Wojna o chipy: technologia, gospodarka i geopolityka

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Artykuł "Wojna o chipy: technologia, gospodarka i geopolityka" dogłębnie analizuje strategiczne znaczenie półprzewodników w dzisiejszym świecie. Przedstawia chip jako fundamentalny element łączący fizykę, ekonomię i geopolitykę, będący zarówno modułem produktywności, jak i narzędziem projekcji siły. Tekst śledzi ewolucję przemysłu półprzewodnikowego, od jego początków po powstanie gigantów takich jak TSMC i ASML, posiadających monopol na kluczowe technologie, jak litografia EUV. Centralnym punktem jest analiza konfliktu USA-Chiny o dominację technologiczną, w tym amerykańskich sankcji i chińskich odpowiedzi. Artykuł podkreśla również brutalną ekonomikę branży, gigantyczne koszty produkcji i złożoność łańcuchów dostaw, a także egzystencjalne znaczenie chipów dla nowoczesnej gospodarki, wojska i rozwoju sztucznej inteligencji, od historycznych zastosowań w programie Apollo po współczesne drony i akceleratory AI.

"The Chip Wars: Technology, Economy, and Geopolitics" provides an in-depth analysis of the strategic importance of semiconductors in today's world. It presents the chip as a fundamental element connecting physics, economics, and geopolitics, serving as both a productivity module and a tool for power projection. The paper traces the evolution of the semiconductor industry, from its origins to the rise of giants like TSMC and ASML, which hold monopolies on key technologies like EUV lithography. Central to this analysis is an analysis of the US-China conflict over technological dominance, including US sanctions and Chinese responses. The paper also highlights the brutal economics of the industry, the enormous production costs and complex supply chains, as well as the existential importance of chips for the modern economy, military, and the development of artificial intelligence, from historical applications in the Apollo program to contemporary drones and AI accelerators.

Chip jest skrystalizowaną koegzystencją fizyki, organizacji i polityki. W najwęższym sensie to monokryształ krzemu z mikroskopijną architekturą tranzystorów, gdzie sterowany napięciem

przepływ nośników informacji tworzy rachunek binarny. W sensie ekonomicznym jest modułem produktywności o malejącym koszcie na operację, który zasila krzywe doświadczenia całych sektorów. W sensie strategicznym stał się zaś instrumentem projekcji siły, bo moc obliczeniowa jest dziś miarą przewagi – od logistyki, przez wywiad sygnałowy, po broń precyzyjną i systemy autonomiczne. To troiste ujęcie wyjaśnia, dlaczego wojna o chipy między USA i Chinami angażuje innych graczy, od Holandii i Japonii po Koreę i Tajwan. Spór o półprzewodniki jest sporem o porządek świata. U podstaw teorii czipów leży prawo proste i bezlitosne, ochrzczone nazwiskiem Gordona Moore’a. Współzałożyciel Intela już w 1965 roku opisał empiryczną regułę, wedle której liczba tranzystorów na układzie scalonym podwaja się mniej więcej co dwa lata, podczas gdy koszt pojedynczej funkcji spada wykładniczo. Nie jest to jednak prawo natury, lecz samospełniająca się przepowiednia, którą całe łańcuchy dostaw – od producentów maszyn do fotolitografii po dostawców chemikaliów i oprogramowania – przyjęły za niepisany kontrakt społeczny. Oryginalny esej Moore’a pozostaje najtrafniejszą prognozą technologiczną XX wieku, ponieważ z chirurgiczną precyzją połączył fizykę z bezwzględną logiką ekonomii skali i kultury procesu....

