działający algorytm na wyznaczenie złożoności liczby *n*. Jest to tak zwany algorytm podliniowy – szybszy niż liniowy. Otóż algorytm liniowy to taki, który działa w czasie proporcjonalnym do rozmiaru danych, *n*. Na przykład dwukrotne zwiększenie rozmiaru danych wydłuża czas działania „tylko" dwukrotnie. To i tak bardzo dobra sytuacja. Zwykłe rozwiązywanie układów równań liniowych (czyli pierwszego stopnia) działa w czasie n^3, a więc dwukrotne zwiększenie układu daje już ośmiokrotny wzrost trudności obliczeniowych. Algorytmy podliniowe działają jeszcze szybciej. Algorytm He działa w czasie proporcjonalnym do $n^{0,6154}$.

Chociaż, jak pisałem, samo zagadnienie nie wydaje się specjalnie istotne dla matematyki, to zdumienie budzi sam algorytm. Qizheng He jest zdania, że podobny algorytm może dać postęp w rozwiązaniu tak zwanej hipotezy Collatza. Nie ma ona znaczenia dla matematyki. Jest to jednak sytuacja irytująca matematyków: właściwie nie wiadomo, jak się w ogóle zabrać do takiego zadania.

Wyjaśniam dokładnie. Procedura jest prosta. Wybieramy dowolnie liczbę naturalną *n*. Jeżeli jest ona parzysta, to dzielimy ją przez 2. Jeżeli jest nieparzysta, to obliczamy 3n+1. Procedurę powtarzamy. Tak długo, jak... no, właśnie. Zobaczmy dla n=2027. Pierwszy krok daje 3 · 2027+1=6082. Dzielimy przez 2, otrzymując 3041. Tu znów musimy pomnożyć przez 3 i dodać 1. Otrzymujemy 9124. Dzielimy przez 2, potem znowu przez 2 i tak dalej. Ciągnie się to chaotycznie, osiąga najwyższą liczbę 17332 i dopiero w okolicy 140. miejsca zaczyna się „uspokajać". Na miejscu numer 150 jest liczba 10, a potem mamy oczywiście 5, 16, 8, 4, 2, 1. Gdy ciąg osiągnie jedynkę, już się od niej nie uwolni: będzie się bez końca powtarzać cykl 4, 2, 1, 4, 2, 1... Gdy zaczęliśmy od 2027, dostaliśmy jedynkę na miejscu 156. I oto problem: czy dla każdej liczby początkowej n jedynkę kiedyś otrzymamy?

W dawnych zabawach ludowych była i konkurencja: wejść na kilkumetrowy słup posmarowany mydłem. Na razie problem Collatza jest dla matematyków takim właśnie słupem. Ale bywało, że ktoś wreszcie wchodził, więc i problemy, o których piszę w tej gawędzie noworocznej, znajdą kiedyś rozwiązanie.■

Michał Szurek

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Chemia chrupiącej skórki

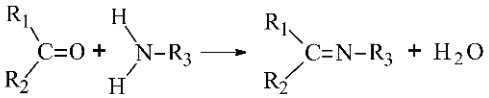
Wkrótce święta stanowiące okazję do spotkań w rodzinnym gronie. Oprócz prezentów tradycyjnie czekają na nas kulinarne atrakcje świątecznego stołu. Chrupiąca skórka na pieczeni, woń świeżego pieczywa, zaparzonej kawy i słodkich wypieków. Ślinka sama cieknie do ust, a za smakowo-zapachowe efekty przysmaków odpowiada pewien proces chemiczny.

Wspólną cechą wymienionych wyżej przykładów potraw jest ciemnienie produktów żywnościowych poddanych obróbce cieplnej (smażenie, pieczenie). Efekt ten zaobserwowano już w początkach użycia ognia przez praludzi, ale na jego wyjaśnienie przyszło poczekać do początków ubiegłego stulecia. Wspomnianym wyżej procesem jest ...

...reakcja Maillarda

Nazwa przemiany, jak wielu innych, pochodzi od nazwiska odkrywcy – w tym przypadku był to francuski chemik **Louis Camille Maillard**. W roku 1912 opublikował opis reakcji zachodzącej pomiędzy cukrami a aminokwasami w podwyższonej temperaturze, ale wyjaśnienie podano w połowie XX wieku (**1**). Wtedy amerykański chemik **John Edward Hodge** opisał mechanizm poszczególnych etapów tej reakcji i zidentyfikował szereg powstających produktów. Jednak słowo „wyjaśnienie" jest określeniem trochę na wyrost, ponieważ nadal tylko mniej więcej wiemy, co się dzieje i co ostatecznie powstaje podczas zachodzących przemian.

Reakcja zaczyna się od przyłączenia aminokwasu do cukru, na przykład glukozy. Oczywiście oba reagujące związki mogą wchodzić, i zwykle tak jest, w skład bardziej skomplikowanych połączeń – w typowej przemianie zachodzącej w kuchni biorą udział białka powstałe z aminokwasów. Przebieg reakcji można zapisać schematycznym równaniem (po stronie substratów z lewej znajduje się cukier, z prawej aminokwas; R_1, R_2 i R_3 oznaczają części molekuł nieulegające zmianom podczas procesu):





1. Louis Camille Maillard (1878–1936)

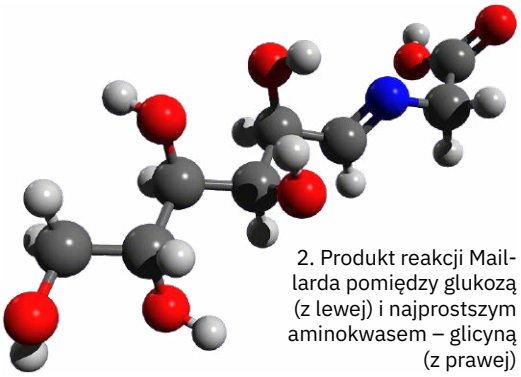
Zapis równania reakcji nie wygląda na specjalnie skomplikowany, ale to dopiero początek przemian (**2**). W tym miejscu rozpoczyna się ...

...magia chemii

Produkt połączenia reaguje dalej, w wyniku czego ostatecznie powstają liczne związki o złożonej budowie. Wiele z nich charakteryzuje się wyraźnym smakiem i aromatem, a część posiada ciemne zabarwienie, które odpowiada za brunatnienie ogrzewanych produktów.

W reakcji Maillarda mogą brać udział praktycznie dowolne związki zawierające w swoim składzie cukry i aminokwasy. Białka buduje około 20 aminokwasów, w produktach żywnościowych

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



2. Produkt reakcji Maillarda pomiędzy glukozą (z lewej) i najprostszym aminokwasem – glicyną (z prawej)



3. Zanurzenie precli przed wypiekiem w roztworze sody zapewni im ciemną, chrupiącą skórkę (aut. MikeGoad, pixabay.com)

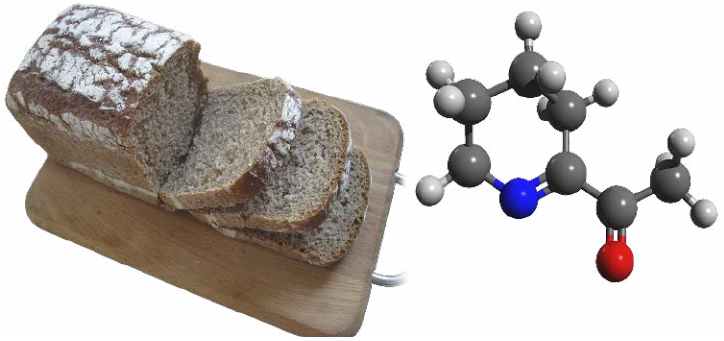
powszechnie występują również liczne cukry. Z tego właśnie faktu wynika mnogość możliwych reakcji pomiędzy substratami, a także złożoność i wielokierunkowość zachodzących przemian. Zresztą jest to ogólna cecha związków organicznych, wśród których nawet reakcje pomiędzy prostymi cząsteczkami często dają wiele produktów ubocznych. To także stanowi uzasadnienie wspomnianego wyżej faktu częściowej tylko znajomości mechanizmu przemiany i jej końcowych produktów.

Coś jednak wiemy na pewno. Reakcja Maillarda zachodzi już w temperaturze pokojowej, ale ogrzewanie – jak w przypadku wszystkich innych reakcji – znacznie ją przyspiesza. Reakcja zachodzi także szybciej przy podwyższonym pH, czyli w obecności zasad, które aktywują grupę aminową i sprzyjają przemianom cukrów, odwrotnie zaś działają kwasy. Dlatego na przykład przepis na precle zaleca, aby przed upieczeniem zanurzyć je na chwilę w roztworze sody (**3**). Podobnie działa niska zawartość wody – suche produkty szybciej się przyrumienią niż wilgotne. Również dostęp tlenu, czas i temperatura ogrzewania oraz obecność innych związków wpływają na szybkość i przebieg reakcji. W konsekwencji wszystkie te czynniki dają iście astronomiczną liczbę możliwych kombinacji. Każdy rodzaj produktów żywnościowych poddanych obróbce termicznej wytwarza zatem swoiste połączenia smakowo-zapachowe.

W kuchni ...

...reakcja Maillarda jest codziennością. To właśnie dzięki niej przyrumieniają się frytki, nabiera koloru smażona cebulka, na wypiekach i pieczeni powstaje chrupiąca skórka, ale także przypala się mleko. Zachodzącym przemianom swój aromat zawdzięczają kawa, pieczywo, prażona kukurydza, przyrumienione na patelni mięso czy też warzywa (**4**). Nie są wcale przesadą słowa francuskiego chemika **Jean-Marie Lehna**, noblisty z roku 1987, że reakcja Maillarda jest najpowszechniej przeprowadzaną reakcją na świecie. Cóż, kuchnia to także laboratorium chemiczne.

Jednym z końcowych produktów reakcji Maillarda są wielkocząsteczkowe związki o ciemnym zabarwieniu noszące zbiorczą nazwę **melanoidyn** (z greckiego *melas* = czarny). To one właśnie nadają charakterystyczne brązowe zabarwienie produktom żywnościowym poddanym obróbce cieplnej. Dodatkowo uważa się, że niektóre z nich są przeciwutleniaczami, a przez neutralizację wolnych rodników opóźniają procesy starzenia i korzystnie wpływają na kondycję



4. Związek widoczny z prawej strony odpowiada między innymi za aromat pieczywa

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



5. Melanoidyny zawarte w kawie korzystnie wpływają na zdrowie, ale nie przesadzaj z tą używką

komórek naszego ciała. Ich powstawanie to jeden z powodów, dla którego picie kawy (oczywiście w rozsądnych ilościach) ma pozytywne działanie na organizm człowieka (**5**).

Chrupiąca skórka jest więc nie tylko smaczna, ale i zdrowa. Pamiętaj jednak, aby tylko nie przesadzić z przypiekaniem, ponieważ w mocno przypalonej warstwie powstają wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne o potwierdzonym działaniu rakotwórczym. W takich warunkach tworzy się również szkodliwy **akrylamid**, produkt przemian cukrów i aminokwasu asparaginy. W znaczących ilościach powstaje zwłaszcza podczas pieczenia i smażenia produktów o dużej zawartości skrobi, na przykład chipsów. Trzeba więc uważać (**6**).

Ponieważ chemik eksperymentuje nawet w kuchni, świąteczne wypieki mogą posłużyć ci do doświadczalnego sprawdzenia wyników reakcji Maillarda. Przygotuj ciasto jak na bułeczki i uformuj z niego kilka sztuk. Powierzchnię jednej bułki posmaruj roztworem sody oczyszczonej, innej zaś kwasu cytrynowego. Kolejną posyp zwykłym cukrem lub glukozą (dostępną w sklepach spożywczych), a następną posmaruj roztworem białka jaja kurzego. Czy otrzymane rezultaty potwierdziły podane wcześniej wiadomości?

W odcieniach brązu

Reakcja Maillarda to fragment szerszego zjawiska zwanego **nieenzymatycznym brązowieniem żywności**. Zaliczają się do niego przemiany składników żywności (cukrów, białek i kilku innych) prowadzące do powstania ciemno zabarwionych produktów. Składniki reagują ze sobą (jak w reakcji Maillarda), rozkładają się pod wpływem ogrzewania, a także utleniają w obecności powietrza i niektórych metali.

Znanym wszystkim procesem z tej grupy jest **karmelizacja**, czyli brązowienie ogrzewanych cukrów. Mimo podobnego efektu smakowo-zapachowego różni się ona jednak od reakcji Maillarda. Do karmelizacji wystarczą same cukry, bez obecności białek, a ponadto proces wymaga wysokiej temperatury, na przykład dla sacharozy – czyli cukru, którego używamy na co dzień – rozpoczyna się dopiero w 160°C. Reakcja Maillarda zachodzi już w temperaturze pokojowej, choć oczywiście znacznie przyspiesza ją ogrzewanie. Podczas przygotowywania żywności obie przemiany zachodzą najczęściej razem, a smak i zapach potraw jest ich wspólnym efektem. Tak właśnie dzieje się w wypadku palonej kawy, popularnych „krówek" czy też piwa, któremu aromat nadaje ogrzewany słód jęczmienny.

W produktach żywnościowych często przebiega również **brązowienie enzymatyczne**. Działanie komórkowych katalizatorów – enzymów – powoduje na przykład ciemnienie przekrojonych jabłek, ziemniaków, niektórych grzybów czy też powstawanie brązowych plamek na bananach (**7**).

Druga strona reakcji Maillarda

Oprócz niewątpliwych walorów kulinarnych reakcja Maillarda ma również drugą, mniej korzystną stronę. Pierwsi zauważyli ją producenci żywności zaniepokojeni zmianami koloru,



6. Uważaj, aby nie przypiec zbyt mocno! (aut. RealAKP, pixabay.com)

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



7. Ciemne plamki na bananach to efekt brązowienia enzymatycznego

smaku i zapachu swych wyrobów, co zniechęcało konsumentów. Obecnie potrafimy już w pewnym stopniu zapobiec niekorzystnemu zjawisku lub przynajmniej je spowolnić. Jeżeli przepisy prawne i technologiczne na to pozwalają, produkty żywnościowe są przygotowywane z dodatkiem kwasów (na przykład octowego, cytrynowego czy też askorbinowego – witaminy C) lub też słodzone substancjami nieulegającymi reakcji Maillarda (na przykład sorbitolem). Jednak naprawdę złowrogie oblicze przemiana ukazuje zupełnie gdzie indziej.

Poranny pośpiech, więc na pierwsze śniadanie słodka bułka, chleb z dżemem i kawa z kilkoma łyżeczkami cukru, bo czas nagli. A później, gdy dopadnie „mały głód", także chętnie sięgamy po słodką przekąskę. Brzmi znajomo? A to poważny błąd. Cukier szybko przechodzi do krwiobiegu, zaś produkty rozpadu sacharozy – glukoza i fruktoza – zaczynają reagować z białkami naszego organizmu. Degeneracja protein



8. Operacja zaćmy (aut. hysw001, pixabay.com)

zachodzi również naturalnie, zmienione molekuły organizm stara się więc usuwać w procesach naprawczych. Problem pojawia się jednak, gdy w reakcję Maillarda wchodzą białka długożyciowe, z natury przeznaczone do wieloletniej pracy: krystalina w soczewce oka, mielinowe osłonki nerwów i kolagen w membranach nerek. Białka te, zmienione przez połączenie z cukrem, tracą zdolność pełnienia swoich funkcji i dodatkowo długo obciążają organizm. Dowodami na takie właśnie skutki reakcji Maillarda są typowe powikłania u diabetyków: zaćma, uszkodzenie nerek i zapalenie nerwów (8). Także zwiększony poziom cholesterolu i lipidów, wraz ze wszystkimi tego konsekwencjami (miażdżyca, udary, choroba wieńcowa), jest efektem utraty zdolności wychwytywania kwasów tłuszczowych i cholesterolu przez zmienione albuminy krwi. Oczywiście niekorzystne zmiany nie zajdą tak szybko, jak podczas smażenia potraw. Trwające wiele lat działanie cukrów na białka zawsze jednak prowadzi do degeneracji naszych protein.

Bez paniki

Glukoza to konieczny do życia składnik pożywienia, „paliwo" dla układu nerwowego i czerwonych krwinek, a jej względnie stałe stężenie we krwi stanowi niezbędny warunek homeostazy. Nie należy więc popadać w panikę i całkowicie zrezygnować z cukru, sporadyczne chwile „słodkiej przyjemności" z pewnością nam nie zaszkodzą. Bez wątpienia jednak zwiększona zapadalność na choroby cywilizacyjne jest związana ze wzrostem produkcji i spożycia cukru. Choć dla większości czytelników to odległa perspektywa, należy pamiętać, że na zdrowie w wieku dojrzałym pracuje się całe życie. Warto więc, mimo porannego pośpiechu, zacząć dzień od wartościowego białkowego posiłku, unikać jedzenia słodkich potraw na czczo, a węglowodany zawsze łączyć z białkami i tłuszczami, nie zapominając przy tym o składnikach balastowych zawierających błonnik. Nasz organizm będzie wdzięczny za takie postępowanie.

Reakcja Maillarda pokazuje, że chemia, wbrew obiegowym opiniom, ma jak najbardziej praktyczne zastosowania, na przykład jest w stanie wyjaśnić tajniki przygotowywania potraw. Może opowieścią o nich zaciekawisz gości przy świątecznym stole? ■

Krzysztof Orliński

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Kierunek „Rzeczywistość”

W poszukiwaniu chemii budowlanej

Znalezienie informacji o studiach nie powinno stanowić problemu. Mamy wyszukiwarki, strony uczelni i sztuczną inteligencję, która chętnie wszystko wyjaśni. Trudniej ustalić, które wiadomości są aktualne. Można poznać program, wybrać miasto, a na końcu dowiedzieć się, że naboru już nie ma. Przyjrzeliśmy się temu, szukając chemii budowlanej. Zapraszamy na małe rozpoznanie terenu.

Chemia budowlana brzmi jak propozycja dla osób, które lubią chemię i chciałyby wykorzystać ją w praktyce. Kleje, zaprawy, materiały izolacyjne. Ktoś musi je opracować i zbadać. W internecie znajdziemy informacje o wspólnym kierunku Politechniki Łódzkiej, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie i Politechniki Gdańskiej. Trzy uczelnie, zajęcia w ośrodkach partnerskich. Wygląda zachęcająco. Pozostaje dostać się na studia.

Najpierw jednak trzeba znaleźć rekrutację. Na jednej stronie czytamy o studiach pierwszego stopnia, na kolejnej o magisterskich, a gdzie indziej trafiamy na informacje dla obecnych studentów. Trudno z tego wywnioskować, gdzie można rozpocząć naukę. Przybywa otwartych kart, a odpowiedzi nadal nie ma. Sprawdźmy więc, co właściwie robi za nas wyszukiwarka. Po wpisaniu pytania nie przegląda ona całego internetu od początku.

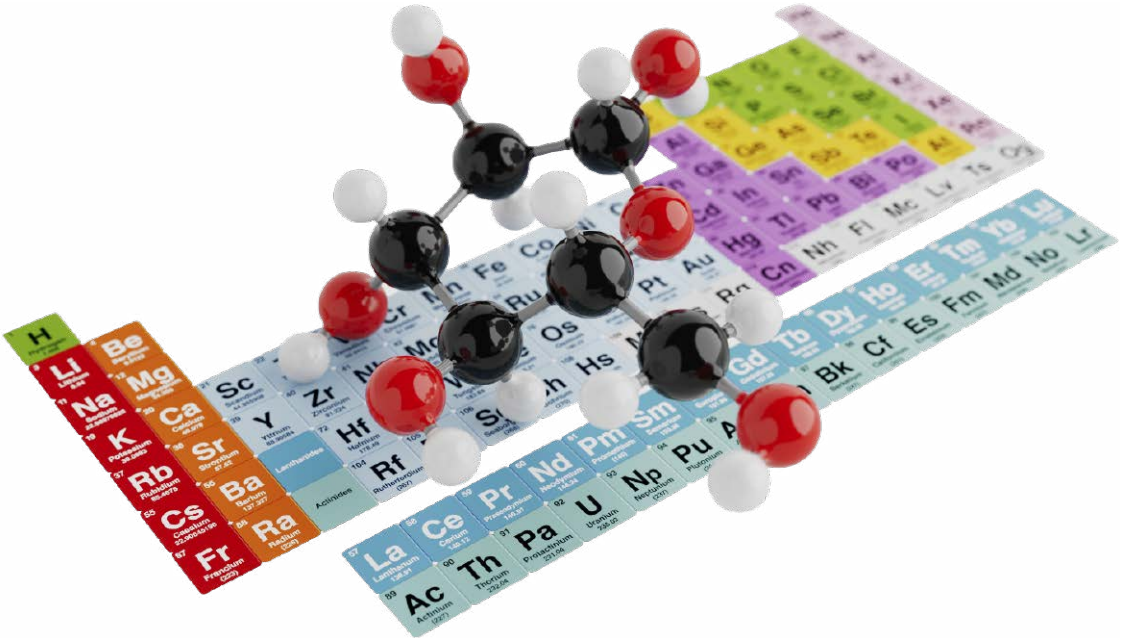
eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Wcześniej strony odwiedzają programy zwane crawlerami, czyli robotami zbierającymi ich zawartość. Następnie system analizuje zebrane materiały i zapisuje informacje o nich w indeksie. Dzięki niemu może szybko znaleźć strony pasujące do zapytania i ustalić kolejność wyników. Nie oznacza to jednak, że wszystkie wiadomości zostały sprawdzone przed chwilą. Roboty odwiedzają strony w różnym czasie, a zmiany trzeba jeszcze uwzględnić w indeksie. Do tego dochodzi zawartość samej witryny. Jeśli pozostawiono na niej opis dawnego kierunku, ponowne odwiedziny robota nie zmienią go w aktualną ofertę. Wyszukiwarka może więc znaleźć dokładnie te słowa, których szukamy, i doprowadzić nas do studiów, na które już się nie zapiszemy. Wysoka pozycja w wynikach nie jest potwierdzeniem trwającego naboru.

Z pomocą przyszły nam odpowiedzi na pytania, które zadaliśmy uczelniom. Politechnika Łódzka poinformowała, że ostatni nabór na międzyuczelnianą chemię budowlaną pierwszego stopnia odbył się na rok 2023/2024. Politechnika Gdańska potwierdziła wygaszanie kierunku i brak nowej rekrutacji. Zapewnia jednak obecnym studentom możliwość ukończenia nauki według ich programu. Znalezione materiały nadal są więc potrzebne, tyle że komuś, kto już studiuje. Dlaczego zakończono współpracę? Politechnika Łódzka wskazuje na zmiany ofert uczelni oraz oczekiwania kandydatów, którzy wolą uczyć się w jednym ośrodku. AGH podkreśla brak zainteresowania. W ostatnich latach kierunek prowadzono dla pojedynczych osób. Do tego dochodziły koszty i trudności organizacyjne związane ze zmianami miejsca studiowania. Trzy miasta to ciekawa perspektywa, ale również kolejne przeprowadzki, szukanie mieszkania i układanie sobie życia od nowa. Jeśli do nauki trzeba dołożyć pracę, robi się z tego całkiem wymagająca specjalność. Osobom szukającym dalszej edukacji mogły wpaść w oko studia magisterskie. Niestety, tutaj również potrzebne jest wyjaśnienie. Politechnika Łódzka prowadziła własną chemię budowlaną drugiego stopnia tylko raz, w roku akademickim 2022/2023. W kolejnych latach zabrakło chętnych. Po trzech latach nieuruchamiania studiów zrezygnowano z dalszej rekrutacji. Naboru na 2026/2027 nie przewidziano. Według odpowiedzi AGH przygotowany tam samodzielny drugi stopień nigdy nie wystartował, także z powodu braku zainteresowania. Politechnika Gdańska poinformowała natomiast, że nie planuje kolejnej rekrutacji na drugi stopień tego kierunku. Samo przygotowanie programu nie wystarczy więc, by zajęcia się rozpoczęły. Potrzebni są jeszcze studenci. Kandydat musi ustalić, które z opisanych propozycji rzeczywiście można rozpocząć.

Co w takim razie zrobić z informacyjnym bałaganem? Można by zaproponować proste rozwiązanie: usunąć stare materiały. Tylko co wtedy z osobami, które nadal według tych programów studiują? Albo z absolwentem potrzebującym dokumentacji swojej edukacji? Internetowe archiwum ma swoje zastosowanie. Problem zaczyna się wtedy, gdy trudno je odróżnić od bieżącej oferty. Tym zagadnieniem zajmują się między innymi specjaliści od baz danych. Poprzednie wersje zapisów można zachowywać, na przykład w tabelach temporalnych. Pozwalają one odtworzyć stan bazy z określonego momentu. Trzeba jednak odróżnić datę zmiany zapisu od czasu, którego dotyczy informacja. Wczoraj można było dodać program studiów sprzed pięciu lat. Plik jest nowy, program już niekoniecznie. Dlatego potrzebne są również metadane, czyli informacje opisujące dane. W przypadku studiów mogłyby to być: nazwa uczelni, stopień kształcenia, rok akademicki i status rekrutacji. Dobrze zaprojektowany system pozwoliłby dzięki nim oddzielić ofertę dla kandydatów od dokumentacji dla obecnych studentów. Oczywiście pod warunkiem, że ktoś zadba o poprawne opisy i ich aktualizowanie. Jest więc praca dla informatyków, ale również dla osób odpowiedzialnych za treść. Sama baza nie dowie się, że w tym roku nie zebrano grupy. Aktualizowanie rozproszonych stron nie zawsze nadąża za zmianami oferty. Można to zrozumieć, ale przed wyborem studiów trzeba wyjaśnić wątpliwości. Nam pomogło wysłanie maili do uczelni. A sztuczna inteligencja? Może oszczędzi nam szukania. Wiele zależy od materiałów, z których skorzysta. W rozwiązaniu RAG, od angielskiego retrieval-augmented generation, generowanie odpowiedzi jest wspomagane wyszukiwaniem. System odnajduje fragmenty dokumentów i przekazuje je modelowi językowemu, który na ich podstawie przygotowuje wypowiedź. Brzmi rozsądnie. Trzeba jednak dopilnować, żeby wybrane materiały odpowiadały na nasze pytanie. Jeśli jeden dotyczy starego programu inżynierskiego, drugi planowanych studiów magisterskich, a trzeci obecnych

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



studentów, łatwo o pomieszanie informacji. Model, który pominie te różnice, może opisać ofertę, jakiej w rzeczywistości nie ma. To możliwy błąd, któremu projektanci takich systemów muszą zapobiegać. Pomagają w tym odpowiedni dobór dokumentów, aktualizowanie indeksu i wskazywanie źródeł odpowiedzi. Nam również przyda się zajrzenie do tych źródeł. Ładnie napisany akapit nie zastąpi potwierdzenia rekrutacji.

Po tym wszystkim można odnieść wrażenie, że łatwiej studiować informatykę niż znaleźć chemię budowlaną. Na szczęście nie trzeba zmieniać zainteresowań. Wystarczy poszukać kształcenia, które pozwoli je rozwijać, również pod inną nazwą. W ofercie AGH na rok 2026/2027 znajduje się komputerowo wspomagana inżynieria materiałów budowlanych. Nauka trwa siedem semestrów i prowadzi do uzyskania tytułu inżyniera. Są to studia stacjonarne, łączące matematykę, fizykę i chemię z projektowaniem oraz wytwarzaniem materiałów. Do tego dochodzą narzędzia informatyczne. W opisie znajdziemy modelowanie CAD, metody obliczeniowe, uczenie maszynowe oraz modelowanie procesów chemicznych. Chemia i informatyka spotykają się więc również w programie studiów. AGH nie nazywa tego kierunku bezpośrednią kontynuacją chemii budowlanej. Warto sprawdzić, czy proponowane połączenie materiałów, chemii i informatyki odpowiada naszym zainteresowaniom. Na osoby zainteresowane studiami magisterskimi czeka kolejna propozycja do sprawdzenia: technologia chemiczna w AGH. Na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, w ścieżce Inżynieria i Zarządzanie Procesami Przemysłowymi, opisano blok Materiały budowlane. Obejmuje on specjalności dotyczące ceramiki budowlanej, technologii betonu i inżynierii materiałów wiążących. Przed podjęciem decyzji trzeba ustalić, czy posiadany dyplom pozwala ubiegać się o przyjęcie oraz czy wybrana ścieżka będzie dostępna w danym naborze.

Jest jeszcze drobiazg. Sprawdzona 6 października strona AGH opisująca nowy kierunek nadal wymieniała chemię budowlaną jako możliwość kontynuacji na drugim stopniu. Tymczasem uczelnia poinformowała nas, że ten program nigdy nie wystartował. Dobrze, że zapytaliśmy. Znaleźliśmy inne możliwości, a przy okazji dowiedzieliśmy się trochę o wyszukiwarkach, bazach danych i sztucznej inteligencji. Przyda się to także poza rekrutacją. Informacja może być prawdziwa, ale dotyczyć innego roku lub innej grupy osób. Dlatego warto sprawdzić program, warunki naboru i potwierdzić uruchomienie studiów. Potem pozostanie już tylko dostać się na uczelnię. Chemia z pewnością dostarczy kolejnych pytań. Oby odpowiedzi łatwiej było uporządkować. ■

Michał Pacholski

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Ładunek elementarny

W 1923 roku Nagrodę Nobla z fizyki otrzymał Robert Andrews Millikan za pomiar wielkości ładunku elementarnego. Przez długi czas panowało przekonanie, że elementarnym nośnikiem ujemnego ładunku elektrycznego jest elektron. Natura okazała się jednak bardziej wyrafinowana.

Elektryczność

W połowie XVIII wieku Benjamin Franklin, polityk, filozof i wynalazca, a także jeden z ojców-założycieli Stanów Zjednoczonych Ameryki, wprowadził takie pojęcia jak: elektryczność dodatnia i ujemna, ładunek elektryczny, przewodnik elektryczności. Franklin znany jest – między innymi – z tego, że „ściągnął z nieba" piorun za pomocą latawca z przyczepionym doń metalowym prętem i wykazał, że jest to elektryczność (**1**). Początkowo uważano, że elektryczność to rodzaj przenikliwej cieczy, która może przepływać z jednego zbiornika do drugiego poprzez druty metaliczne. W 1800 roku stwierdzono, że prąd elektryczny, wytworzony przez – odkryte właśnie przez Alessandra Voltę – ogniwo galwaniczne rozkłada wodę na wodór i tlen. Było to zjawisko elektrolizy, które następnie szczegółowo badał genialny samouk Michael Faraday. Uzyskane przez niego wyniki sugerowały, że – przynajmniej w zjawisku elektrolizy – elektryczność występuje w małych porcjach ładunku. W 1891 roku George Johnstone Stoney, profesor fizyki w Queen's College w irlandzkim mieście Galway, omawiając prawa elektrolizy Faradaya, po raz pierwszy wprowadził słowo „elektron" na oznaczenie najmniejszej porcji ujemnego ładunku elektrycznego.



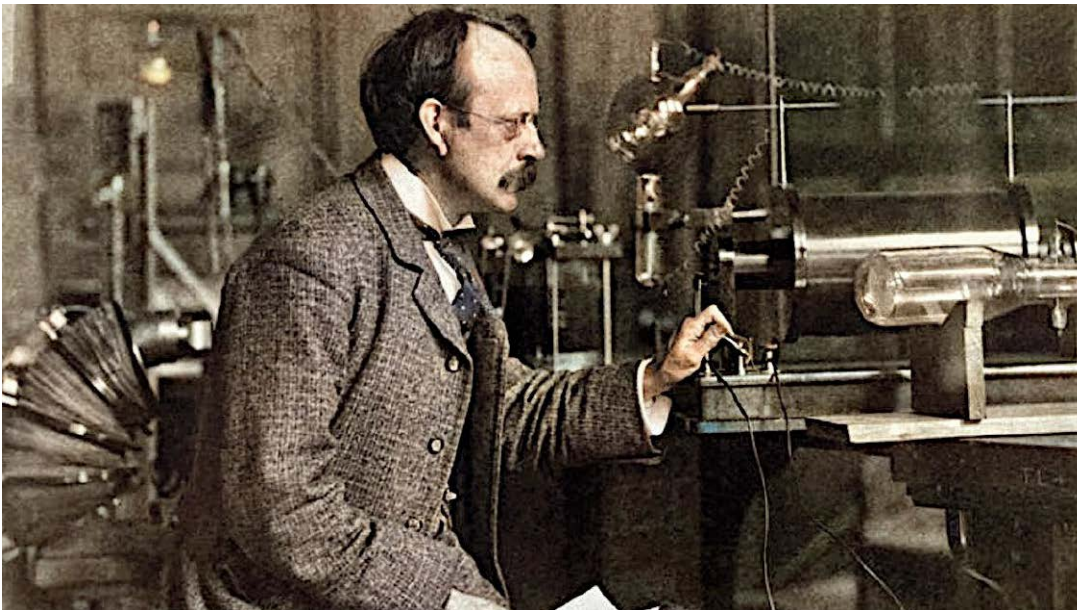
1. Benjamin Franklin ściągający piorun z nieba

J. J. Thomson odkrywa elektron

Potwierdzenie „ziarnistości" elektryczności nastąpiło pod koniec XIX wieku. W tym czasie fizycy fascynowali się zjawiskami występującymi w bańkach szklanych, z których częściowo wypompowano powietrze. Bańki te miały zazwyczaj wtopione dwie metalowe elektrody, do których przykładano napięcie elektryczne. Obserwowano wówczas ciekawe jarzenie świetlne, które zaczynało się od elektrody ujemnej, zwanej katodą, i rozprzestrzeniało się w kierunku elektrody dodatniej – anody. Wyglądało to tak, jak gdyby z katody były wysyłane jakieś promienie, nazywane promieniami katodowymi, które powodowały świecenie resztkowego gazu zawartego w lampie. W ostatnim dziesięcioleciu dziewiętnastego stulecia ustalono definitywnie, że promienie katodowe są strumieniem cząstek, które niosą ładunek ujemny, a ich tory mogą być odchylane polem magnetycznym. Z wielkości tego odchylenia można było obliczyć stosunek ładunku do masy poruszającej się w lampie cząstki.

Przyjmuje się, że odkrywcą elektronu jest sir Joseph John Thomson (**2**), profesor i dyrektor słynnego Cavendish Laboratory w Cambridge w Anglii, który prowadził pomysłowe

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

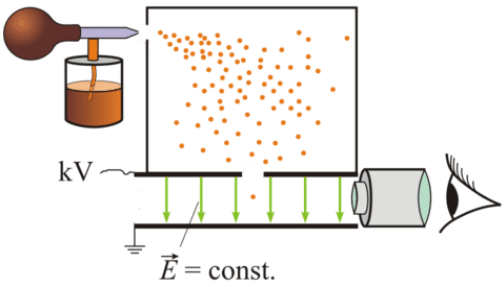


2. Odkrywca elektronu Joseph J. Thomson (1856–1940) w swoim laboratorium

doświadczenia z promieniami katodowymi. W artykule opublikowanym w 1897 roku w „Philosophical Magazine" wyraził on przełomową myśl, że ujemnie naładowane cząstki występujące w promieniach katodowych są uniwersalnymi składnikami materii i wchodzą w skład atomów. Nie nazywał jeszcze tych cząstek elektronami, lecz po prostu „korpuskułami". Nazwę elektron, którym to słowem w starożytnej Grecji oznaczano bursztyn, wprowadził nieco później irlandzki fizyk G. J. Stoney. Elektron był pierwszą odkrytą przez fizyków cząstką elementarną,

R. A. Millikan mierzy wielkość ładunku

Fizyk amerykański Robert A. Millikan, profesor Uniwersytetu w Chicago, przeprowadził w 1909 roku – wraz ze swoim asystentem Harveyem Fletcherem – serię doświadczeń, które pozwoliły wyznaczyć wartość ładunku elementarnego z dużą dokładnością. Eksperyment sprowadzał się w istocie do obserwacji opadania pojedynczych naładowanych kropelek oleju mineralnego rozpylonych pomiędzy dwiema poziomo umieszczonymi płytkami metalowymi (**3**), do których przyłożone było napięcie elektryczne. W lepkim ośrodku (w tym przypadku było nim powietrze) kropelka opada pod wpływem przyciągania ziemskiego ze stałą prędkością zależną od masy kropelki i lepkości ośrodka. Mierząc szybkość opadania, można było wyznaczyć masę każdej kropelki. W eksperymencie Millikana kropelki uzyskiwały ładunek elektryczny dzięki jonizacji cząsteczek powietrza w komorze pomiarowej, wywołanej naświetlaniem promieniowaniem rentgenowskim. Przez przyłożenie do płytek metalowych napięcia, które wytwarzało między nimi pole elektryczne, można było zrównoważyć działanie grawitacji tak, żeby naładowana kropelka zawisła nieruchomo. Mierząc to napięcie, można było wyznaczyć wielkość ładunku niesionego przez każdą kroplę. Okazało się, że ładunki niesione przez różne krople są zawsze całkowitą wielokrotnością pewnej stałej wielkości, którą zwyczajowo oznaczamy literą ***e*** i nazywamy ładunkiem elementarnym. Jednostką ładunku jest kulomb (C), nazwaną tak na cześć francuskiego uczonego Charles'a-Augustina de Coulomba, który jeszcze w 1785 roku sformułował słynne prawo oddziaływania między ładunkami elektrycznymi. Wyznaczony przez Millikana ładunek elementarny różni się zaledwie o około 6 procent od ustalonego obecnie, który wynosi w przybliżeniu $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.



3. Schemat eksperymentu Millikana

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

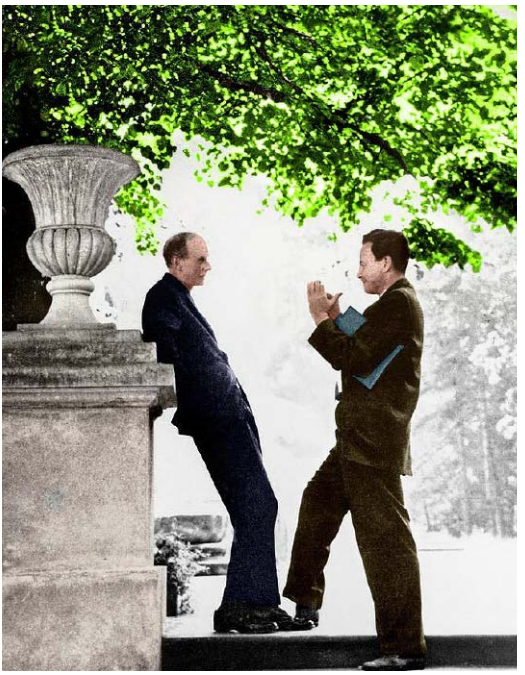
o masie 1836 razy mniejszej od masy najlżejszego atomu – wodoru.

Antyelektron Diraca

W 1913 roku Niels Bohr w Kopenhadze sformułował model atomu wodoru, który wyjaśniał podstawowe właściwości fizyczne tego najprostszego pierwiastka chemicznego. Zakładał on, że elektron niosący elementarny ładunek -e krąży wokół ciężkiego jądra, którym jest proton mający ładunek +e. Całość jest elektrycznie obojętna, a sam model daje się rozszerzyć na inne pierwiastki. Wkrótce powstająca mechanika kwantowa dostarczyła narzędzia, które pozwoliło na dokładniejsze opisanie atomu wodoru, a także innych obiektów mikroświata. Erwin Schrödinger przedstawił słynne równanie, które nie tylko prawidłowo opisywało atom wodoru, ale stało się fundamentem mechaniki kwantowej. Niestety miało ono ten mankament, że nie uwzględniało efektów relatywistycznych. Dopiero Paul Adrien Maurice Dirac (**4**) w Anglii sformułował równanie łączące równanie Schrödingera ze szczególną teorią względności Einsteina, które okazało się nadzwyczaj owocne. Po pierwsze, przewidywało ono istnienie dodatkowej właściwości elektronu – spinu, z którym związany jest moment magnetyczny elektronu, oraz przewidywało istnienie cząstki analogicznej do elektronu, ale o przeciwnym ładunku +e. W 1931 roku Carl David Anderson w Stanach Zjednoczonych Ameryki, pracujący pod kierunkiem Millikana, wykrył taką cząstkę w promieniowaniu kosmicznym, którą nazwano pozytonem. Tym samym odkryto fundamentalną symetrię natury. **Każda cząstka elementarna o określonym znaku ładunku elektrycznego ma swojego odpowiednika – antycząstkę – o znaku przeciwnym!**

Nieoczekiwanie pojawiają się kwarki

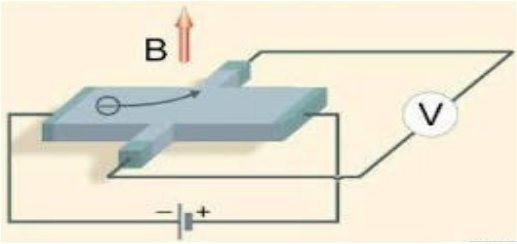
Model atomu jako masywnego jądra złożonego z dodatnio naładowanych protonów i neutralnych neutronów oraz otaczających go ujemnych elektronów działa zadowalająco. Tymczasem intensywne badania cząstek elementarnych prowadzone w drugiej połowie XX wieku doprowadziły do zaskakujących wyników, których ukoronowaniem było sformułowanie tak zwanego Modelu Standardowego. Według tego modelu nukleony, to znaczy



4. Spotkanie dwóch geniuszy na konferencji poświęconej teorii względności w 1962 roku w Jabłonnie koło Warszawy: P. A. M. Dirac (oparty o kielich) i Richard Feynman

protony i neutrony tworzące jądra atomowe, składają się z jeszcze mniejszych cząstek, nazwanych kwarkami, niosącymi ładunek $-\frac{1}{3}$e lub $+\frac{2}{3}$e. Na przykład proton posiadający ładunek +***e*** składa się z trzech kwarków: dwóch o ładunku $+\frac{2}{3}$e i jednego o ładunku $-\frac{1}{3}$e. Hipotezę istnienia kwarków wysunęli w 1964 roku dwaj fizycy amerykańscy Murray Gell-Mann i George Zweig. Hipotezę tę potwierdzono eksperymentalnie, między innymi w doświadczeniach z nieelastycznym rozpraszaniem wysokoenergetycznych elektronów na protonach, jakie przeprowadzono w laboratoriach przy Uniwersytecie Stanforda w Kalifornii. Niestety, nie udało się i prawdopodobnie nigdy nie uda się wyodrębnić poszczególnych kwarków z nukleonów ze względu na specyficzny charakter sił, które je wiążą w jądrze. Tak więc najmniejszym swobodnym ładunkiem elektryczności, jaki możemy bezpośrednio zaobserwować w eksperymencie, pozostanie zapewne ładunek elektronu. Odkrycie kwarków pokazało, że na poziomie subatomowym materia jest bardziej skomplikowana, niż wcześniej przypuszczano. Fizycy rozróżniają teraz 6 rodzajów kwarków (plus 6

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



5. Schemat pomiaru napięcia Halla

antykwarków), różniących się swoimi właściwościami, którym ponadawano rozmaite, często intrygujące nazwy, takie jak kwark powabny, kwark dziwny i tym podobne.