SŁOWA KLUCZOWE

Wojna o chipy | Półprzewodniki | Litografia EUV | Prawo Moore’a | Geopolityka technologii | Łańcuchy dostaw | Moc obliczeniowa | ASML | TSMC | Sankcje technologiczne | RISC-V | Sztuczna inteligencja | Fabless | Metrologia | Apollo Guidance Computer

Chip: centrum globalnej rywalizacji

Prawo Moore’a i Dolina Krzemowa: geneza potęgi chipów

U podstaw teorii czipów leży prawo proste i bezlitosne, ochrzczone nazwiskiem Gordona Moore’a. Współzałożyciel Intela już w 1965 roku opisał empiryczną regułę, wedle której liczba tranzystorów na układzie scalonym podwaja się mniej więcej co dwa lata, podczas gdy koszt pojedynczej funkcji spada wykładniczo. Nie jest to jednak prawo natury, lecz samospełniająca się przepowiednia, którą całe łańcuchy

dostaw – od producentów maszyn do fotolitografii po dostawców chemikaliów i oprogramowania – przyjęły za niepisany kontrakt społeczny. Oryginalny esej Moore'a pozostaje najtrafniejszą prognozą technologiczną XX wieku, ponieważ z chirurgiczną precyzją połączył fizykę z bezwzględną logiką ekonomii skali i kultury procesu.

Historia półprzewodników nie jest bowiem linearnym pochodem geniuszy w białych kitlach. To raczej sprzężenie zwrotne między potrzebami wojska, pomysłowością inżynierów i agresywnym kapitalizmem Doliny Krzemowej. Od lamp próżniowych komputera ENIAC, przez tranzystor z Bell Labs, od Shockleya do Noyce'a i Kilby'ego, aż po metodę planarną Jeana Hoerniego – każde przesunięcie na krzywej uczenia się było okupione twardymi decyzjami instytucjonalnymi. Kto za to zapłaci? Kto zaryzykuje? Kto sparametryzuje setki kroków produkcyjnych, by z kapryśnej fizyki uczynić przewidywalną inżynierię? Katalizatorem okazało się wojsko. Kontrakt na pociski Minuteman II sprawił, że układy scalone przestały być laboratoryjnym gadżetem produkowanym w dziesiątkach sztuk, a stały się dobrem masowym, wytwarzanym w setkach tysięcy. Przewaga przestała rodzić się z pojedynczego patentu, a zaczęła zależeć od powtarzalności.

W latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych pałeczkę w sztafecie przejęła Japonia. Państwowo-przemysłowy ekosystem, obsesyjna inżynieria jakości i dostęp do taniego kapitału wywindowały japońskie firmy na pozycję liderów w produkcji pamięci DRAM. Amerykańska GCA traciła oddech, gdy Nikon i Canon dyktowały tempo. Ta historia jest ważna nie dlatego, że „Japonia wygrała", lecz dlatego, że zdefiniowała logikę na kolejne dekady: standaryzowany produkt o gigantycznym wolumenie zwycięża tam, gdzie przewagę buduje się dyscypliną procesu i metrologią. W odpowiedzi USA zinstytucjonalizowały współpracę przemysłu z Pentagonem w ramach konsorcjum Sematech, a Andy Grove w Intelu porzucił pamięci na rzecz mikroprocesorów i wdrożył doktrynę „dokładnego kopiowania". To współczesna religia operacyjna, w której powtarzalność jest królową jakości. Tak narodziła się samoświadomość Doliny Krzemowej jako przemysłu zbrojonego nauką o procesie. Tę samą dynamikę powtórzyła Korea Południowa, gdzie Samsung, karmiony importem know-how i państwowym wsparciem, zdominował rynek pamięci. Wreszcie na scenę wkroczył Tajwan z Morrisem Changiem, twórcą TSMC, który wprowadził model „foundry" – odlewni krzemu bez własnych marek. Oddzielił projektowanie od produkcji, demokratyzując innowacje i rodząc logikę „fabless". Dziś Nvidia, Qualcomm czy Apple projektują, a TSMC stempluje ich wizje atomową drukarką, dostarczając nową moc obliczeniową świata. Szacuje się, że udział TSMC w rynku najbardziej zaawansowanych układów logicznych sięga dziewięciu dziesiątych. To realny monopol funkcjonalny, nawet jeśli na papierze konkurencja wciąż istnieje.