Elektron w polu magnetycznym; zjawisko Halla

Wydawało się, że wiemy już wszystko o ładunku elektrycznym. Tymczasem badania zjawiska Halla w strukturach półprzewodnikowych zawierających warstwę dwuwymiarowego gazu elektronowego, w ekstremalnie silnych polach magnetycznych i niskich temperaturach, doprowadziły w latach 80. zeszłego stulecia do zaskakujących wyników. Klasyczne zjawisko Halla, odkryte jeszcze w końcu XIX wieku, polega na tym, że elektrony płynące wzdłuż wydłużonej płytki przewodnika są odchylane polem magnetycznym prostopadłym do płaszczyzny płytki, co wytwarza na przeciwległych krawędziach płytki różnicę potencjałów elektrycznych – napięcie Halla (**5**). Znając to napięcie i natężenie prądu płynącego wzdłuż płytki, możemy zdefiniować tak zwany opór Halla. W normalnych warunkach laboratoryjnych opór ten rośnie liniowo ze wzrostem pola magnetycznego. Bardzo silne pola magnetyczne zakrzywiają tory elektronów, zmuszając je do obiegu po zamkniętych orbitach, tak zwanych cyklotronowych. Im silniejsze pole, tym mniejszy promień takiej orbity. Mechanika kwantowa dopuszcza tylko pewne określone orbity i odpowiadające im skwantowane energie elektronów, tworzące tak zwaną drabinkę poziomów Landaua.

Kwantowe zjawisko Halla

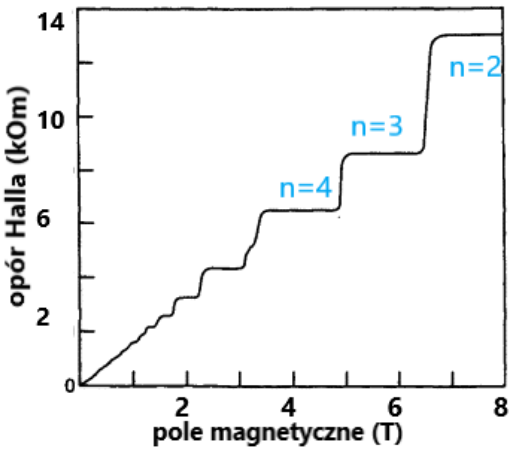
W 1980 roku Klaus von Klitzing z Instytutu Maxa Plancka w Stuttgarcie badał efekt Halla w strukturach MOSFET (patrz „Młody Technik" 10/2026) w niskich temperaturach w Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych w Grenoble. Struktury MOSFET zawierają w kanale przewodzącym dwuwymiarowy gaz elektronowy, którego koncentrację można regulować napięciem bramki sterującej. Zaobserwował on schodkowe zmniejszanie się oporu Halla ze wzrostem koncentracji elektronów. Te wyraźne stopnie, występujące w pewnych zakresach pól magnetycznych, związane są z zapełnianiem kolejnych poziomów Landaua. Opór odpowiadający tym stopniom jest skwantowany z niebywałą dokładnością, niezależnie od kształtu i doskonałości badanej struktury. Wartość oporu pierwszego stopnia, równa w przybliżeniu 25813 omów, zależy tylko od stałych uniwersalnych, ładunku elektronu ***e*** i stałej Plancka h: $R_H = \frac{h}{e^2}$. Wielkość ta stała się międzynarodowym wzorcem oporu elektrycznego. Robert Laughlin, teoretyk z Bell Telephone, podał dowód dokładnego kwantowania tego oporu, a von Klitzing został w 1985 roku uhonorowany Nagrodą Nobla z fizyki. Wydawało się, że Nagroda Nobla jest uwieńczeniem tego fascynującego wydarzenia naukowego, jakim było odkrycie kwantowego efektu Halla. Tymczasem nowe, nieoczekiwane odkrycie zszokowało społeczność fizyków ciała stałego. W maju 1982 roku trzej badacze z Bell Laboratories, D. C. Tsui, H. L. Störmer i A. C. Gossard, donieśli o odkryciu ułamkowego kwantowego efektu Halla!

Zagadkowe ułamki wymierne w kwantowym zjawisku Halla

Fizycy ci badali heterostruktury półprzewodnikowe, w których na granicy kryształów GaAs i AlGaAs tworzy się jama potencjału, wewnątrz której liczba elektronów zależy tylko od domieszkowania materiału wyjściowego i nie może być regulowana w czasie eksperymentu, tak jak w przypadku tranzystora MOSFET. Ale zwiększając pole magnetyczne, które rozsuwa szczeble drabinki Landaua, można spowodować opróżnianie coraz niższych szczebli z elektronów (**6**). Ponieważ w miarę jak wzrasta pole magnetyczne, orbity cyklotronowe elektronów coraz bardziej się zacieśniają i coraz większa ich liczba przypada na każdy szczebel. Gdy pole magnetyczne osiągnie taką wartość, że tylko najniższy szczebel drabinki Landaua pozostaje zapełniony elektronami, dalsze zwiększanie pola powoduje już tylko zmniejszanie ułamka tego zapełnienia.

Tsui, Störmer i Gossard wykonali swoje przełomowe odkrycie w Massachusetts Institute of Technology, gdzie dysponowali bardzo silnymi polami magnetycznymi. Gdy w trakcie

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



6. Całkowity kwantowy efekt Halla w heterostrukturze GaAs/AlGaAs; opór Halla w funkcji pola magnetycznego; wskaźnik n numeruje poziomy Landaua. Przy wyższych polach pojawiają się schodki związane z ułamkowym efektem Halla

badania efektu Halla osiągnęli pole magnetyczne, przy którym obsadzenie najniższego poziomu Landaua spadło do wartości $\frac{1}{3}$, zostali oni zaszokowani pojawieniem się nowego schodka napięcia Halla i towarzyszącego mu plateau. W następnych miesiącach odkryli dodatkowe schodki i plateau przy ułamkowych obsadzeniach, takich jak: $\frac{2}{3}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{3}$, $\frac{2}{5}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{2}{7}$ i innych. Odpowiadałyby one jakimś cząstkom o ułamkowym ładunku elementarnym, na przykład $\frac{e}{3}$, $\frac{e}{5}$ i tym podobnym. W odróżnieniu od „całkowitego" ten nowy „ułamkowy" kwantowy efekt Halla występował tylko w bardzo doskonałych kryształach i w temperaturze poniżej 1 kelwina.

Robert Laughlin zaproponował teorię opisującą dwuwymiarowy układ silnie oddziałujących ze sobą elektronów w polu magnetycznym, która przewiduje występowanie minimów energii układu dla pewnych sekwencji ułamkowego stopnia zapełnienia. Dla tych konkretnych ułamków układ elektronów ma właściwości charakterystyczne dla cieczy. Najbardziej egzotyczną konsekwencją teorii Laughlina są wzbudzenia elementarne tej cieczy. Są to kwazicząstki o ułamkowym ładunku elektrycznym! Na przykład wzbudzeniu stanu cieczy kwantowej o gęstości odpowiadającej ułamkowi zapełnienia $\frac{1}{3}$ odpowiada kwazicząstka o ładunku równym $\frac{e}{3}$. Kwazicząstki te reprezentują pewne stany związane elektronów i „kwantów" strumienia magnetycznego. Mają one specyficzne właściwości,

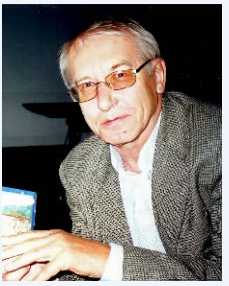


7. Grenoble, Laboratorium Silnych Pól Magnetycznych (LNCMI). Tu von Klitzing udokumentował odkrycie całkowitego kwantowego efektu Halla

które mogą znaleźć zastosowania w komputerach kwantowych o bardzo dużej szybkości przetwarzania danych i odpornych na błędy. Obiecującym kandydatem do tych zastosowań może być grafen, dwuwymiarowy kryształ zbudowany z atomów węgla, o nietypowych właściwościach elektronowych. Wykazuje on specyficzny całkowity kwantowy efekt Halla nawet w temperaturach pokojowych. Udało się też zaobserwować ułamkowy kwantowy efekt Halla w grafenie, który istotnie różni się od tego, jaki obserwuje się w strukturach tradycyjnych.

D. C. Tsui, H. L. Störmer i R. Laughlin zostali w 1998 roku uhonorowani Nagrodą Nobla z fizyki. W swoim wykładzie noblowskim Störmer powiedział: „ułamkowy kwantowy efekt Halla jest zjawiskiem w znacznym stopniu sprzecznym z naszą intuicją. Wynika z niego, że elektrony działając zespołowo mogą utworzyć nowe kwazicząstki, o ładunku mniejszym niż ładunek każdego z nich".

Tadeusz Figielski



Tadeusz Figielski emerytowany profesor nauk fizycznych. Pracował w Instytucie Fizyki PAN w dziedzinie fizyki półprzewodników. Zajmował się głównie badaniem wpływu defektów struktury (w szczególności dyslokacji) na właściwości elektronowe półprzewodników. Odkrył zjawisko fotostrykcji w półprzewodnikowym germanie.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Gwiezdne wojny pod lupą fizyka, część 2

W czasach oryginalnej trylogii („Nowa nadzieja”, „Imperium kontratakuje”, „Powrót Jedi”) zasadę działania miecza tłumaczono w sposób oparty na optyce. W oficjalnych materiałach promocyjnych, książkach i komiksach broń ta była nazywana mieczem laserowym. Stąd w rękojeści wzięły się kryształy, soczewki skupiające i pierścienie emisyjne – elementy żywcem wyjęte z optyki laboratoryjnej i mechaniki laserów rubinowych czy gazowych. Taki miecz potrzebował źródła zasilania o wysokiej mocy.

Ewolucja koncepcji miecza świetlnego

Dla ówczesnego odbiorcy mechanizm był prosty: w rękojeści zamontowana jest potężna bateria, która pozwala na wystrzelenie wiązki skupionego przez zestaw soczewek światła. Nikt nie pytał, dlaczego to światło zatrzymuje się w odległości metra od rękojeści i dlaczego miecze głośno odbijają się od siebie i ze świstem tną przedmioty. Dla przeciętnego odbiorcy w tym okresie laser jako urządzenie był tak samo tajemniczy jak kosmiczna magia związana z Mocą.

Jednak w ostatnim dwudziestoleciu XX wieku lasery coraz częściej wykorzystywane były w urządzeniach domowego użytku, na przykład w czytnikach płyt CD czy skanerach kodów kreskowych. W latach 90. pojawiły się masowo czerwone wskaźniki, oparte na diodach laserowych zasilanych bateriami. Przestały być one ekskluzywnym towarem dla profesorów, a ich

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

cena gwałtownie spadła do ceny zwykłej zabawki. Każdy mógł nabyć mały, prosty laser i sprawdzić jego działanie. Właśnie wtedy pojawił się problem: wiązka światła wypuszczona ze wskaźnika nigdzie się gwałtownie nie kończy. Dlaczego zatem miecze świetlne miały ograniczoną długość?

Ponieważ tego zjawiska nie dawało się wyjaśnić w oparciu o prawa optyki, fanom zaczęto tłumaczyć, że ostrze to supergorąca plazma (zjonizowany gaz), która krąży w zamkniętej pętli pola magnetycznego. Pole to miało działać jak „magnetyczna butelka", która nadaje plazmie kształt i nie pozwala jej wydostać się na zewnątrz ograniczonego w przestrzeni obszaru. Miłośnicy Gwiezdnych wojen dostali zatem „naukowe" wyjaśnienie, dlaczego miecze stawiają opór przy zderzeniu – po prostu odpychały się ich pola magnetyczne. Co ciekawe, buczenie miecza kojarzyć mogło się z transformatorem, którego przecież oryginalny opis konstrukcji w ogóle w tym urządzeniu nie przewidywał.

Jednak również wyjaśnienie oparte na fizyce plazmy okazało się niewystarczające. Aby pole magnetyczne było w stanie tak mocno zakrzywić strumień zjonizowanego gazu i nadać mu formę sztywnego, metrowego ostrza, rękojeść musiałaby generować pole o indukcji magnetycznej rzędu wielu tesli. Jak na razie jest to osiągalne jedynie przy użyciu ogromnych elektromagnesów wykorzystywanych w specjalistycznych laboratoriach, ale nie w przypadku przedmiotów mieszczących się w ludzkiej dłoni. Tak silne pole magnetyczne przyciągałoby wszystkie ferromagnetyki w najbliższym otoczeniu ostrzy. W chwilę po włączeniu miecza stalowe przedmioty leciałyby z impetem w jego kierunku, całkowicie uniemożliwiając walkę.

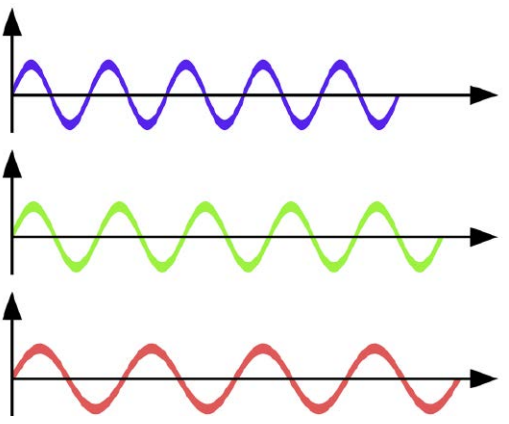
Problemem był również brak jakiejkolwiek izolacji termicznej. Przyjmijmy na chwilę hipotezę, że jednak w jakiś sposób pole magnetyczne mogłoby utrzymać plazmę w formie metrowego ostrza. Taki gaz, rozgrzany do temperatury dziesiątek tysięcy stopni, emitowałby do otoczenia ogromne ilości ciepła, spalając na popiół wszystko w swoim zasięgu. Co gorsza, rękojeść rozgrzałaby się do czerwoności i rozpłynęła, zanim jeszcze ostrze na dobre wysunęłoby się z miecza, bo nawet najtrwalsze znane metale topią się w temperaturze dużo niższej niż temperatura plazmy.

Aby nie wymyślać kolejnej teorii, zdecydowano się na posunięcie mistrzowskie: rękojeść to tylko urządzenie skupiające, a cała fizyka ostrza, jego stabilność, ogromna moc cięcia oraz unikalny kolor (zielony, niebieski, czerwony) wynikają z właściwości rezonansowych żywego, połączonego z Mocą kryształu. Wszystkie problemy rozwiązały się natychmiast z chwilą wprowadzenia mistyki minerałów. Użytkownik miecza dostrajał częstotliwość drgań kryształu do własnej psychiki w trakcie duchowego rytuału, co ostatecznie definiowało kolor ostrza. Tym samym wyjaśnienia naukowe stały się zbyteczne.

Światło jako fala

Światło widzialne jest falą elektromagnetyczną, a jego kolor zależy od długości fali lub, jeśli ktoś woli, od jego częstotliwości, ponieważ $f = \frac{c}{\lambda}$, gdzie f to częstotliwość światła, c – jego prędkość w próżni, λ – długość jego fali. Światło o barwie czerwonej ma większą długość niż światło zielone, a zatem ma mniejszą częstotliwość. Energia pojedynczego kwantu światła wyraża się wzorem $E=h\cdot f$, gdzie h jest stałą Plancka.

I właśnie w tym miejscu fanów Gwiezdnych wojen czeka ciekawa niespodzianka. Załóżmy, że miecze zasilane baterią o określonej mocy emitowały tę samą liczbę fotonów niezależnie od koloru ostrza. Przy takim założeniu Sithowie w porównaniu z rycerzami Jedi dysponowaliby znacznie słabszą bronią (mniejsza sumaryczna energia) i w każdej walce byliby z góry przegrani. Najbardziej śmiercionośną bronią wszechświata byłby w tej sytuacji fioletowy miecz Mace'a Windu, emitujący fotony o największej energii.



Rysunek 1. Kolor światła zależy od długości fali. Z kolei długość fali determinuje sposób, w jaki światło oddziałuje z materią

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Niemniej choćby przyjęte powyżej założenie było błędne i wszystkie miecze miałyby porównywalną sumaryczną energię całej wiązki fotonów, to mamy kolejny problem. W filmie tną one niemal wszystko, co napotkają na swojej drodze. W rzeczywistości jednak różne długości fal świetlnych w różny sposób oddziałują z materią. Obecnie najbardziej efektywne lasery do cięcia materiałów działają w zakresach niewidzialnych dla ludzkiego oka. Do cięcia ciepłego używa się głębokiej podczerwieni, która topi materiał, a do cięcia zimnego – ultrafioletu, który rozbija wiązania między atomami.

Nie oznacza to jednak, że nie wykorzystuje się w przemyśle laserów z zakresu widzialnego. Światło zielone oraz światło niebieskie sprawdzają się między innymi przy cięciu metali kolorowych czy elementów mikroelektroniki. Ale nie istnieje obecnie żaden przemysłowy laser tnący o czerwonej barwie światła. I znowu dochodzimy do punktu, w którym broń Sithów z perspektywy praw fizyki byłaby narzędziem kompletnie bezużytecznym, zdolnym co najwyżej do cięcia papieru i innych miękkich materiałów.

Prędkość światła

Jak już ustaliliśmy, światło jest falą. Ponieważ jest to fala elektromagnetyczna, nie potrzebuje do swojej propagacji żadnego ośrodka. Światło bez problemu rozchodzi się w próżni, ale również w gazach, cieczach i ciałach stałych. Swoją maksymalną prędkość (oznaczaną jako c) światło osiąga w próżni. W ośrodkach materialnych rozchodzi się wolniej lub jest całkowicie absorbowane.

Wróćmy na chwilę do miecza świetlnego. Przyjmując, że czas reakcji człowieka na bodziec wzrokowy wynosi około 0,3 sekundy, zanim obserwator zorientowałby się, że miecz został włączony, czubek jego ostrza przy prędkości światła wynoszącej około $3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ (300 000 km/s) znalazłby się w odległości rzędu stu tysięcy kilometrów od rękojeści. Oczywiście w sytuacji, gdyby na jego drodze nie znalazł się żaden materiał pochłaniający światło i gdyby twórcy nie znaleźli wyjaśnienia skończonej długości ostrza.

Podobny problem mamy z pociskami wystrzeliwanymi z blasterów. Według sagi jest to „płynny" gaz skupiony przy pomocy soczewek. Po pierwsze, jeśli coś jest płynne, to nie jest już gazem. Po drugie – soczewka optyczna nie jest w stanie skupić ciała materialnego. Jeśli przyjąć, że są to po prostu pociski światła, to znowu łamią prawa fizyki, ponieważ poruszają się na tyle wolno, że można przed nimi uskoczyć lub odbić je mieczem świetlnym. Co swoją drogą znowu przeczy teorii gazu lub cieczy, bo trudno wyobrazić sobie, żeby tego typu ciało nie zmieniło kształtu, poruszając się w kierunku celu, a tym bardziej odbijając się od innego przedmiotu.

Sprawdź, co potrafisz

Darth Vader posługiwał się mieczem czerwonym o długości fali równej 650 nanometrów, a Mace Windu – mieczem fioletowym o długości fali wynoszącej 400 nanometrów. Oblicz częstotliwość fali świetlnej dla każdego z tych mieczy oraz energię pojedynczego fotonu światła. Przyjmij $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ i $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$. Potrzebne wzory znajdziesz w tekście.

Dla nauczyciela

Niniejszy artykuł można wykorzystać jako formę nietypowej powtórki wiadomości na temat fal, w szczególności fal akustycznych oraz falowej natury światła widzialnego. Zagadnienia związane z dźwiękiem i światłem widzialnym pojawiają się po raz pierwszy w szkole podstawowej, zazwyczaj w ósmej klasie, a następnie bardziej szczegółowo omawiane są na kolejnym etapie edukacyjnym. Daje to szerokie możliwości dostosowania tematu do poziomu edukacyjnego, ale również tworzenia autorskich zadań czy gier edukacyjnych o atrakcyjnej dla uczniów formule.

Temat fizyki w uniwersum Gwiezdnych wojen nie został tu zresztą wyczerpany w całości. Dokładna analiza filmu wskazuje na wiele problemów, do których można nawiązać na lekcjach dotyczących innych działów. Przykładowo, niektóre pojazdy poruszające się w próżni kosmicznej posiadają skrzydła, a ich ruch jest charakterystyczny dla lotu opartego na zjawisku siły nośnej. Co zresztą wzięło się z tego, że jako wzór do gwiezdnych bitew posłużyły nagrania dokumentujące zachowanie samolotów z czasów drugiej wojny światowej. ■

Joanna Borgensztajn

Odpowiedź do zadania:

miecz czerwony:
$f \approx 4{,}62 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz}, E \approx 3{,}06 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

miecz fioletowy:
$f = 7{,}5 \cdot 10^{14}\ \mathrm{Hz}, E \approx 4{,}97 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{J}$

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Genialne w swej prostocie: **7 innowacyjnych pomysłów Czytelników, które mogą zmienić naszą codzienność**.
Prezentujemy najciekawsze propozycje nadesłane do naszej redakcji w ostatnim miesiącu.
Od ekologii, przez ogrodnictwo, aż po wsparcie dla seniorów – oto dowód na to, że kreatywność nie zna granic.

Aleksander Sikora – wymyślił rzecz ciekawą i dziś, w dobie rozwiniętej informatyki, chyba realną, a mianowicie: plecak, który sam pilnuje, czego zapomniałeś. Plecak musiałby mieć zainstalowany niewielki komputerek, w którego pamięci byłyby zapisane podstawowe programy typu: wyjazd nad morze, wyjście w góry, na narty, wyjście na ryby i tym podobne. Podczas ładowania plecaka program kontrolowałby, co jest już zapakowane, i sygnalizowałby braki.

Doskonały pomysł dla zapominalskich i roztargnionych. Rzecz rzeczywiście jest stosunkowo prosta do zrobienia, pozostaje jedynie kwestia sygnalizacji: „co już załadowałem". Prawdopodobnie skończyłoby się na chipach wszywanych do każdej istotnej rzeczy.

Piotr Wojciechowski – zaproponował coś, co powinno być już bardzo dawno wymyślone. Chodzi o buty, które pokazują drogę światłem. Diody na czubku buta wskazują: lewo, prawo, prosto. Przydatne podczas chodzenia po nieznanym mieście.

Pomysł generalnie bardzo dobry, ale są tu możliwe dwie wersje: wersja kolegi oznacza, że buty musiałyby posiadać odbiornik GPS i nawigować po mieście. Druga wersja, skromniejsza, po prostu polegałaby na oświetlaniu drogi przed pieszym. Ta wersja wydaje się praktyczniejsza i bardziej potrzebna, zwłaszcza w tak zwanym terenie.

Tadeusz Zamorski – pomyślał o niecierpliwych ludziach, którzy parząc się, w pośpiechu próbują napić się wrzątku. Wtedy inteligentny kubek według pomysłu kolegi „mówiłby": „Poczekaj chwilę, bo się sparzysz!".

Temat jest łatwy do wykonania i byłby na pewno bardzo przydatny w stołówkach i bufetach zakładowych. Doceniliby go ludzie „wiecznie się spieszący,"którzy nigdy nie mają czasu „na nic".

Tomasz Zawiłowski – proponuje natychmiastowe uruchomienie produkcji kasku rowerowego z „oczami z tyłu głowy". Kask miałby małą kamerę z tyłu i wyświetlacz albo sygnał ostrzegawczy informujący o zbliżającym się pojeździe z tyłu rowerzysty.

Bardzo dobry pomysł. Dziś, gdy ogromna część rowerzystów i pieszych chodzi ze słuchawkami w uszach i słucha muzyki rozrywkowej, po prostu nie słyszy nic, co jedzie z tyłu, a zwłaszcza samochodów elektrycznych. Taki kask uratowałby niejedno zdrowie, a nawet życie...

Tadeusz Synowiec – nadesłał pomysł z gatunku „dziwnych, a nawet zwariowanych", bo proponuje skarpetki męskie wyposażyć w niewielki układ odnajdujący drugą skarpetkę, gdy się jedna gdzieś zawieruszy. Wszyscy znają te nerwy, gdy spieszy nam się gdzieś, a tu skarpetkę gdzieś „wzięło".

Sytuacja taka jest irytująca i jednak dość łatwa do opanowania: elektronika może dziś „wszystko,"a więc i ten problem da się dość prosto załatwić.

Andrzej Górnik – proponuje zaopatrzyć szkoły w lodówki, do których uczniowie wkładaliby nadmiarowe jedzenie, a lodówka pokazywałaby, „co jeszcze można z niej wziąć i zjeść".

Oznaczałoby to wyrobienie społeczne uczniów szkoły i zapobiegłoby marnowaniu się jedzenia, które mamy pakują, nie bardzo licząc się z realnymi możliwościami synów i córek.

Stanisław Kleszcz – proponuje położyć kres problemom: „otworzyć parasol czy jeszcze nie" i jak dorobić sobie „trzecią rękę", bo nasze dwie są już zajęte. Proponuje więc wykorzystanie techniki dronów: mały osobisty dron, noszony w plecaczku, wylatywałby po stwierdzeniu deszczu i rozpościerał niewielki parasol nad głową swojego podopiecznego.

Pomysły tego typu już się pojawiały, więc należy uznać, że problem jest i już osiągnął stan „dojrzały,"tym bardziej że jest to sprawa już rozwiązana, bo drony wielu kalibrów już są i parasole też. ■

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Szkoła Wynalazców

dozwolone do lat 15

Wszyscy znamy widok mamy, siostry lub kuzynki nerwowo przetrząsającej torebkę w poszukiwaniu kredki do ust, kluczyków do samochodu i tym podobnych. Podobna sytuacja zachodzi w przypadku piórnika szkolnego. Współczesne piórniki są dość spore, mają najczęściej formę drewnianej skrzynki lub – częściej formę etui z miękkiego materiału, zamykanego na suwak. Zwłaszcza w tych ostatnich jest trudno wyjąć potrzebny sprzęt. Należy to jakoś usprawnić. I to jest zadanie dla Was: „Zaproponować piórnik, z którego można będzie wyjąć jeden przedmiot, nie ruszając innych".

Propozycja była dość prosta, praktyczna. Zobaczmy, jak sobie z tym poradzili nasi młodzi wynalazcy:

Stefan Kwiatkowski – proponuje piórnik[zbudowany na wzór tak zwanego „plecaka traperskiego", to znaczy płaski, z kanalikami na różne elementy: ołówki, długopisy i tym podobne. Odwijamy na płask, po wyjęciu jednej sztuki zarzucamy wystający od góry kawałek tkaniny i zwijamy całość, zapinając na rzep.

Bardzo dobry pomysł, zaczerpnięty z Dzikiego Zachodu, i chyba będzie trudno zaproponować coś prostszego!

Iwona Krajewska – proponuje piórnik z „windami". Oznacza to, że w piórniku stałyby pionowo różne przedmioty, a na denku byłyby przyciski. Naciśnięcie przycisku spowodowałoby wysunięcie się przedmiotu spoczywającego na tej „windzie".

Niezły pomysł, choć wymagający raczej pionowego ustawienia piórnika dla jego wygodnej obsługi. Ale pomysł niezły.

Roman Tarło – proponuje system oparty na idei magazynka do broni strzeleckiej. Przedmioty schowane w piórniku leżałyby sobie jeden nad drugim, a naciśnięcie dźwigni wysuwałoby je kolejno na zewnątrz.

Koncepcja wygląda ciekawie, ale ma jedną, zasadniczą wadę: uniemożliwia wyjęcie akurat tego, co jest nam potrzebne; musimy odebrać całą



eprasa.pl 7fd5cc1c0f

„defiladę" różnych długopisów, ołówków i tym podobnych rzeczy.

Nowe zadanie

Za moment zima! Warto odpowiednio wcześniej pomyśleć, „w co się bawić". Nie zawsze mamy do dyspozycji śnieg, a czas leci... Dobrze jest wymyślić zabawę, która imituje warunki zimowe, ale oszczędza nam kłopotu z posprzątaniem na przykład sali gimnastycznej. Wasze zadanie można więc sformułować następująco: „Opracować zabawę „w śnieżki" rozgrywaną na sali gimnastycznej, w niepogodny, zimowy dzień, ale taką, po której nie będzie sprzątania „śnieżek"".

Główny problem to „śnieżki". Trzeba wymyśleć coś, co je zastąpi, a po zakończonej zabawie zniknie bez śladu. Zadanie nie jest łatwe, ale trafia do ludzi sprytnych i umiejących myśleć. Termin nadsyłania propozycji – koniec stycznia 2027 roku. ■

Klub Wynalazców

bez ograniczeń wieku

Wielki fizyk Ryszard Feynman opisał w jednej z książek drobny problem. Otóż mając obie ręce zajęte, miał problem z odkręceniem korka od buteleczki, z której miał coś wylać do probówki. Zazdrościł koledze, który umiał to zrobić. Jesteśmy w XXI wieku i pora na to, żeby coś tu wymyślić, sprawa błaha, ale niekiedy dokuczliwa. Zobaczmy, jak sobie z tym poradzili nasi wynalazcy: „Zaprojektować przedmiot lub prosty mechanizm, umożliwiający wykonanie codziennej czynności jedną ręką".

Roman Głowacki – uważa, że najbardziej uprzykrzoną czynnością poranną jest smarowanie kromek chleba masłem. Uważa, że deseczka z podkowiastym obramowaniem z jednej strony, trwale zamocowana do stołu – załatwiłaby problem. Rzecz jest bardzo prosta, a zamocowanie do stołu nie musiałoby być stałe, lecz łatwo likwidowane.

Istotnie smarowanie kromek chleba to rzeczywiście problem, zwłaszcza gdy masło jest dopiero co wyjęte z lodówki. Pomysł kolegi wydaje się niezły i łatwy do wdrożenia.

Marek Piwowarczyk – proponuje kubek, który „sam się trzyma". Kubek powinien mieć w podstawie magnes, a stół powinien być pokryty blachą ferromagnetyczną. Postawienie kubka na takim stole powoduje jego statyczną równowagę, jedną ręką można do kubka coś wlać i następnie – po odstawieniu butelki – zabrać kubek.

Pomysł wymaga przeorganizowania kuchni: stół z ferromagnetycznym blatem, kubki z magnesami. Ale faktem jest, że byłoby to najpewniejsze załatwienie sprawy.

Joanna Banaś – proponuje opracowanie stojaczka lub wieszaczka, na którym można by powiesić foliową torebkę, która niełatwo się otwiera, ale torebkę zawieszoną na odpowiedniej podstawce można dość łatwo jedną ręką otworzyć, wsypać coś do niej i zamknąć.

Przy odpowiedniej konstrukcji tego wieszaczka może się to udać, ale problem z otwieraniem foliowej torebki jest i niestety pozostanie.

Nowe zadanie

Za moment zima, a więc wędrówki na nartach i bez po „górach i dolinach". W każdym takim przypadku potrzebny jest plecak, który poza okresem wędrówek musi być „gdzieś" schowany, a więc musi być mały do schowania i duży do użytkowania. A zatem: „Zaproponować konstrukcję plecaka, który powinien być jak największy podczas używania i jak najmniejszy podczas przechowywania".

Oczywiście są już prototypy takich plecaków, niestety są już dobrze zapomniane lub zagłuszone przez kolorowe, nowoczesne cacka. Zadaniem Waszym jest więc krytyczne spojrzenie na tę nowoczesną rzeczywistość i wymyślenie czegoś naprawdę dobrego.

Termin nadsyłania propozycji – koniec stycznia 2027 roku. Wszystkim życzymy sukcesów i dobrych pomysłów. ■

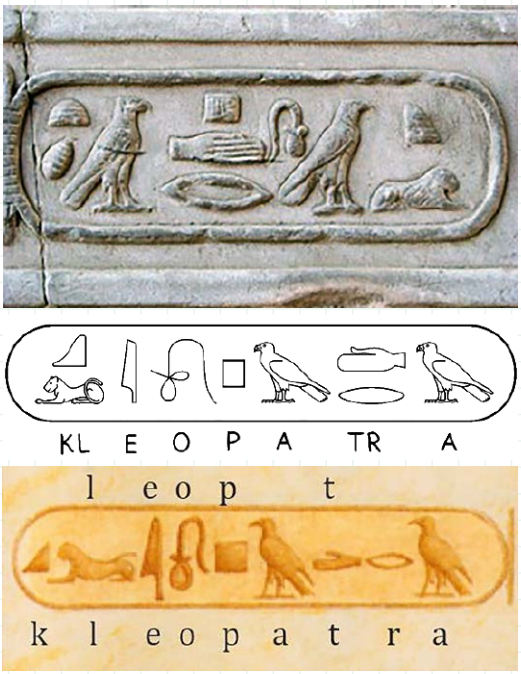
eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Vademecum Młodego Wynalazcy

Wynalazcy starożytnego Egiptu – ludzie, którzy zmieniali świat nad Nilem

Starożytny Egipt kojarzy się przede wszystkim z piramidami, sfinksem, mumiami i tajemniczymi grobowcami faraonów. Jednak za tym niezwykłym światem monumentalnych budowli kryła się cywilizacja o bardzo wysokim poziomie wiedzy technicznej. Egipcjanie musieli rozwiązywać problemy, z którymi spotykali się każdego dnia: jak mierzyć pola po wylewie Nilu, jak podnosić ogromne kamienne bloki, jak budować kanały, jak przechowywać żywność, jak leczyć rany, jak wytwarzać papier, szkło czy metal, jak obserwować niebo i dokładnie wyznaczać czas.

Nie znamy nazwisk większości ludzi, którzy opracowali te rozwiązania. Starożytni Egipcjanie nie pozostawili nam czegoś w rodzaju współczesnych patentów, w których wynalazca szczegółowo opisywałby swój pomysł i podpisywał go własnym nazwiskiem. Technika rozwijała się najczęściej przez doświadczenie wielu pokoleń. Rzemieślnik przejmował wiedzę od mistrza, poprawiał ją, a następnie przekazywał następnemu pokoleniu. W ten sposób powstawały technologie, które z czasem osiągały zdumiewającą doskonałość. Dlatego mówiąc o „wynalazcach starożytnego Egiptu", trzeba mieć na myśli nie tylko pojedynczych geniuszy, lecz całe środowiska ludzi: budowniczych, kamieniarzy, cieśli, garncarzy, metalurgów, lekarzy, matematyków, pisarzy, kapłanów i urzędników. Niektórzy z nich pozostawili jednak swoje imiona i dzięki temu możemy wskazać osoby, które rzeczywiście odegrały szczególną rolę w rozwoju egipskiej cywilizacji.



Wynalazek pisma – początek cywilizacji opartej na informacji

Jednym z najważniejszych osiągnięć Egipcjan było stworzenie i rozwinięcie systemu pisma. Hieroglify pojawiły się pod koniec IV tysiąclecia przed naszą erą, w okresie kształtowania się państwa egipskiego. Początkowo znaki służyły przede wszystkim do zapisywania nazw, imion i najważniejszych informacji. Z czasem powstał rozbudowany system umożliwiający zapisywanie języka. Egipcjanie stosowali kilka rodzajów pisma. Najbardziej znane są hieroglify, wykorzystywane szczególnie w inskrypcjach na świątyniach, grobowcach i pomnikach. Do codziennej pracy administracyjnej znacznie wygodniejsze było pismo hieratyczne, a później demotyczne.

Samo stworzenie pisma było osiągnięciem o ogromnym znaczeniu technicznym i organizacyjnym. Informację można było odtąd utrwalać i przekazywać ludziom żyjącym wiele lat później. Dzięki pismu państwo mogło prowadzić spisy ludności, ewidencję podatków, kontrolować magazyny, organizować pracę i dokumentować wydarzenia.

Pismo stworzyło również zapotrzebowanie na specjalistów – pisarzy. Byli oni jedną z najważniejszych grup wykształconych w społeczeństwie egipskim. Pisarz musiał znać setki znaków, zasady ich stosowania, rachunki i procedury administracyjne.

Można więc powiedzieć, że egipskim „wynalazkiem" nie było wyłącznie samo pismo. Był nim cały system zarządzania informacją.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Papirus – starożytny materiał do zapisywania informacji

Rozwój pisma wymagał odpowiedniego materiału. Egipcjanie znaleźli go w rosnącej nad Nilem roślinie – papirusie. Łodygi papirusu cięto na długie paski, układano je warstwami i odpowiednio prasowano. Naturalne właściwości rośliny pozwalały uzyskać materiał stosunkowo lekki, elastyczny i nadający się do pisania. Papirus był czymś więcej niż „starożytnym papierem". Wykorzystywano go również do produkcji lin, mat, koszy, sandałów i innych przedmiotów. Wynalazek papirusu miał ogromne znaczenie dla rozwoju administracji i kultury. Dokumenty mogły być transportowane, przechowywane i kopiowane. Na papirusie zapisywano teksty religijne, rachunki, listy, instrukcje medyczne, dzieła literackie i dokumenty urzędowe.

Dzięki temu wiedza nie musiała być przekazywana wyłącznie ustnie. Mogła być magazynowana – podobnie jak dziś przechowujemy informacje w książkach, bibliotekach i komputerowych bazach danych.

Imhotep – architekt, lekarz i człowiek o niezwykłej pamięci historycznej

Jedną z najbardziej znanych postaci starożytnego Egiptu jest Imhotep. Żył w czasach faraona Dżesera, w III tysiącleciu przed naszą erą. Był wysokim urzędnikiem i kapłanem, a tradycja przypisuje mu również wielkie umiejętności architektoniczne i medyczne. Imhotep jest przede wszystkim kojarzony z budową piramidy schodkowej w Sakkarze. Piramida Dżesera była konstrukcją przełomową. Wcześniejsze grobowce królewskie – mastaby – miały formę niskich, prostokątnych budowli. W Sakkarze kolejne warstwy zostały ustawione jedna nad drugą, tworząc monumentalną budowlę schodkową. Było to wielkie przedsięwzięcie inżynieryjne. Budowniczowie musieli opracować sposób wydobywania, transportowania i układania ogromnych ilości kamienia. Musieli także zaplanować stabilność konstrukcji.

Imhotep jest często nazywany pierwszym znanym z imienia architektem w historii. Jest to określenie nieco umowne, ponieważ budowa takiego kompleksu była dziełem ogromnego zespołu ludzi. Niemniej jego nazwisko zachowało się wyjątkowo dobrze.

Co ciekawe, wiele stuleci później Imhotep zaczął być czczony niemal jak bóg. Grecy utożsamiali go później z Asklepiosem, bogiem sztuki lekarskiej.

Matematyka – narzędzie egipskiego wynalazcy

Żadna wielka budowla nie mogła powstać bez matematyki.

Egipcjanie opracowali praktyczne metody wykonywania obliczeń potrzebnych w budownictwie, rolnictwie, handlu i administracji. Znali działania na liczbach całkowitych i ułamkach oraz potrafili rozwiązywać problemy, które dzisiaj nazwalibyśmy zadaniami matematycznymi. Szczególnie ważne były ułamki. Egipcjanie preferowali zapisywanie większości ułamków jako sumy ułamków jednostkowych, czyli takich, których licznik wynosił jeden. Zachowane dokumenty, takie jak papirus Rhinda, pokazują, że matematyka egipska była przede wszystkim matematyką praktyczną.

Była potrzebna na przykład wtedy, gdy trzeba było obliczyć powierzchnię pola, objętość spichlerza albo ilość materiału potrzebnego do wykonania określonego zadania.

Matematyka była również niezbędna przy projektowaniu monumentalnych budowli. Precyzyjne wyznaczenie osi, kątów i poziomów wymagało nie tylko doświadczenia, lecz także sprawnych metod pomiarowych.

Geodezja – jak mierzyć ziemię po wielkiej powodzi?

Jednym z problemów, które szczególnie wpłynęły na rozwój egipskiej techniki, był Nil.