ASML i EUV: krytyczne wąskie gardła dostaw

Wąskie gardła cywilizacji mają nazwę ASML. Holenderska firma, spleciona w technologicznym sojuszu z amerykańskim Cymerem oraz niemieckimi mistrzami optyki, Zeissem i Trumpfem, zmonopolizowała ekstremalny ultrafiolet (EUV). To fotolitografia, czyli sztuka drukowania obwodów światłem o fali zaledwie 13,5 nm, której opanowanie wymagało dekad badań i niemal baletowej choreografii precyzyjnych luster w próżni. Bez niej nie wydrukujemy najdrobniejszych geometrii na krzemie. Maszyny EUV kosztują grubo ponad sto milionów dolarów, a nowa generacja High-NA, oferująca wyższą rozdzielczość dzięki większej aperturze numerycznej, to wydatek rzędu 350 mln euro za sztukę.

ASML dostarczyło już pierwsze moduły High-NA do Intela, celując w produkcyjne użycie około 2026 roku. Równocześnie jednak narastają ograniczenia licencyjne na dostawy i serwis do Chin, co ukazuje, jak prozaiczna obsługa techniczna staje się instrumentem geopolitycznego nacisku. Nawet jeżeli skaner stoi w fabryce, bez regularnych kalibracji, aktualizacji oprogramowania i części zamiennych jest jak fortepian bez stroiciela. Jest pełen potencjału, ale pozostaje głuchy.

USA vs. Chiny: fronty wojny technologicznej

W globalnym układzie sił Chiny są technologicznym paradoksem. Z jednej strony to największa montownia świata i cyfrowa gospodarka pożerająca oceany mocy obliczeniowej. Z drugiej – mocarstwo odcięte od litografii EUV, z coraz bardziej ograniczonym dostępem do maszyn DUV i zaawansowanych układów AI. Od października 2022 roku amerykańskie regulacje uderzyły w najpotężniejsze akceleratory i sprzęt do ich produkcji, a kolejne uszczelnienia zablokowały próby obejścia sankcji przez specjalne, osłabione wersje „China-only”. Do technologicznej blokady dołączyła Japonia, wprowadzając wymóg licencji na 23 kategorie narzędzi litograficznych, oraz Holandia, która zacisnęła pętlę na kluczowym serwisowaniu maszyn. Fortepian bez stroiciela szybko staje się bezużyteczny.

Pekin odpowiedział, uderzając w czuły punkt Zachodu: ograniczył eksport galu, germanu i grafitu, czyli surowców, których łańcuchy dostaw mają wyraźną chińską dominację. W efekcie nie obserwujemy twardego rozwodu, lecz raczej proces „zarządzanej dyfuzji” technologii. Zachodni liderzy utrzymują barierę na poziomie SOTA, czyli state-of-the-art, absolutnego szczytu możliwości, pozwalając jednocześnie na swobodniejszy przepływ na starszych węzłach technologicznych. Ku powszechnemu zaskoczeniu, Huawei i SMIC zdołały jednak wspiąć się na poziom 7 nanometrów, używając wielokrotnego naświetlania w starszej technologii DUV, co potwierdziły analizy układów Kirin 9000s. Jest to jednak osiągnięcie okupione dużym wysiłkiem; bez dostępu do EUV koszty, wydajność i skalowalność produkcji stają się hamulcem w starciu z TSMC czy Intelem. Równolegle Państwo Środka promuje architekturę RISC-V jako „neutralną

geopolitycznie” alternatywę i buduje własny ekosystem oprogramowania. To wciąż jednak mocarstwo z przewagą w wolumenie, nie w technologicznym wyrafinowaniu.

Chipy: klucz do globalnej dominacji gospodarczej

Dlaczego ten wyścig jest egzystencjalny? Po pierwsze, ponieważ chipy stały się systemem nerwowym nowoczesnej gospodarki. To kuszące uproszczenie twierdzić, że to krzem stworzył współczesny świat; jak zauważa Christopher Miller, to raczej nasze instytucje nadały kształt temu, jak chipy się bada, projektuje i produkuje. Jednocześnie jednak to układy z Tajwanu dostarczają co roku około jednej trzeciej nowej mocy obliczeniowej, a holenderski ASML produkuje sto procent maszyn do litografii w ekstremalnym ultrafiolecie. Taki rozkład sił sprawia, że geografia mocy obliczeniowej staje się geopolityką w najczystszej postaci. Cieśnina Tajwańska przeistacza się w wąskie gardło cywilizacji, a amerykańska projekcja siły morskiej, wsparta systemem kontroli eksportu, działa niczym ręka na regulatorze dopływu tlenu do globalnej sztucznej inteligencji.