Każdego roku rzeka wylewała, nanosząc żyzny muł na pola. Powódź była błogosławieństwem dla rolnictwa, ale jednocześnie niszczyła granice działek. Po opadnięciu wody trzeba było ponownie ustalić, gdzie przebiegały granice pól. W ten sposób rozwinęła się sztuka mierzenia ziemi, czyli geodezja. Egipscy mierniczy posługiwali się linami, palikami i prostymi przyrządami pomiarowymi. Potrafili wyznaczać kąty i odległości oraz odtwarzać granice działek. Umiejętność ta miała znaczenie nie tylko dla rolników. Państwo musiało wiedzieć, ile ziemi posiada poszczególny właściciel i jaką powinien zapłacić daninę.

Geodezja była więc jednocześnie dziedziną techniki, matematyki i administracji.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

Poziomica, pion i precyzyjne wyznaczanie kierunków

Egipscy budowniczowie osiągali zadziwiającą dokładność bez współczesnych laserów, niwelatorów i urządzeń GPS.

Wykorzystywali między innymi piony murarskie. Prosty ciężarek zawieszony na sznurku pozwalał sprawdzić, czy ściana jest pionowa.

Do wyznaczania poziomu można było wykorzystywać urządzenia oparte na zasadzie naczyń połączonych lub inne proste przyrządy geodezyjne.

Szczególnie ważne było dokładne wyznaczanie kierunków świata.

Wielka Piramida w Gizie została ustawiona względem stron świata z niezwykłą precyzją. Osiągnięcie takiej dokładności wymagało obserwacji astronomicznych oraz bardzo dobrej organizacji pracy.

Nie oznacza to, że Egipcjanie dysponowali technologią podobną do współczesnej. Ich sukces wynikał z wielokrotnego stosowania prostych metod, dokładnych pomiarów i doświadczenia.

To jedna z najważniejszych lekcji płynących z historii egipskiej techniki: skomplikowane rezultaty można osiągnąć dzięki prostym narzędziom, jeśli stosuje się je konsekwentnie i precyzyjnie.

Budowniczowie piramid – inżynieria na ogromną skalę

Piramidy są najbardziej spektakularnym dowodem umiejętności technicznych starożytnych Egipcjan. Wielka Piramida Cheopsa powstała około połowy III tysiąclecia przed naszą erą. Jej budowa wymagała wydobycia, obróbki i transportu ogromnej liczby bloków kamiennych.

Nie znamy jednego „wynalazcy piramid". Była to raczej kulminacja doświadczeń wielu pokoleń budowniczych. Wykorzystywano rampy, sanie, liny, dźwignie, rusztowania oraz organizację pracy na ogromną skalę. Szczególnie interesująca jest kwestia transportu kamienia. Ciężkie bloki umieszczano na saniach i przeciągano po przygotowanej powierzchni. Badania eksperymentalne wskazują, że zwilżanie piasku przed saniami mogło znacząco zmniejszać opór.

Niektóre kamienie transportowano również drogą wodną. Nil oraz sieć kanałów umożliwiały przewożenie materiałów na znaczne odległości.

Piramidy są zatem nie tylko dziełami architektury. Są również świadectwem logistyki, matematyki, geodezji, transportu i zarządzania pracą.

Dźwignia – prosta zasada o wielkiej sile

Jednym z najważniejszych narzędzi egipskiego budowniczego była dźwignia.

Jeżeli ciężki przedmiot oprzemy na odpowiednio ustawionej belce i przyłożymy siłę w odpowiednim miejscu, możemy przesunąć obiekt znacznie cięższy od nas samych.

Zasada ta była znana na długo przed sformułowaniem jej matematycznego opisu przez Archimedesa.

Dźwignie mogły służyć do przesuwania i podnoszenia kamieni oraz do dokładnego ustawiania elementów konstrukcji.

Wynalazki nie zawsze polegają więc na stworzeniu skomplikowanej maszyny. Czasami największe znaczenie ma właściwe wykorzystanie prostej zasady fizycznej.

Shaduf – urządzenie do podnoszenia wody

Jednym z najbardziej praktycznych urządzeń związanych z rolnictwem był shaduf, czyli żuraw do czerpania wody.

Składał się z pionowego słupa, długiej belki, naczynia na wodę oraz przeciwwagi. Człowiek opuszczał naczynie do wody, a następnie dzięki



eprasa.pl 7fd5cc1c0f

przeciwwadze podnosił je znacznie mniejszym wysiłkiem. Było to genialne w swojej prostocie. Shaduf umożliwiał przenoszenie wody z niższego poziomu na wyższy. Dzięki temu można było nawadniać pola położone powyżej poziomu rzeki lub kanału.

Urządzenie tego typu jest przykładem technologii, która przetrwała tysiące lat. Podobne rozwiązania były używane w różnych częściach świata jeszcze w czasach nowożytnych.

Rolnictwo – wynalazki, które pozwoliły wyżywić państwo

Egipskie rolnictwo wymagało ciągłego doskonalenia narzędzi.

Podstawowym narzędziem był prosty pług. Wykorzystywano także sierpy, motyki, łopaty i narzędzia do obróbki gleby. Szczególne znaczenie miało wykorzystanie zwierząt pociągowych. Egipcjanie nauczyli się także organizować rolnictwo zgodnie z rytmem Nilu. Rok dzielono na okres wylewu, okres wzrostu roślin i okres zbiorów.

Był to w pewnym sensie ogromny system technologiczny, w którym przyroda, kalendarz, rolnictwo, administracja i gospodarka były ze sobą połączone.

Kalendarz – próba uporządkowania czasu

Rozwinięte państwo potrzebowało kalendarza.

Egipcjanie stworzyli kalendarz cywilny liczący 365 dni. Rok dzielono na trzy główne pory związane z cyklem Nilu i rolnictwem. Dwanaście miesięcy miało po 30 dni, a na końcu roku dodawano pięć dodatkowych dni. Było to rozwiązanie niezwykle praktyczne, chociaż rok kalendarzowy był nieco krótszy od rzeczywistego roku zwrotnikowego. Z czasem powodowało to przesuwanie się kalendarza względem pór roku.

Egipcjanie obserwowali także niebo. Szczególne znaczenie miały gwiazdy, których pojawianie się można było wykorzystać do określania czasu.

Astronomia nie była więc wyłącznie dziedziną wiedzy teoretycznej. Pomagała organizować życie państwa.

Zegary słoneczne i wodne

Egipcjanie należeli do najwcześniejszych cywilizacji, które opracowały różnego rodzaju urządzenia do pomiaru czasu. Zegary słoneczne



wykorzystywały położenie cienia rzucanego przez odpowiednio ustawiony element.

Jeszcze ciekawsze były zegary wodne.

Woda wypływała przez niewielki otwór z naczynia, a jej poziom stopniowo się zmieniał. Odpowiednio oznaczone naczynie pozwalało określić upływ czasu. Zegary wodne były szczególnie użyteczne w nocy, gdy zegar słoneczny przestawał działać.



To przykład przejścia od obserwacji natury do stworzenia urządzenia mechanicznego.

Medycyna – wiedza lekarzy zapisana na papirusach

Egipcjanie mieli również znaczące osiągnięcia w medycynie.

Nie należy oczywiście porównywać ich wiedzy z medycyną współczesną. Dysponowali jednak rozległym doświadczeniem wynikającym z leczenia ran, złamań, oparzeń i innych chorób.

Znane są papirusy medyczne, między innymi papirus Ebersa oraz papirus Edwina Smitha.

Papirus Edwina Smitha jest szczególnie interesujący, ponieważ opisuje urazy i sposoby postępowania z nimi. Tekst zawiera obserwacje dotyczące ran, złamań, urazów głowy i kręgosłupa.

W wielu przypadkach lekarz nie ograniczał się do zaklęcia czy rytuału, lecz przeprowadzał badanie pacjenta i oceniał jego stan.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

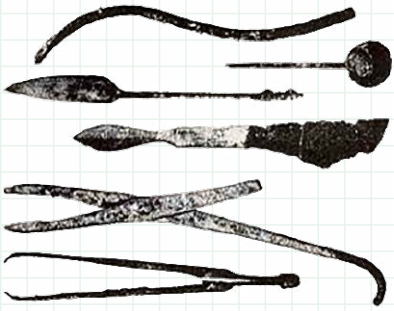
Egipska medycyna była połączeniem doświadczenia praktycznego, wiedzy o anatomii oraz wierzeń religijnych.

Chirurgia i leczenie ran

Egipscy lekarze potrafili opatrywać rany, stosować bandaże i wykorzystywać różne substancje lecznicze.

Doświadczenie zdobywano przede wszystkim poprzez obserwację.

Lekarz musiał wiedzieć, które rany wymagają prostego opatrunku, które należy obserwować, a które mogą prowadzić do śmierci.



W papirusie Edwina Smitha pojawia się charakterystyczny schemat opisu przypadków: rozpoznanie urazu, rokowanie i sposób postępowania.

To bardzo interesujący krok w kierunku medycyny opartej na obserwacji.

Nie oznacza to oczywiście, że egipscy lekarze znali wszystkie zasady współczesnej chirurgii. Ich narzędzia chirurgiczne nie odbiegają co do istoty od instrumentów naszych czasów.

Jednak ich teksty pokazują, że potrafili systematycznie gromadzić doświadczenie medyczne.

Protezy i sztuczne części ciała

Jednym z najbardziej fascynujących odkryć archeologicznych jest drewniany sztuczny palec u nogi znaleziony w grobowcu egipskim.



Przedmiot ten pokazuje, że egipscy rzemieślnicy potrafili tworzyć elementy, które nie tylko wyglądały jak część ciała, ale mogły być również dopasowane do stopy.

Nie jest to dowód na istnienie nowoczesnej protetyki, ale świadczy o niezwykłej pomysłowości.

Człowiek, który utracił palec, nie musiał być skazany na całkowitą rezygnację z normalnego obuwia. Rzemieślnik mógł spróbować wykonać sztuczny element dostosowany do jego ciała.

To jeden z tych przykładów, które pokazują, że wynalazczość nie zawsze dotyczy wielkich budowli. Czasami rodzi się z potrzeby konkretnego człowieka.

Szkło – narodziny nowego materiału



Egipcjanie byli jedną z cywilizacji, które wcześnie rozwinęły techniki wytwarzania szkła.

Szkło powstawało w wyniku odpowiedniego połączenia materiałów zawierających krzemionkę, substancje alkaliczne i stabilizujące, a następnie podgrzewania ich w wysokiej temperaturze.

Początkowo produkowano przede wszystkim niewielkie przedmioty: paciorki, amulety i dekoracje.

Z czasem rozwijały się bardziej zaawansowane techniki wytwarzania naczyń.

Produkcja szkła wymagała kontroli temperatury i znajomości właściwości różnych materiałów. Była więc jednym z przykładów rozwijającej się technologii materiałowej.

Ciesielstwo i technika łączenia materiałów

Drewno było w Egipcie materiałem bardzo cennym. W kraju o gorącym i suchym klimacie nie było go w takiej obfitości jak w wielu innych regionach świata. Dlatego Egipcjanie nauczyli się wykorzystywać je oszczędnie. Cieśle wykonywali meble, skrzynie, łóżka, drzwi, wozy i łodzie. Stosowali kołki, czopy, kleje i inne sposoby łączenia elementów.

Zachowane meble z grobowców pokazują, że egipscy rzemieślnicy potrafili tworzyć

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

konstrukcje zarówno praktyczne, jak i bardzo estetyczne.

Szczególnie interesujące są krzesła i łóżka wyposażone w elementy wykonane z dużą precyzją.

Koło, wóz i rozwój transportu lądowego

Koło nie było wynalazkiem egipskim, ale Egipcjanie stosunkowo późno zaczęli wykorzystywać je na większą skalę, między innymi w rydwanach.

Rydwan stał się ważnym elementem egipskiej techniki wojskowej w II tysiącleciu przed naszą erą.

Lekka konstrukcja, koła ze szprychami i zaprzęg konny pozwalały osiągać dużą szybkość.

Wymagało to bardzo dobrego rzemiosła. Koła musiały być lekkie, ale jednocześnie wystarczająco wytrzymałe. Cała konstrukcja musiała znosić uderzenia i nierówności terenu.

Rydwan jest dobrym przykładem tego, że wynalazek może powstać poprzez połączenie kilku wcześniejszych pomysłów: koła, osi, konstrukcji drewnianej, uprzęży i hodowli koni.



Dziedzictwo egipskich wynalazców

Wpływ starożytnego Egiptu na późniejsze cywilizacje był ogromny.

Egipskie osiągnięcia w matematyce, medycynie, architekturze, astronomii, rolnictwie i organizacji państwa stały się częścią dziedzictwa świata starożytnego.

Wiedza egipska oddziaływała między innymi na świat grecki. Grecy znali Egipt jako kraj bardzo starej cywilizacji i interesowali się jego wiedzą.

Niektóre rozwiązania techniczne pojawiały się niezależnie w różnych miejscach świata, dlatego nie zawsze można powiedzieć, że konkretny wynalazek został „przeniesiony" z Egiptu do innej kultury.

Można natomiast stwierdzić, że Egipt należał do najważniejszych laboratoriów cywilizacyjnych starożytnego świata.

Przez tysiące lat jego mieszkańcy testowali materiały, narzędzia i metody pracy.

Większości ich nazwisk nigdy nie poznamy.

I właśnie dlatego historia wynalazczości starożytnego Egiptu jest tak interesująca. Pokazuje bowiem, że rozwój cywilizacji nie jest dziełem wyłącznie kilku sławnych geniuszy. Powstaje dzięki ogromnej liczbie ludzi, którzy obserwują świat, dostrzegają problemy i próbują je rozwiązać.

Pisarz, który zapisał receptę na papirusie, nie mógł przewidzieć, że tysiące lat później archeolodzy będą analizowali jego słowa.

A rzemieślnik, który wykonał sztuczny palec dla człowieka pozbawionego części stopy, nie wiedział zapewne, że jego dzieło zostanie uznane za jeden z najstarszych przykładów protetyki.

To właśnie jest prawdziwa historia wynalazczości.

Wynalazek zaczyna się zwykle od prostego pytania:

Czy można zrobić to łatwiej, szybciej, dokładniej albo skuteczniej?

Starożytni Egipcjanie zadawali takie pytania przez tysiące lat.

Ich odpowiedzi – od papirusu i kalendarza po shaduf, narzędzia miernicze, techniki budowlane, medyczne receptury, szkło, ceramikę i zaawansowane konstrukcje łodzi – stworzyły jedną z najważniejszych tradycji technicznych starożytnego świata.

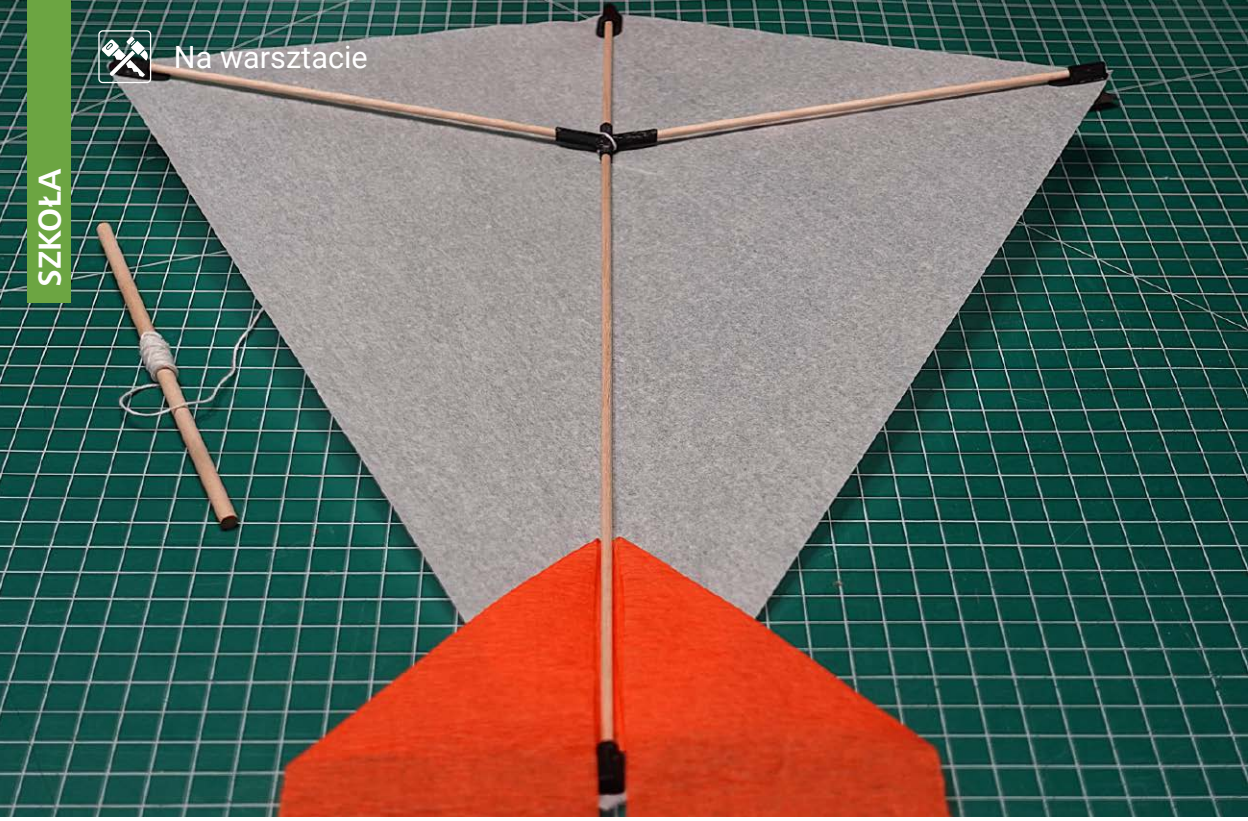
Dlatego piramidy nie powinny być dla nas wyłącznie symbolami potęgi faraonów.

Powinniśmy patrzeć na nie również jak na ogromne „księgi techniczne" zapisane w kamieniu. Opowiadają o matematyce. O fizyce. O organizacji pracy. O transporcie. O materiałach. O geodezji. I przede wszystkim o ludzkiej pomysłowości.

Egipt pokazuje nam bowiem coś bardzo ważnego: największe wynalazki często nie powstają wtedy, gdy człowiek posiada najbardziej zaawansowane narzędzia, lecz wtedy, gdy potrafi najlepiej wykorzystać te, które ma do dyspozycji. ■

Prezes Klubu Wynalazców
Champion TRIZ
Jan Boratyński

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Latawiec szkolny „Super Fest ZPT”

Dziś „Na warsztacie” bardzo prosty latawiec o zupełnie słusznym rozmiarze, jak na swoją niemal do granic możliwości uproszczoną konstrukcję. Jest to również pomoc dydaktyczna dla prowadzących zajęcia praktyczno-techniczne, bo dysponując sprefabrykowanymi wcześniej zestawami materiałowymi, można go z powodzeniem zmontować z całą klasą (i jeszcze przetestować w locie!) podczas typowych zajęć praktyczno-technicznych. Może to być też bardzo dobry temat na zimowe miesiące, ponieważ przy tak niskiej masie startowej doskonale sprawdzi się w lotach w szkolnej sali gimnastycznej.

Nieco o superprzodkach...

To nie pierwszy latawiec opracowany we wrocławskich pracowniach modelarskich Młodzieżowego Domu Kultury imienia Mikołaja Kopernika i opublikowany na łamach „Młodego Technika”. Bazuje na doświadczeniach z montażu i użytkowania między innymi takich modeli, jak „FEST”(-ynowy) z wydania 9/2007 roku, „Szaszłykowego” z „Młodego Technika” numer 11 z 2021 roku czy „Mikrokajtka” z „Młodego Technika” numer 09 z 2021 roku. O ile „FEST” i „Szaszłykowy” nadal są budowane podczas typowych zajęć pracowni w Młodzieżowym Domu Kultury, o tyle już prawie niemożliwe jest zdążyć z wykonaniem ich przez całą klasę w dwie lekcje. „Mikrokajtek”, choć sprawdza się

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

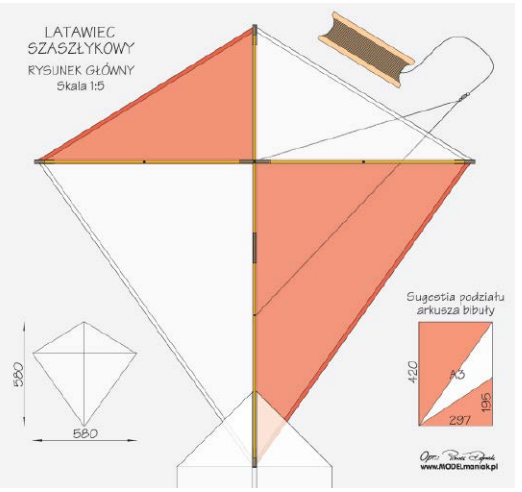


Latawiec festynowy opisany w numerze wrześniowym „Młodego Technika" z 2009 roku – bardzo dobry dla modelarni. Warto skorzystać z rysunków objaśniających zasady rysowania szablonu poszycia



„Mikrokajtek" (z wydania 9/2017 „Na warsztacie" „Młodego Technika") – „bardzo fajny, ale mały"...





Nieco większy od dzisiejszego latawiec „Szaszłykowy" ukazał się na łamach naszego miesięcznika w listopadzie 2021 roku – niestety, jego montaż w warunkach zajęć lekcyjnych jest zbyt czasochłonny

bardzo dobrze w szkołach, jest jednak malutki i „nie robi wrażenia". Trzeba było wymyśleć nowszy, na nowsze czasy!

Super FEST!

Opisywany dziś model latawca został opracowany i wielokrotnie przetestowany na uczniach trzecich klas szkoły podstawowej. Pierwotnie miał mankietowane brzegi (jak FEST), a do zadań zawodników należało między innymi wymierzenie i docięcie szaszłykowych elementów szkieletu – zbyt wielu jednak na tym „poległo". Wiązanie dwupunktowej uzdy łączonej z holem też sprawiało zbyt wiele problemów...

Aktualnie wykorzystywane przez autora zestawy materiałowe do zajęć klasowych zawierają:

- wycięte poszycie (bez opcji wzmacniania krawędzi mankietami) z oznaczonym otworem na hol;
- przycięte na wymiar pręty szkieletu;
- papier ścierny do sfazowania szaszłykowych końcówek;
- 5 wydrukowanych w technologii 3D akcesoriów (zamiast zwijanych papierowych rurek, jak w „Szaszłykowym");
- około 1,5...2,0 metra grubej bawełnianej nici na hol na papierowym lub drewnianym zwijadle (więcej nici za często kończy

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



W dziale „Na warsztacie” opisany został też między innymi projekt kartonowego „Kajtka” (sierpień 2011 roku – zobacz https://tiny.pl/cv5qzs-7n)...

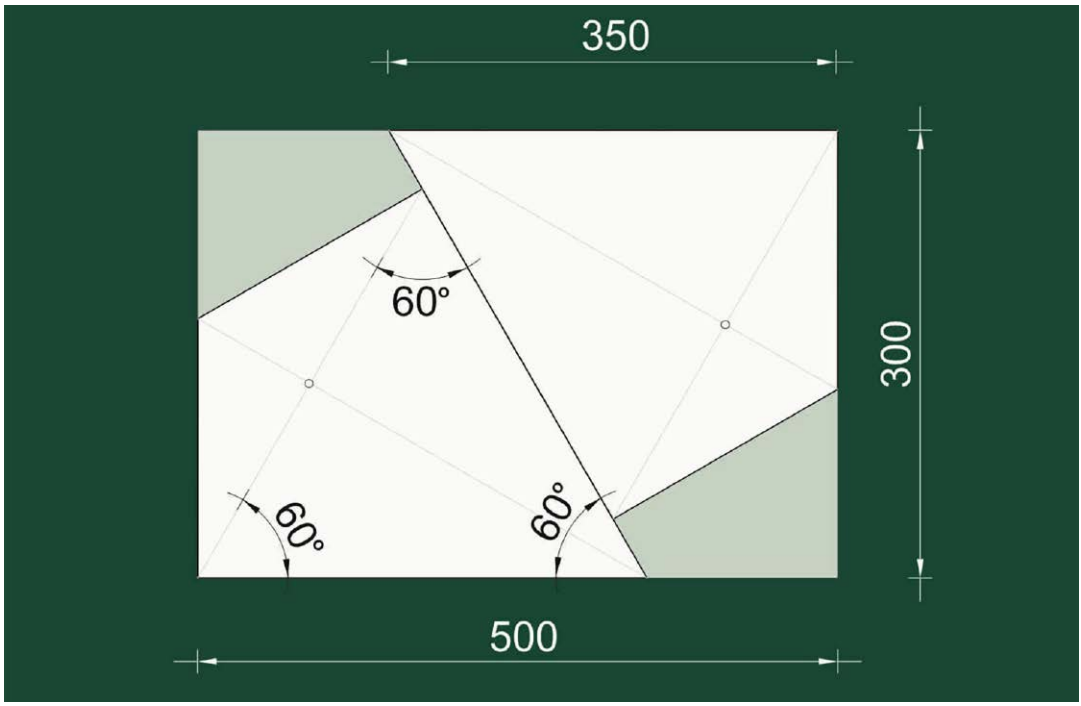


...oraz foliowy „DeLF II” (numer 8/2011 „Młodego Technika” – https://tiny.pl/ks74hzxc6). Szablony ich zdobień można i tu wykorzystać – o ile oczywiście czas zajęć na to pozwoli

się poplątaniem, do zawodów w plenerze zawsze można dowiązać).

Przygotowanie prefabrykatów (propozycja dla nauczycieli)

Najwięcej czasu zapewne zajmie przygotowanie projektu akcesoriów do druku 3D, ale ponieważ w szkołach są drukarki z programu „Laboratoria Przyszłości” (notabene według wykazu autora opracowanego pod kątem rozgrywanych we Wrocławiu od 2009 roku Zawodów Modeli Robotów i Jednostek Ratowniczych), można z nich skorzystać z ewentualną pomocą bardziej zaznajomionych z nimi kolegów i koleżanek lub nawet uczniów starszych klas (w razie braku takich możliwości autor służy pomocą poprzez pocztę elektroniczną: pandobromir@gmail.com). Z istotnych informacji: otwory

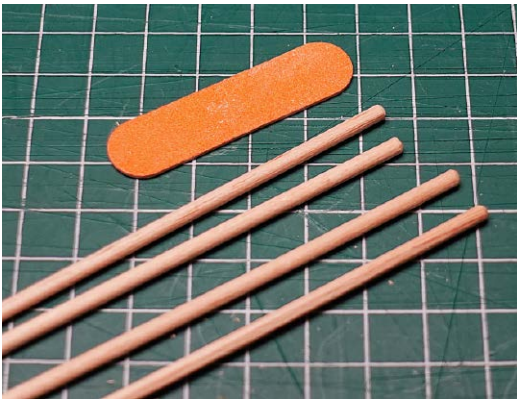


Wielkość tego latawca została dostosowana do optymalnego wykorzystania zarówno popularnych patyczków szaszłykowych, jak i typowych formatek, w jakich sprzedawana jest bibuła gładka

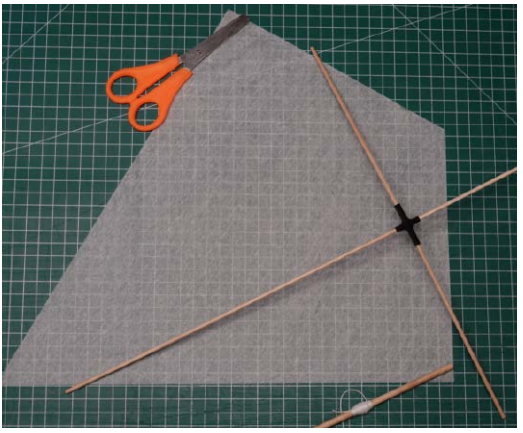
eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Zestaw materiałowy do budowy latawca oraz materiały i narzędzia (zamiast kleju polimerowego wygodnie można też użyć kleju w sztyfcie)



Sfazowanie krawędzi wstępnie wyciętych prętów szaszłykowych to zadanie każdego zawodnika. Trzeba pamiętać, żeby nie rozwarstwić włókien drewna



Oszlifowane pręty wkłada się odpowiednio w otwory. Tylko ramiona (boki) mają wznios 10°. Odwracamy szkielet, „żeby robił pompki"

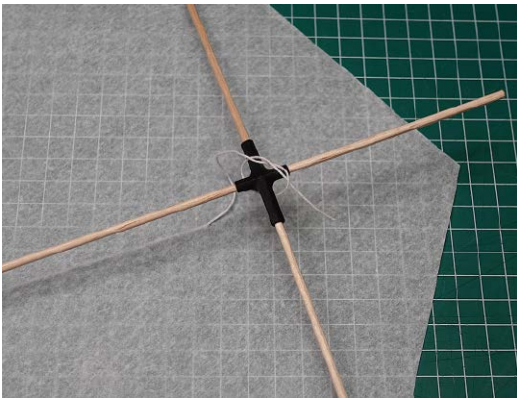
powinny mieć szerokość 3,1 milimetra, głębokość 10 milimetrów, przy grubości ścianki dwóch średnic głowicy drukarki, kąt podniesienia skrzydeł w nieprzelotowym krzyżaku to 10°. Ostateczną opcją jest przygotowanie odpowiednich rurek z zaimpregnowanego następnie papieru – podobnie, jak w latawcu „Szaszłykowym" – zobacz: https://tiny.pl/zscwtr29s.

Kolejnym krokiem w przygotowaniu zestawów będzie wykonanie szablonu poszycia. Zaletami jego kształtu są między innymi: wielkość pozwalająca na wycięcie dwóch sztuk z jednego typowego arkusza bibuły gładkiej o wymiarach 50×30 centymetrów, geometria oparta na trójkącie równobocznym, co bardzo ułatwia rozmierzenie szablonu bezpośrednio na kartonie (zobacz ilustracja do latawca „FEST" – niestety, ten artykuł nie jest już dostępny na stronach „Młodego Technika"). Wycinanie bibuły najlepiej wykonać nożem kołowym przy metalowym liniale, w razie jego braku mogą to być nożyce krawieckie. Należy unikać pozostawienia zadziorów na krawędziach – to potencjalne miejsca rozerwania. Resztki bibuły należy pociąć na formatki, z których ewentualnie będzie można wykonać łatki poszycia.

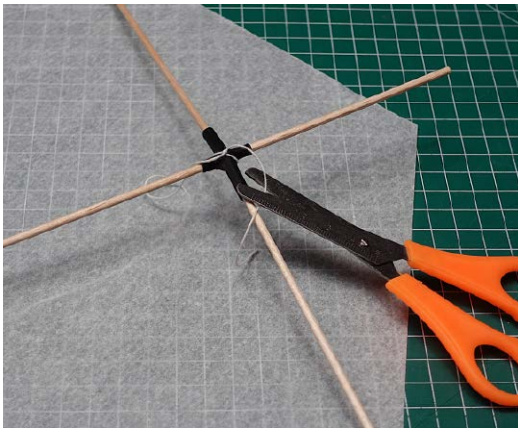
Do przygotowania elementów szkieletu dobrze zaopatrzyć się w topolowe (raczej nie bambusowe) patyczki szaszłykowe o średnicy 3 milimetrów i długości 30 centymetrów (na każdy zestaw potrzebne będą 3 sztuki) oraz nożyk do tapet (lub jego ekwiwalent – nawet nożyczki – zobacz opis w artykule o latawcu „Szaszłykowym"). W trakcie zajęć młodzież powinna mieć możliwość lekkiego zaokrąglenia końcówek prętów (sfazowania ich) za pomocą kawałków papieru ściernego gradacji około 100...120 (warto ciąć go nożykiem od strony papieru, ewentualnie zaginać i odrywać).

Przygotowywanie zestawów kończy nacięcie bibuły na ogony o wymiarach 7×200 centymetrów (można je owinąć fragmentami oryginalnej papierowej banderoli) oraz nawinięcie odpowiedniej liczby około dwumetrowych odcinków dobrej bawełnianej nici na papierowe lub drewniane zwijadełka. Teraz, o ile mamy też kilka zestawów zapasowych, można już zaczynać zajęcia!

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Zawiązanie trzech supełków (nie ma osobnej uzdy) to już chyba najprostsze z możliwych rozwiązań?

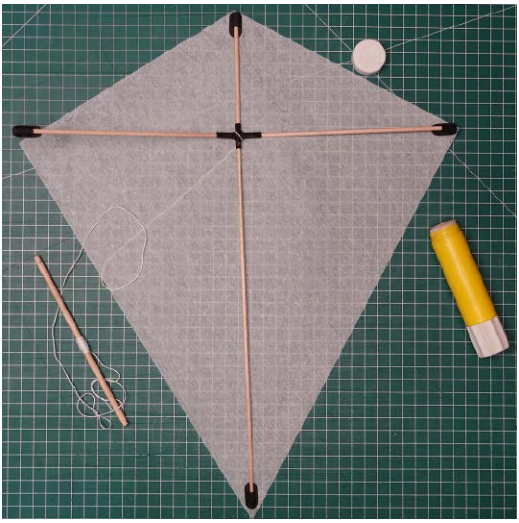


Krótszą końcówkę można obciąć

Montaż szkolnego „Super Festa”

Dysponując gotowymi prefabrykatami, pracę nad modelem rozpoczyna się od odpowiedniego zeszlifowania końcówek patyczków szaszłykowych w taki sposób, żeby nie rozrywać włókien drewna (kierunek do środka pręta).

Doszlifowane pręty należy odpowiednio włożyć w otwory centralnego krzyżaka (góra: 95 milimetrów, podniesione boki: 165 milimetrów, dół: 290 milimetrów). Prócz poprawności włożenia adekwatnych prętów należy też upewnić się, że są one włożone do końca.



W pierwszej kolejności sprawdza się symetryczne położenie końcówek szkieletu względem poszycia, dopiero potem przykleja się pionowe „kapcie”, a po ich odpowiednim wyschnięciu poziome. Nie można zapomnieć o odpowiednim naprężeniu poszycia przy klejeniu!

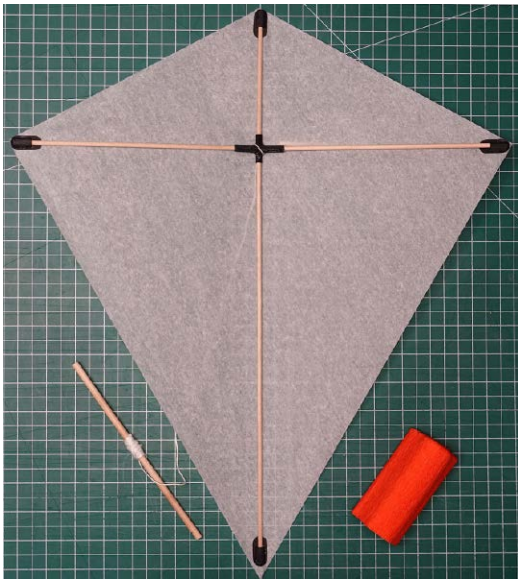
Mając prawidłowo zmontowany szkielet, można przystąpić do wiązania jednoliniowego holu. Jeśli cała linka jest na zwijadle, najpierw należy przewlec ją przez poszycie (w razie potrzeby otwór można delikatnie powiększyć dobrze zatemperowanym ołówkiem). Supełki (minimum 3, bo jeden może się rozwiązać) najwygodniej wiązać na odwróconym („robiącym pompki” ;o)) szkielecie. (Z dotychczasowych doświadczeń autora wynika, że to czasem największy problem w trzeciej klasie szkoły podstawowej...).

Po prawidłowym zamocowaniu linki holu można odwrócić szkielet do prawidłowego położenia („leży na kocyku z podniesionymi łapkami” ;o)) i przystąpić do nakładania na pręty szkieletu końcówek łączących go z poszyciem. Należy zwrócić uwagę na ich odpowiednie położenie („podeszwą do kocyka”).

Przed przyklejeniem końcówek do poszycia trzeba przymierzyć elementy. Prawidłowo wykonany szkielet jest nieco mniejszy od obrysu poszycia – należy dostrzec, ile miejsca powinno pozostać – po każdej stronie jednakowo. Jako pierwsze należy skleić górną i dolną końcówkę, odpowiednio naprężając przy tym bibułę. Lepszy w tym zastosowaniu jest klej w sztyfcie – pozwala na większe poprawki, ale za to dłużej wiąże. Po sklejeniu wzdłużnych prętów przychodzi kolej na poprzeczne (nie zapominając o symetrii i naprężeniu poszycia).

Ogon tego latawca to jeden pas bibuły, której po rozwinięciu zagniata się środek. Następnie przekłada się taśmę pod dolną listewką aż do połowy krepiny. Potem zagina się ją wokół beleczki ogonowej z obu stron i nasz

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Taśmę ogonową po rozwinięciu zagniata się w połowie długości...



...pozwoli to symetrycznie umieścić ją pod prętem ogonowym modelu

superszybki latawiec jest już gotowy do lotu! Takie rozwiązanie pozwala zdemontować ogon na czas transportu modelu (po zwinięciu go do początkowej postaci (na pół, na pół i tak dalej) i założeniu opaski).

Loty testowe oraz konkursowe

Przed jakimkolwiek startem wszyscy uczestnicy powinni znać zasady bezpiecznej eksploatacji takich modeli:

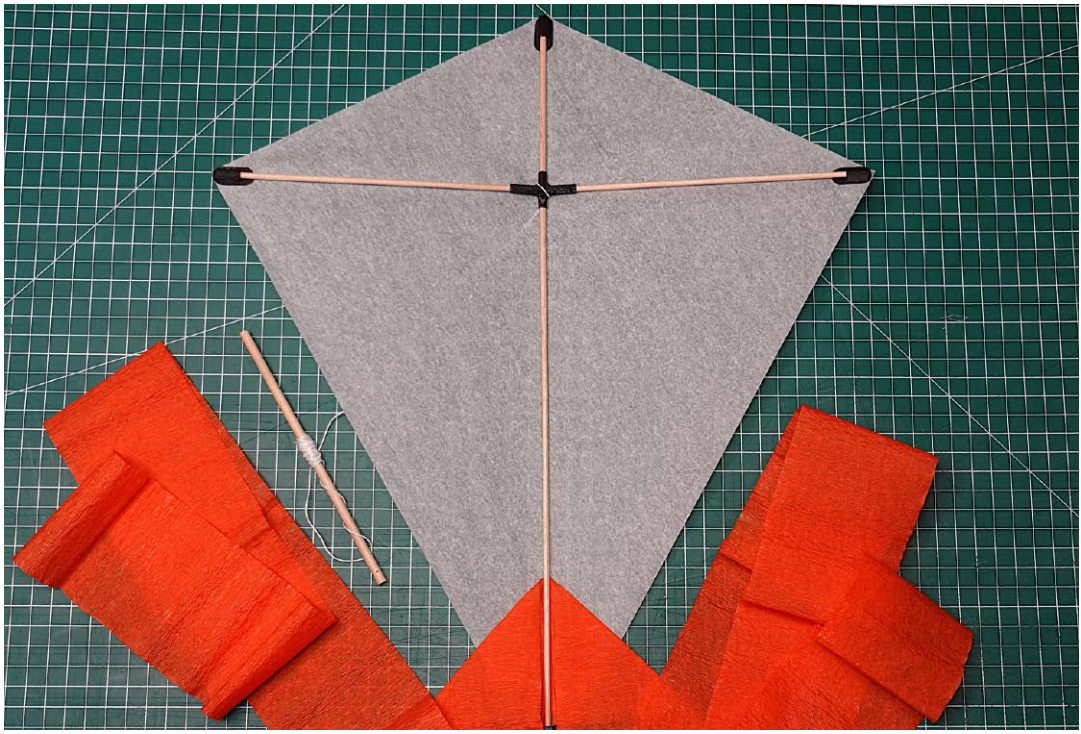
- nigdy nie startujemy, kiedy w zasięgu holu mogą znaleźć się ludzie, zwierzęta lub przewody pod napięciem. Nie wolno również latać na ulicy, po której mogą poruszać się samochody;
- ze względu na zastosowane materiały nie warto startować na zroszonej trawie lub przy możliwych opadach;
- w przypadku udziału w testach lub zawodach większej liczby zawodników należy ustalić osobny tor lotów i osobny tor powrotny na miejsce startów (bez lotów);
- każdorazowo start wymaga zgody kierownika lotów (nauczyciela lub wyznaczonej przez niego osoby);
- pomocnik zawodnika powinien trzymać latawiec na otwartej dłoni z holem pomiędzy palcami, aby umożliwić swobodny start modelu.

Ponieważ to bardzo lekki reprezentant rodziny pierwszych urządzeń latających, do jego „ulotnienia" wystarczy niewielki wiatr (start w kierunku, skąd wieje) lub niezbyt szybki bieg w warunkach bezwietrznych (na przykład w szkolnej sali gimnastycznej). Do zadań operatora latawca należy takie kontrolowanie prędkości latawca, aby wznosił się on odpowiednio wysoko, ale nie kręcił nerwowo – wymaga to podzielności uwagi pomiędzy obserwowaniem latawca a kontrolą kierunku biegu. Najwyższe oceny zdobywają w zawodach zawodnicy,



Zagięcie bibuły pod kątem 90° po obu stronach szkieletu kończy montaż modelu!