Po drugie, wojsko jest najbardziej nerwowym konsumentem mocy obliczeniowej. Każda kolejna iteracja przewagi militarnej była w istocie iteracją krzemu – od Paveway, pierwszych bomb naprowadzanych laserowo, które na poligonach Wietnamu zmieniły statystykę trafień, po pociski manewrujące Tomahawk. Od sonarów i satelitów, po dzisiejsze roje dronów i autonomiczne sensory. Strategia „offset”, budowana przez Billa Perry’ego i Andrew Marshalla, była w swej istocie strategią półprzewodnikową, mającą kompensować masę przeciwnika własną precyzją, inteligencją i łącznością. W XXI wieku ta zależność tylko się zradykalizowała. Uczenie maszynowe w systemach rozpoznania, czyli ISR, fuzja danych, logistyka predykcyjna czy walka radioelektroniczna – wszystko to opiera się na dostępności układów logicznych i pamięci w całym łańcuchu dostaw. Właśnie dlatego programy DARPA są nie tylko badaniami, ale swoistą przysięgą, że przewaga obliczeniowa pozostanie wewnątrz strefy sojuszniczej.

Po trzecie wreszcie, ekonomika chipów jest brutalnie nieliniowa. Budowa zaawansowanej fabryki kosztuje dziś od kilkunastu do ponad dwudziestu miliardów dolarów, a pojedynczy skaner High-NA EUV kosztuje około 350 milionów. To tworzy próg wejścia, który automatycznie zamienia rynek w klub dla nielicznych, skutecznie go oligopolizując. GlobalFoundries w 2018 roku skapitulowało w wyścigu do 7 nanometrów po chłodnej kalkulacji kosztów i korzyści. Odtąd „front technologiczny” to w praktyce TSMC, Samsung i Intel. Do tego dochodzi inflacja budowlana, koszty energii i bezprecedensowa złożoność łańcucha dostaw: setki tysięcy części, kapryśne okna serwisowe i oprogramowanie EDA kontrolowane przez garstkę firm. Polityka przemysłowa – amerykańskie CHIPS-y czy europejskie ramy wsparcia – nie tyle buduje coś od zera, co amortyzuje gigantyczne ryzyko i kupuje czas. W języku makroekonomii chip jest dziś dobrem, którego

niedobór paraliżuje wszystko inne. Dlatego wstrząs w jednym punkcie łańcucha wywołuje sejsmiczne fale w dziesiątkach sektorów.

Półprzewodniki: serce nowoczesnej doktryny wojskowej

Po drugie, wojsko jest najbardziej wrażliwym konsumentem mocy obliczeniowej. Od bomb Paveway, które na poligonach Wietnamu na nowo napisały statystykę zniszczeń, przez pociski manewrujące Tomahawk, aż po dzisiejsze roje dronów i autonomiczne sensory – każdy kolejny skok w dominacji militarnej był w istocie skokiem w miniaturyzacji krzemu. Strategia „offset", którą budowali Bill Perry i Andrew Marshall, była w gruncie rzeczy strategią półprzewodnikową. Jej celem było kompensowanie cudzej masy własną precyzją, inteligencją i wszechobecną łącznością.

W XXI wieku ta zależność tylko się zradykalizowała. Uczenie maszynowe w systemach rozpoznania, fuzja danych z tysięcy sensorów, logistyka predykcyjna, walka radioelektroniczna czy rozproszone podejmowanie decyzji na polu walki – wszystko to stoi i upada wraz z dostępnością układów logicznych i pamięci. Dlatego właśnie kontrola eksportu akceleratorów AI i maszyn do ich produkcji ma tak fundamentalne znaczenie strategiczne. A programy takie jak Electronics Resurgence Initiative agencji DARPA to nie tyle badania, co publiczne zaprzysiężenie, że przewaga obliczeniowa pozostanie po właściwej stronie sojuszniczej barykady.