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Gotowy model latawca „Super Fest”!

których model leci statecznie i możliwie wysoko (przy ustalonej długości holu chodzi raczej o kąt względem powierzchni). W warunkach lekcyjnych testy mogą polegać na pojedynczych lotach choćby w wolnym korytarzu, w minizawodach przyjmuje się, że każdy zawodnik powinien mieć możliwość wykonania choć trzech lotów.

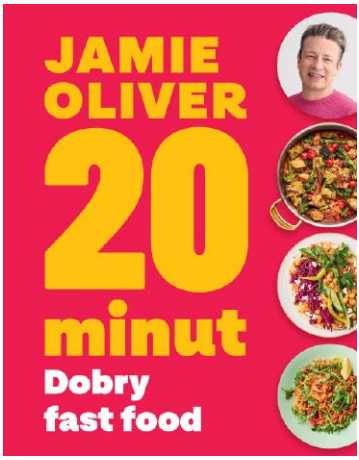
Do transportu latawca dobrze jest mieć choć odpowiednią torbę-zrywkę – jeszcze lepiej sztywne pudełko (nawet na wszystkie klasowe modele) – ale to już temat na inny materiał.

Tradycyjnie wszystkim pedagogom oraz młodym wykonawcom tego modelu życzę wiele satysfakcji ze zbudowanych i oblatanych modeli, zachęcając jednocześnie do dzielenia się swoimi relacjami z autorem i redakcją poprzez profile w serwisie Facebook lub pocztę elektroniczną. ■

P. Dobromir

20 minut. Dobry fast food
Jamie Oliver
Wydawnictwo: Insignis, stron: 320, sugerowana cena: 99,99 zł

Jamie wraca z ponad 120 przepisami pomyślanymi tak, by gotowy posiłek pojawił się na stole po zaledwie 20 minutach. Punktem wyjścia nie była efektowność, tylko prosta reguła: jeśli dania nie dało się przygotować w tym czasie, nie trafiało do książki.
20 minut jako twarda zasada. Ta książka wyrasta z bardzo konkretnego założenia. Każdy przepis został sprawdzony pod kątem tempa przygotowania, więc zamiast długich etapów i zbędnych komplikacji dostajemy szybkie rozwiązania na codzienne gotowanie. W centrum są intensywne smaki, natychmiastowa satysfakcja i brak kompromisów. To kuchnia stworzona z myślą o tych momentach, kiedy pytanie „co na obiad” trzeba zamienić na gotowe danie bez wielogodzinnego stania przy blacie.



eprasa.pl 7fd5cc1c0f

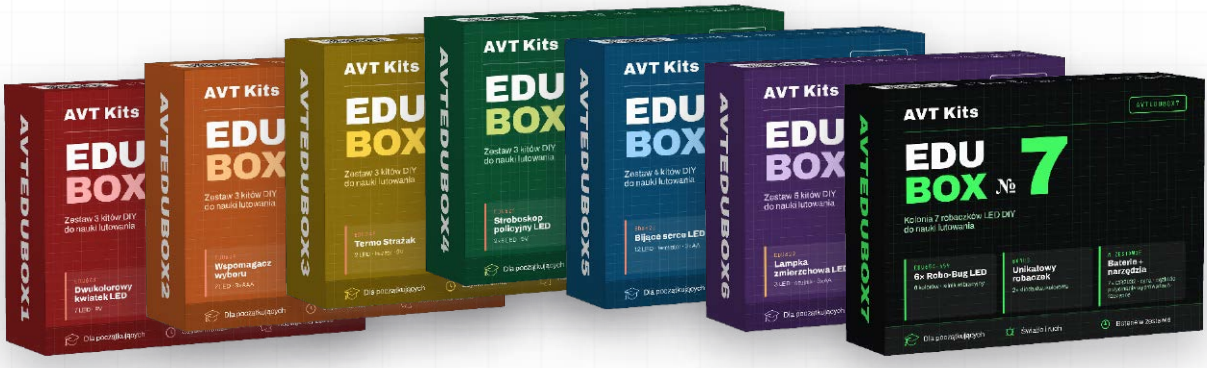
AVT Kits

SERIA ZESTAWÓW DO NAUKI LUTOWANIA

NOWOŚĆ · SIEDEM PUDEŁEK

EDU BOX

Otwierasz, lutujesz, działa. Komplet elementów i kolorowa instrukcja po polsku w każdym pudełku.



1 · 3 KITY	2 · 3 KITY	3 · 3 KITY	4 · 3 KITY	5 · 4 KITY	6 · 5 KITÓW	7 · 7 ROBACZKÓW
◆ THE BEST OF	◆ THE BEST OF	◆ THE BEST OF	◆ THE BEST OF	◆ THE BEST OF	◆ THE BEST OF	◆ THE BEST OF
Dwukolorowy kwiatek LED	**Kolorofon LED**	**Super Ucho**	**Pikająca kostka do gry**	**Bijące serce LED**	**Minipianino**	**6× Robo-Bug LED**



Kolorowa instrukcja po polsku w każdym zestawie

ZDJĘCIA MONTAŻU · SCHEMAT · WYKAZ ELEMENTÓW · KOLEJNOŚĆ LUTOWANIA

Lutownica, kilka elementów i układ, który świeci, gra albo mierzy temperaturę.

EDU BOX to siedem pudełek dla tych, którzy dopiero biorą lutownicę do ręki. W każdym od trzech do siedmiu kompletnych zestawów AVT — płytki, komplet elementów i kolorowa instrukcja po polsku. Od pierwszego migającego LED-a po kolonię świecących robaczków na wibrujących silniczkach.

1. **Dla początkujących**
   Montaż przewlekany, bez elementów SMD
2. **Komplet elementów**
   Płytki, podzespoły, cyna i instrukcja. Lutownicę i baterie dokupujesz osobno
3. **Kolorowa instrukcja po polsku**
   Zdjęcia montażu, schemat i wykaz elementów — w pełnym kolorze
4. **Efekt widać od razu**
   Światło, dźwięk i czujniki — działa zaraz po zmontowaniu

sklep.avt.pl

AVT SPV Sp. z o.o. · ul. Leszczynowa 11 · 03-197 Warszawa

EDU BOX 1–7
AVTEDUBOX1 … AVTEDUBOX7
zeskanuj i zobacz serię

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



ODKRYJ HISTORIĘ WYNALAZKÓW

Hamulce

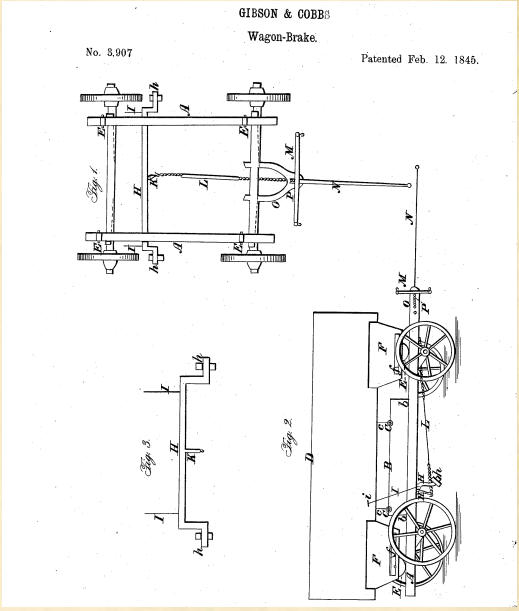
Hamulec zatrzymuje pojazd w ten sposób, że odbiera mu energię ruchu i musi ją gdzieś podziać: prawie zawsze zamienia ją w ciepło, a od niedawna potrafi część oddać z powrotem jako prąd. Cała historia tego wynalazku to szukanie odpowiedzi na trzy pytania: gdzie podziać to ciepło, jak przenieść siłę na koło, które się obraca i skręca, oraz co ma się stać, gdy hamulec się zepsuje.

W starożytności – hamulca, który dałoby się obejrzeć, nie znamy. Są przesłanki ikonograficzne: na przedstawieniach wozów dwukołowych widać element odczytywany jako klocek dociskany do obręczy albo jako podnóżek, który mógł tę rolę pełnić, a dla rzymskiego wozu czterokołowego typu Langres Michel Molin zrekonstruował układ z klocków i łańcucha. To są jednak interpretacje przedstawień, nie znaleziska mechanizmów.

1832–1844 r. – pierwsze hamulce działające na cały skład kolejowy. George Stephenson próbuje najpierw przenosić siłę przez drągi zderzakowe, ale takiego pociągu nie da się pchać; rok później sprzęga z klockami tłok parowy. W 1844 roku Nasmyth i May budują pierwszy hamulec podciśnieniowy.

12 lutego 1845 r. – pierwszy sprawdzony patent na hamulec wozu konnego: US 3907, David Gibson i Walker Cobb z Ohio, nazwa własna „Self-Locker". Pomysł jest przewrotny. Na zjeździe, gdy ustaje siła uciągu, platforma na rolkach przesuwa się własnym ciężarem do przodu i dociska gumowe klocki do kół: im cięższy wóz i im stromszy zjazd, tym mocniej hamuje. Puszcza, gdy konie znów pociągną.

1852–1859 r. – trzy brytyjskie konstrukcje i jeden zawód. James Newall prowadzi przez skład wał o średnicy dwóch cali, czyli około 51 mm; Charles Fay stosuje hamulec śrubowy obsługiwany kołem; Clark i Wilkins – hamulec łańcuchowy o sile około trzech ton, czyli mniej więcej 30 kN na pojazd. Wspólna wada: hamowanie jest rozproszone na ludzi w składzie. W układach Faya i Newalla maszynista nie ma nad hamulcem żadnej władzy, przy hamulcu łańcuchowym dysponuje tylko linką z budki. Hamuje konduktor i hamulcowi rozstawieni wzdłuż składu. To, a nie brak hamulca, jest właściwym problemem epoki.

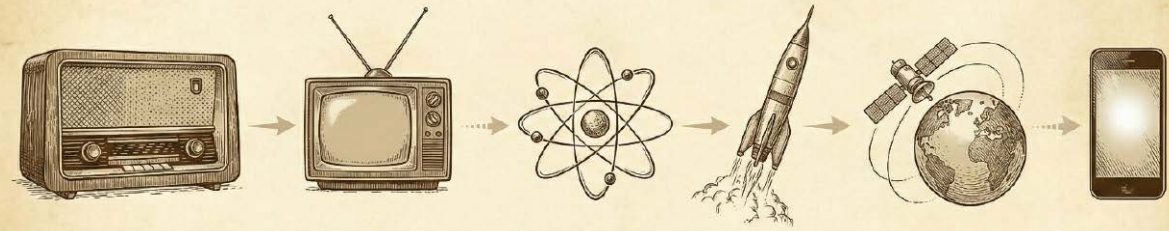

GIBSON & COBB'S
Wagon-Brake.
No. 3,907
Patented Feb. 12. 1845.

Hamulec wozu konnego „Self-Locker", 1845

13 kwietnia 1869 r. – George Westinghouse patentuje hamulec pneumatyczny bezpośredni (US 88 929). Sprężone powietrze z pompy na parowozie płynie przewodem do cylindrów w wagonach: wzrost ciśnienia hamuje. Ta data widnieje na tablicach pamiątkowych, ale nie ona zmieniła kolejnictwo. Układ ma wadę zabójczą – pęknięcie przewodu albo rozerwanie składu oznacza utratę hamowania dokładnie wtedy, gdy jest ono najpotrzebniejsze.

5 marca 1872 r. – Westinghouse odwraca zasadę (US 124 404). Pod każdym wagonem wiesza własny

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



zbiornik powietrza, nieco większy od cylindra hamulcowego i wytrzymujący około 100 funtów na cal kwadratowy, czyli blisko 6,9 bara. Energia do hamowania przestaje płynąć z parowozu, a zaczyna czekać na miejscu, pod wagonem.

28 października 1873 r. – zawór trójdrożny w postaci, która przetrwała (US 144 006; pierwszy, grzybkowy, pochodzi z 12 sierpnia tego samego roku). To jest sedno wynalazku: przewód jest stale pod ciśnieniem i właśnie to ciśnienie trzyma hamulce odpuszczone, a zawór tłumaczy każdy jego spadek na otwarcie drogi ze zbiornika do cylindra. Każde rozszczelnienie – pęknięcie węża, rozerwanie składu, wykolejenie – samo uruchamia hamulce. Dojrzałą postać, obsługującą i hamowanie służbowe, i nagłe, Westinghouse opatentuje w 1879 roku.

Czerwiec 1875 r. – próby porównawcze w Newark rozstrzygają spór ośmiu konstrukcji na składzie parowóz plus piętnaście pojazdów. Hamulec samoczynny Westinghouse'a zatrzymuje pociąg z prędkości 82,9 km/h na dystansie 251 metrów; najsłabszy w całym zestawieniu hamulec podciśnieniowy – również konstrukcji Westinghouse'a, bo rozwijał on równolegle oba tory – potrzebuje z prędkości niemal takiej samej aż 467 metrów. Trzy lata później kapitan Douglas Galton mierzy wspólnie z Westinghouse'em tarcie przy dużych prędkościach i dochodzi do wniosku sprzecznego z intuicją: koło zablokowane, ślizgające się po szynie, hamuje słabiej niż koło, które jeszcze się toczy.

1 lutego 1885 r. – w Wielkiej Brytanii wchodzi w życie obowiązek hamulca zespolonego w pociągach pasażerskich. Przepis nie wystarcza. Cztery lata później, 12 czerwca 1889 roku, pod Armagh zawodzi niesamoczynny hamulec podciśnieniowy Smitha; ginie osiemdziesiąt osób, dwieście sześćdziesiąt odnosi obrażenia. Dopiero ustawa z 30 sierpnia 1889 roku daje kolejom osiemnaście miesięcy na hamulce zespolone.

1886–1887 r. – próby w Burlington w stanie Iowa, zorganizowane przez amerykańskie stowarzyszenie budowniczych wagonów. Każdy producent wyposaża blok pięćdziesięciu wagonów towarowych. Pierwszy sezon kończy się kompromitacją: szarpnięcia na ostatnim wagonie sięgają trzech metrów, składy się rozrywają. Westinghouse wraca rok później z zaworem szybkodziałającym (US 360 070), w którym powietrze idzie do cylindra nie tylko ze zbiornika, ale wprost z przewodu głównego. Skład pięćdziesięciu wagonów zatrzymuje się z 64 km/h na 212 metrach.

2 marca 1893 r. – amerykańska ustawa o urządzeniach bezpieczeństwa. Jej sformułowanie jest znamienne: maszynista ma panować nad prędkością pociągu „bez udziału hamulcowych obsługujących zwykły hamulec ręczny". Powód zwłoki w kolejnictwie towarowym był prozaiczny. W 1889 roku hamulec samoczynny miało już 7706 z 8079 parowozów pasażerskich, czyli ponad dziewięćdziesiąt procent, ale mniej niż 8 procent wagonów towarowych – a tych było ponad milion i przewoźnicy wymieniali je między sobą, więc nikt nie chciał zacząć pierwszy.

11 listopada 1896 r. – Ernest Monnington Bowden patentuje pancerną linkę (GB 25 325): ciasno zwinięta sprężyna, nieściśliwa wzdłuż osi, ale giętka w każdym kierunku poprzecznym, a w niej przesuwa się nierozciągliwa linka ze skrętki drucianej. Piąte zastrzeżenie dotyczy wprost hamulca rowerowego. Cztery lata później Alexander Morrow dostaje patent na hamulec kontra, uruchamiany cofnięciem pedałów (US 641 983) i tłumaczy w opisie, po co go schował w piaście: dotychczasowe klocki tarły o oponę pneumatyczną i ją niszczyły.

1897 r. – Herbert Frood zaczyna w angielskim Chapel-en-le-Frith szukać materiału na okładzinę cierną: najpierw włosie końskie z bitumem, potem tkana bawełna nasycana żywicą. Patent uzyskuje w 1901 roku, nazwa Ferodo – anagram nazwiska FROOD z dodanym „E" od imienia żony, Elizabeth – powstaje w 1904, a około 1910 roku Frood ustala, że lepszym włóknem jest azbest. Ta decyzja będzie obowiązywać przez dziewięćdziesiąt pięć lat, aż do unijnej daty granicznej 1 stycznia 2005 roku.

1 grudnia 1902 r. – Frederick William Lanchester zgłasza patent, który czyta się jak opis dzisiejszego hamulca (GB 190226407): metalowa tarcza przymocowana do piasty koła, z obu jej stron dwa klocki dociskane dźwigniami. Hamulec tarczowy jest więc wynalazkiem z początku wieku, a nie z lat pięćdziesiątych. Dlaczego nie wszedł wtedy do użytku – nie wiadomo; krążące wyjaśnienia nie mają oparcia w dokumentach.



Hala maszynowa fabryki hamulców w Wilmerding, 1905, Detroit Publishing Company photograph collection, Library of Congress, Prints and Photographs Division

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



18 marca 1910 i **21 października 1913 r.** – Henri Perrot, w patencie z 1910 roku wspólnie z J. M. Ruburym, rozwiązuje problem, który blokował hamulce przednie: jak przenieść siłę na koło, które jednocześnie się obraca i skręca. Odpowiedź jest geometryczna – przegub cięgła leży dokładnie w osi sworznia zwrotnicy, więc hamulec pracuje niezależnie od kąta skrętu. Trzy lata później Perrot patentuje pełny układ na cztery koła, w którym cięgła biegną po przekątnej: prawe przednie z lewym tylnym i odwrotnie. Awaria jednej przekątnej zostawia hamowanie po obu stronach pojazdu.

4 grudnia 1917 r. – Malcolm Loughead zastępuje cięgna i dźwignie cieczą pod ciśnieniem (US 1 249 143). Nurnik pod podłogą wtłacza olej do sztywnych rur zakończonych odcinkami elastycznymi, które znoszą ruchy kół względem ramy. Uwaga dla porządku: to nie jest jeszcze hamulec bębnowy ze szczękami, tylko zewnętrzna taśma ściągana na bęben. Cztery lata później Frederick Duesenberg wprowadza czterokołowy hamulec hydrauliczny do produkcji, w modelu A; Loughead zdąży dopiero pod koniec 1923 roku. Dwie rzeczy nagminnie się tu zlewają: hamulce na cztery koła są o niemal dekadę starsze od hydrauliki, a opatentował je Perrot, a Duesenberg był pierwszy z ich hydraulicznym połączeniem.

1926 r. – fizyka doczekała się wreszcie pomiarów. H. H. Allen umieszcza po jednej termoparze miedź–konstantan w każdej z ośmiu szczęk samochodu i mierzy opóźnieniomierzem, co się dzieje po serii hamowań z krótkimi przerwami na chłodzenie. Okazuje się, że hamulec traci skuteczność nie tylko stopniowo, przez zużycie, ale też nagle, od temperatury; Allen tłumaczy to działaniem ciepła na lepiszcze okładziny, od którego maleje pozorny współczynnik tarcia. Siedem lat później Schmidt i Schrader mierzą na kolei drugą połowę tej samej prawidłowości: współczynnik tarcia klocka o koło, czyli stosunek siły stycznej do siły docisku klocka, maleje z 0,265 przy 32 km/h do 0,173 przy 97 km/h. Hamulec klockowy jest więc najsłabszy dokładnie tam, gdzie jest najbardziej potrzebny.

15 września 1936 r. – pierwszy patent na układ przeciwblokujący do samochodu: Robert Bosch GmbH, DE 671 925. Pętla regulacji jest już kompletna, tylko wykonana w technice elektromechanicznej. Odśrodkowy stycznik na kole przerywa zasilanie elektrozaworu, gdy prędkość koła spada poniżej progu; zawór upuszcza ciśnienie z cylindra hamulcowego; koło się rozkręca i cykl zaczyna się od nowa. Na pierwsze wdrożenie w samochodzie osobowym trzeba będzie czekać trzydzieści lat, a na pierwszy układ sterowany cyfrowo czterdzieści dwa – nie dlatego, że pomysł był zły, tylko dlatego, że ówczesna elektronika analogowa nie spełniała wymagań trwałości i bezpieczeństwa.

15 maja 1949 r. – pierwszy amerykański samochód



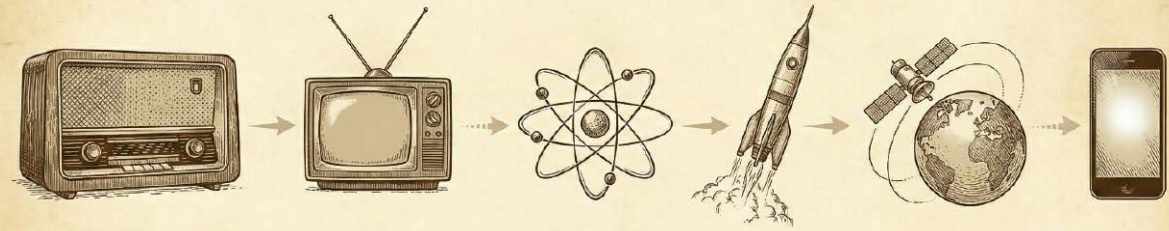
Naprawa pękniętego klocka hamulcowego w torze, 1942, Jack Delano/Farm Security Administration – Office of War Information Collection, Library of Congress

seryjny z hamulcami tarczowymi: Crosley z hamulcem Hydradisc konstrukcji Jessego Hawleya. Tarcza żeliwna o średnicy 190 mm, zacisk pływający jednotłoczkowy, czyli architektura dzisiejsza – w odróżnieniu od drugiego amerykańskiego hamulca tarczowego tej epoki, Ausco-Lambert z Chryslera Crown Imperial, w którym dwie tarcze rozpierały się kulkami w pochylonych gniazdach wewnątrz obracającej się obudowy i który konstrukcyjnie był bliższy bębnowi niż dzisiejszemu hamulcowi tarczowemu. Wyprodukowano około 7400 samochodów z tym hamulcem i po roku wrócono do bębnów, bo zaciski korodowały – zabrakło osłony przeciwbryzgowej.

14 czerwca 1953 r. – Jaguar C-type wygrywa Le Mans ze średnią 170,3 km/h, pierwszy raz w historii tego wyścigu powyżej stu mil na godzinę. Opracowanie z 2000 roku podaje, że Jaguary hamowały na końcu prostej Mulsanne mniej więcej w połowie drogi rywali i że tam odbywała się większość wyprzedzania; relacja z epoki pisze tylko o „niewiarygodnej mocy hamowania". Sam kierownik zespołu John Wyer twierdził zresztą później, że wygrali, bo mieli „diabelnie dobry samochód", a nie z powodu hamulców. Warto rozdzielić dostawców, bo mylą się nagminnie: tarcze i zaciski były Dunlopa, pompa główna Girlinga, a pompę hydrauliczną wspomagania, napędzaną od wału napędowego, dostarczył Plessey.

Październik 1955 r. – Citroën DS 19: tarcze z przodu w samochodzie produkowanym masowo. Nie przy kołach, lecz wewnętrznie, przy przekładni głównej, zasilane z akumulatorów hydraulicznych układu hydropneumatycznego. Pedał hamulca jest grzybkiem o średnicy około 44 mm o minimalnym skoku, bo otwiera tylko zawory rozdzielające – recenzent z epoki pisze, że siła na pedale jest prawie

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

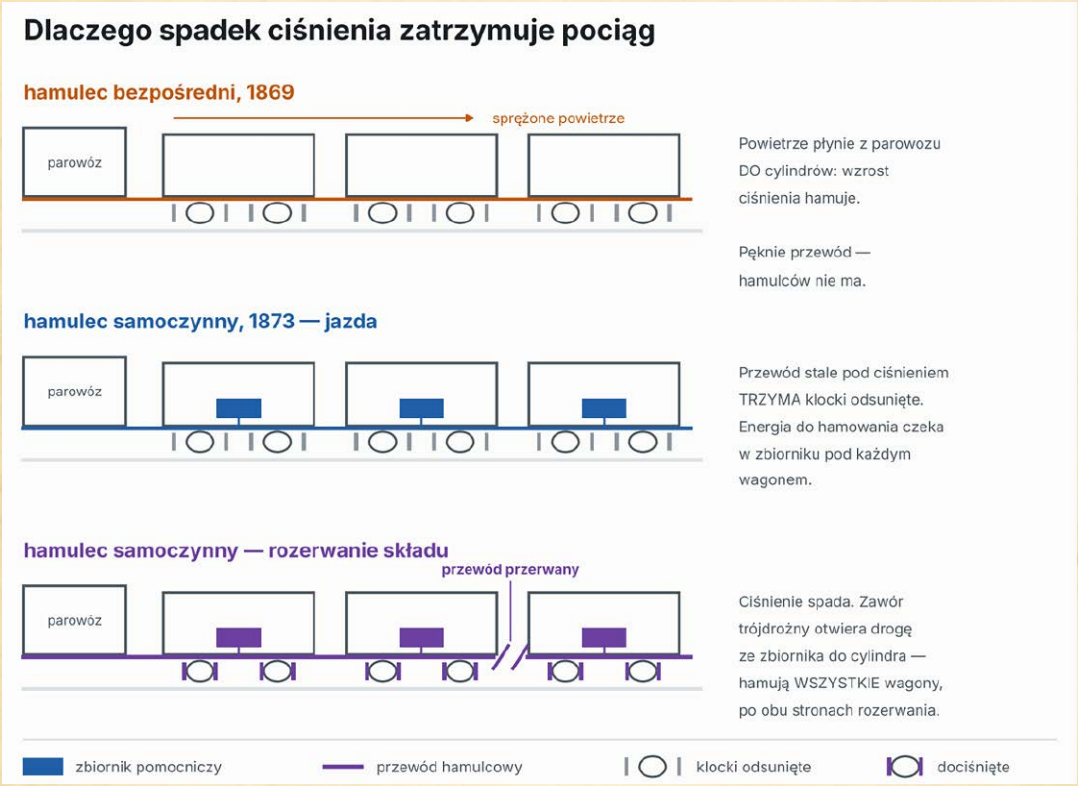


pomijalna i że takiemu układowi musi brakować czucia. Łączna powierzchnia okładzin wszystkich czterech hamulców wynosi 520 cm².

1957 r. – Clessie Lyle Cummins wymyśla hamulec silnikowy dekompresyjny, produkowany przez wytwórnię Jacobsa od 1961 roku. U końca suwu sprężania zawór wylotowy otwiera się hydraulicznie i sprężone powietrze ucieka, więc tłok nie napotyka oporu na suwie rozprężania. Energia ruchu pojazdu idzie z wylotem i przez ścianki cylindra do płynu chłodzącego, zamiast grzać okładziny.

1965–1966 r. – pierwszy samochód osobowy z układem przeciwblokującym. Jensen pokazuje w 1965 roku model C-V8 FF z układem Maxaret, który Dunlop opracował dla lotnictwa; rok później wchodzi do produkcji Jensen FF. Układ jest wciąż mechaniczny: koło zamachowe, napędzane od centralnego mechanizmu różnicowego przekładni Ferguson Formula, przy gwałtownym opóźnieniu „zostaje w tyle" za napędzającym je wałkiem i zamyka styk, a elektromagnes odwraca kierunek działania wspomagania i obniża ciśnienie hamowania.

1968 i **1971 r.** – dwa obwody wchodzą do przepisów, choć w zupełnie różny sposób. Amerykańska norma FMVSS 105 (Federal Motor Vehicle Safety Standard, federalna norma bezpieczeństwa pojazdów), obowiązująca od 1 stycznia 1968 roku, wymaga wprost układu rozdzielonego – przy czym raport tamtejszego urzędu bezpieczeństwa ruchu drogowego stwierdza, że rok wcześniej taki układ był już standardem u wszystkich marek, więc norma utrwaliła rozwiązanie, którego nie wymyśliła. Europejska dyrektywa 71/320/EWG z 26 lipca 1971 roku postępuje inaczej. Wbrew temu, co się powtarza, nie nakazuje układu dwuobwodowego i nie posługuje się pojęciem „układ dwuobwodowy". Wymaga czegoś ogólniejszego: po awarii części przewodu hamulca roboczego ma nadal hamować wystarczająca liczba



Rysunek 1 Hamulec bezpośredni z patentu US 88 929 (1869) i hamulec samoczynny z patentów US 124 404 (1872) oraz US 141 685 i US 144 006 (1873). Układ zbiorników pod wagonami, podwójny przewód i działanie zaworu trójdrożnego – za pełnymi tekstami patentów; rozstrzygnięcie, który patent czego dotyczy – za opinią Sądu Najwyższego Stanów Zjednoczonych w saprawie Westinghouse przeciwko Boyden Power Brake Co., 170 U.S. 537 (1898). Rysunek jest schematem zasady działania, nie odwzorowaniem konstrukcji z rysunków patentowych.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



kół, przy sile na pedale nie większej niż 70 kilogramów siły, czyli około 687 niutonów. Dwa obwody są najprostszym sposobem spełnienia tego wymagania, a nie wymaganiem samym w sobie.

1971 i **1978 r.** – Chrysler i Bendix przedstawiają w styczniu 1971 roku układ „Sure-Brake", pierwszy seryjny czterokołowy układ przeciwblokujący w samochodzie osobowym (w nazwie z epoki: anti-skid), oferowany jako wyposażenie dodatkowe Imperiala; elektronika jest w nim jeszcze analogowa. Siedem lat później Bosch przedstawia ABS 2 (z niemieckiego Antiblockiersystem, po angielsku anti-lock braking system, czyli układ przeciwblokujący), pierwszy seryjny układ tego rodzaju sterowany cyfrowo. Rozróżnienie jest konieczne, bo o pierwszeństwo spiera się kilka firm naraz. Analogowy ABS 1 opracowała wcześniej spółka Teldix z Heidelbergu i Bosch pisze o nim wprost: mimo udanych prób zimowych ówczesna elektronika analogowa nie spełniała wymagań bezpieczeństwa hamowania i nie była dość trwała.

1976 r. – na torze Nürburgring staje pierwszy samochód Formuły 1 z hamulcami węglowymi, Brabham BT45. Pierwsza konstrukcja nie działa: tarcza stalowa z dwudziestoma węglowymi krążkami odkształca się, bo węgiel i stal rozszerzają się przy ogrzewaniu w różnym stopniu, tarcza zaczyna trzeć o zacisk i zagotowuje płyn. Uwaga materiałowa: w Formule 1 i w lotnictwie jest to kompozyt węgiel–węgiel, a nie ten sam materiał, który trafi później do drogich samochodów drogowych.

1995 r. – hamulec zaczyna sterować kierunkiem jazdy, a nie tylko zatrzymywać pojazd. W produkcję wchodzą dwa niezależne elektroniczne układy kontroli stateczności: ESP Boscha i Daimlera-Benza w klasie S oraz VSC Toyoty w modelu Crown Majesta. Który z nich był pierwszy w ciągu roku, z materiałów producentów nie wynika. Wspólna jest zasada: czujniki porównują kąt skrętu kierownicy z rzeczywistym torem jazdy, a przy rozbieżności układ zmniejsza moment silnika i przyhamowuje wybrane koło, wytwarzając moment, który sprowadza pojazd na tor zadany kierownicą. Bosch podaje dla swojego ESP, że porównanie powtarza się dwadzieścia pięć razy na sekundę.

Październik 1997 r. – Toyota Prius i hamowanie odzyskowe w samochodzie produkowanym masowo. Samo odzyskiwanie energii hamowania jest znacznie starsze: koleje i tramwaje oddają ją do sieci od dawna, a Siemens podaje dla swoich pociągów początek lat dziewięćdziesiątych i oszczędność rzędu dziesięciu procent energii pobieranej z sieci na jazdę. Nowe w Priusie jest co innego – hamulec elektryczny i hamulec cierny pracują w jednym układzie regulacji, który w locie rozdziela między nie opóźnienie, tak żeby kierowca niczego nie poczuł.

1 stycznia 2005 r. – data graniczna unijnego zakazu chryzotylu; obowiązujący dziś Regulamin nr 13 Europejskiej Komisji Gospodarczej ONZ mówi w polskim tekście urzędowym wprost, że okładziny hamulcowe nie mogą zawierać azbestu. Materiał, który Frood uznał za najlepszy około 1910 roku, znika z hamulców po dziewięćdziesięciu pięciu latach. Następna substancja w kolejce to miedź – w Kalifornii od 1 stycznia 2025 roku jej zawartość w materiale ciernym nie może przekraczać pół procenta masy.

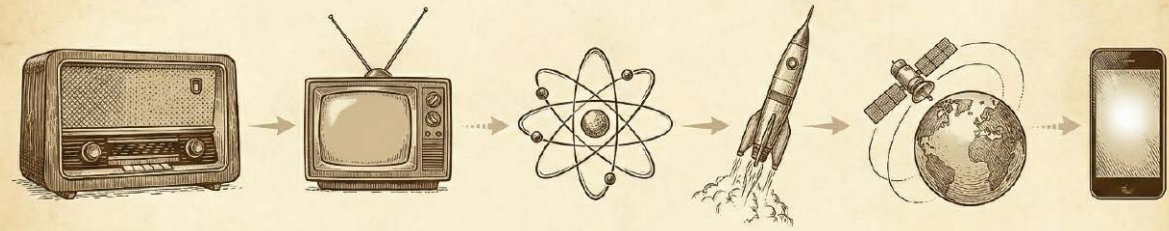
Grudzień 2005 r. – przestroga, o której się nie pamięta. Mercedes-Benz, który cztery lata wcześniej wprowadził elektrohydrauliczny układ hamulcowy sterowany elektrycznie, Sensotronic Brake Control (SBC), przeprowadza akcję naprawczą obejmującą klasy E, SL i CLS. Usterka: z czasem luzuje się połączenie przewodu masowego, przez co układ przechodzi w hydrauliczny tryb awaryjny – zatrzymać się można, ale trzeba mocniej nacisnąć i głębiej wcisnąć pedał. Układ wycofano z produkcji.

1 listopada 2014 r. – od tego dnia nie wolno w Unii Europejskiej zarejestrować nowego samochodu osobowego ani dostawczego bez elektronicznego układu kontroli stateczności; dla nowych typów obowiązek zaczął się trzy lata wcześniej. Oszacowania skutków są jak na jedno urządzenie wyjątkowo duże: dla samochodów osobowych redukcja wypadków z udziałem jednego pojazdu o 34 procent i dachowań w takich wypadkach o 71 procent; dla SUV-ów odpowiednio 59 i 84 procent. Obie pary to szacunki amerykańskiego urzędu bezpieczeństwa ruchu drogowego dla tamtejszej normy, a nie dane europejskie, a para 59 i 84 procent dotyczy wyłącznie SUV-ów – pikapów i samochodów wielozadaniowych ta tabela nie obejmuje.

4 maja 2026 r. – Brembo ogłasza wejście do produkcji seryjnej bezpłynowej platformy hamulcowej Sensify: sterowanie elektryczne, inteligencja przy każdym kole, żadnych obwodów hydraulicznych. Producenta i modelu nie ujawniono, liczb też nie. Recenzowany przegląd opublikowany we wrześniu tego roku studzi zapał: w pełni „suchy" hamulec elektromechaniczny na czterech kołach jest wciąż na wczesnym etapie, a rozwiązania przejściowe obsługują nim tylko jedną oś. Pytanie, które Westinghouse postawił w 1873 roku, wraca tu w nowej postaci – nie czy hamulec działa, tylko co się stanie, kiedy przestanie.

7 lipca 2026 r. – od tego dnia w Unii Europejskiej nie wolno zarejestrować nowego samochodu osobowego, który nie hamuje sam przed pieszym i rowerzystą. To druga faza obowiązku z rozporządzenia o bezpieczeństwie ogólnym; pierwsza, obejmująca przeszkody i pojazdy z przodu, zaczęła obowiązywać przy rejestracji dwa lata wcześniej. Wymagania liczbowe są podane w sposób, który łatwo źle zrozumieć: tabele Regulaminu nr 152 Europejskiej Komisji

eprasa.pl 7fd5cc1c0f



Gospodarczej ONZ określają maksymalną dopuszczalną prędkość uderzenia, a nie wielkość redukcji prędkości. Przy sześćdziesięciu kilometrach na godzinę wolno uderzyć z prędkością trzydziestu pięciu. Stany Zjednoczone poszły dalej: norma FMVSS 127, przyjęta 9 maja 2024 roku, wymaga, żeby w badaniu nie doszło do kontaktu ani z pojazdem-celem, ani z manekinem pieszego – z terminem zgodności 1 września 2029 roku, a dla małych producentów oraz zakładów zabudowujących i przebudowujących pojazdy 1 września 2030 roku.

29 listopada 2026 r. – pył hamulcowy staje się w Unii Europejskiej przedmiotem homologacji. Rozporządzenie Euro 7 wprowadza pierwsze w historii limity emisji cząstek ze zużycia hamulców dla nowych typów samochodów osobowych i dostawczych: 3 miligramy na kilometr dla pojazdów czysto elektrycznych i 7 miligramów dla pozostałych napędów, poza najcięższą klasą samochodów dostawczych, dla której limity są wyższe. Uwaga na dwie trójki: te 3 mg/km z pierwszego etapu dotyczą wyłącznie pojazdów czysto elektrycznych, a od 1 stycznia 2035 roku ta sama liczba 3 mg/km obowiązuje wszystkie samochody osobowe i dostawcze bez względu na napęd – czyli odrębność elektryków w tym punkcie wygasa. Sto osiemdziesiąt jeden lat po patencie „Self-Locker” hamulec w zdecydowanej większości pojazdów robi dokładnie to samo co wtedy, zamienia ruch w ciepło; zaczyna być tylko rozliczany również z tego, co przy okazji zostawia w powietrzu. ■

Paweł Biernacki

Dziesięć słów o hamulcach

Hamulec zamienia energię ruchu w ciepło – a cała reszta nazewnictwa bierze się z pytania, gdzie to ciepło powstaje i co się stanie, gdy urządzenie zawiedzie.

hamulec roboczy, awaryjny i postojowy – trzy różne układy, nie trzy nazwy tego samego. Roboczy zatrzymuje pojazd w normalnej jeździe, awaryjny ma go zatrzymać po uszkodzeniu roboczego, postojowy trzyma go na postoju. „Hamulec ręczny” to dziś nazwa myląca, bo w wielu samochodach uruchamia się go przyciskiem.

hamulec tarczowy – tarcza obraca się razem z kołem, a zacisk dociska do niej z obu stron dwa klocki. Tarcza chłodzi się dobrze, bo jest odsłonięta, i dlatego ten hamulec znosi serię mocnych hamowań, pod którą bęben by odpuścił.

hamulec bębnowy – szczęki rozpierają się wewnątrz obracającego się bębna. Jest tańszy i sam się wzmacnia – tarcie dociska szczękę mocniej – ale ciepło ma z niego trudniejszą drogę na zewnątrz.

okładzina cierna – materiał, który ociera się o tarczę albo bęben i zużywa się zamiast niej. Klocek hamulcowy to płytka nośna plus okładzina. Przez dziewięćdziesiąt lat robiono je z azbestu; w Unii Europejskiej nie wolno go używać od 2005 roku.

zanik skuteczności hamowania – po serii mocnych hamowań okładzina się nagrzewa, lepiszcze w niej mięknie i współczynnik tarcia spada – pedał jest tam gdzie był, a samochód nie zwalnia. Osobne zjawisko to zagotowanie płynu hamulcowego: wtedy pedał wpada w podłogę.

hamulec zespolony – układ kolejowy, w którym maszynista hamuje cały skład naraz. Przewód biegnący przez wszystkie wagony jest stale pod ciśnieniem i to właśnie ciśnienie trzyma hamulce odpuszczone; zawór trójdrożny w każdym wagonie zamienia spadek ciśnienia na hamowanie. Pęknięcie przewodu albo rozerwanie składu uruchamia więc hamulce samo.

urządzenie wspomagające – potocznie serwo. Zwielokrotnia siłę nogi kierowcy, wykorzystując podciśnienie z silnika albo pompę. Czym innym jest wspomaganie nagłego hamowania, które rozpoznaje, że kierowca nacisnął pedał szybko, ale za słabo, i samo dodaje ciśnienia.

układ przeciwblokujący (ABS) – czujniki pilnują, czy koło nie przestało się toczyć. Gdy zaczyna się blokować, układ na ułamek sekundy upuszcza ciśnienie w jego hamulcu i zaraz je przywraca. Powód jest fizyczny: koło ślizgające się po nawierzchni hamuje słabiej niż koło, które jeszcze się toczy – i przy okazji nie daje się nim kierować.

hamowanie odzyskowe – silnik elektryczny pracuje jako prądnica i energia ruchu wraca do akumulatora zamiast iść w ciepło. Hamulce cierne są wtedy używane tylko na dobitkę, więc zużywają się wolniej. Nie mylić z rekuperacją – tak nazywa się po polsku odzysk ciepła w wentylacji.

zwalniacz – dodatkowy układ do długiego zjazdu: hamuje łagodnie, ale bez końca, utrzymując stałą prędkość, zamiast pozwolić, żeby hamulce zasadnicze przegrzały się na pierwszym kilometrze. Bywa elektromagnetyczny, hydrauliczny albo silnikowy.

eprasa.pl 7fd5cc1c0f

KURS PRAKTYCZNY AI

Praktyczne podejście. Zero marketingowej mgły!









Zyskaj **15%** rabatu

W prenumeracie tylko ~~116,00 zł~~

98,60 zł

prenumerata drukowana 4 kolejnych wydań
(wiosna, lato, jesień, zima 2027)

Zamów na www.UlubionyKiosk.pl

lub zeskanuj kod QR i zaprenumeruj w 1 minutę

Wydania archiwalne (wiosna, lato, jesień 2026) i bieżące (zima 2026) są dostępne na www.UlubionyKiosk.pl

eprasa.pl 7fd5cc1c0f