Produkcja chipów: od EDA po pakowanie

Kultura fabrykacji to zupełnie osobny rozdział. Wbrew mitologii samotnego geniusza i jego „eureka!", prawdziwy postęp rodzi się tu z obsesyjnej kontroli tysięcy zmiennych: temperatury, ciśnień, czystości chemikaliów, parametrów plazmy, idealnej płaskości wafli. Metrologia, czyli nauka o pomiarze, jest tu nieustannym audytem w ruchu. Skanery nie drukują bowiem wprost „tego, co na masce", lecz jej cyfrowo przetworzony obraz, z góry uwzględniający zniekształcenia. Litografia wspomagana komputerowo modeluje, jak każdy foton zareaguje na krawędź tranzystora, a oprogramowanie przewiduje anomalie i koryguje je, zanim powstaną. Optycy z ZEISSa, by zobrazować tę precyzję, lubią porównania do skali kraju: „Gdyby lustro High-NA powiększyć do rozmiarów Niemiec, największa nierówność na jego powierzchni miałaby sto mikrometrów". To nie poezja, lecz twardy wymóg, bo każde „rozmycie" na poziomie ułamka nanometra przekłada się na prąd upływu w miliardach tranzystorów. Wszystko to musi pracować latami w warunkach nieustannych drgań i wahań temperatur. Dlatego serwis i kalibracja nie są dodatkiem, lecz integralną częścią procesu. I dlatego embargo na części bywa równie dotkliwe co embargo na sam sprzęt.

Kultura procesu: fundament przewagi w produkcji

Czy embarga działają? Owszem, ale tylko wtedy, gdy „atomizują” cały łańcuch wartości, blokując nie tylko gotowe układy, lecz także narzędzia, serwis, oprogramowanie i wiedzę wykonawczą. Dlatego odcięcie od technologii EUV jest tak bolesne – to nie jest po prostu maszyna, lecz cała biblioteka ukrytych parametrów kalibracji, modeli optycznych i chemii fotorezystów, której nie da się sklonować w jeden weekend. Działają również, gdy są zsynchronizowane między USA, Japonią i Holandią, a ich egzekwowanie jest sprzężone z monitoringiem przepływów wtórnych. Nie są jednak instrumentem natychmiastowej zmiany. Chiny bowiem wykazują zdolność do „wyciskania” postępów ze starszych narzędzi DUV i przenoszenia popytu na dojrzałe węzły technologiczne, a gigantyczny rynek wewnętrzny amortyzuje koszty nieoptymalnych rozwiązań. W długim okresie skuteczność sankcji zależy od tego, czy Zachód utrzyma przewagę wiedzy procesowej i szybkości „uczenia się fabryk”. To gra o ludzi, szkolenia i kulturę jakości w równym stopniu, co o sam sprzęt.

Sankcje i embarga: skuteczność w wojnie o chipy

Historia kosmicznych zastosowań chipów zaczyna się w chwili, gdy program Apollo zaryzykował użycie krzemowej nowości w miejscu, gdzie margines błędu był mniejszy niż tolerancje polerowania luster teleskopowych. Mózgiem tej operacji był Apollo Guidance Computer (AGC), pokładowy komputer nawigacyjny, który stał się pierwszym systemem opartym w całości na układach scalonych. Zaprojektowany w MIT Instrumentation Laboratory i produkowany przez Raytheona, korzystał z tysięcy prostych bramek logicznych Fairchilda. Sama decyzja o „pójściu w krzem” wymusiła cywilizacyjny skok w całym łańcuchu dostaw, od niezawodności elementów po dyscyplinę montażu. AGC miał własny interfejs DSKY, czyli numeryczną konsolę, na której astronauci wywoływali funkcje za pomocą „czasowników” i „rzeczowników”, zanim te nazwy upowszechniły się w informatyce. To nie był tylko fakt technologiczny; to było instytucjonalne ryzyko, które ucywilizowało rynek IC, ponieważ NASA musiała wymusić na dostawcach standaryzację i stałość parametrów. Jak ujął to historyk techniki Paul Ceruzzi, „wiemy, że systemy naprowadzania Minutemana i Apolla były wczesnymi adopcjami krzemowych układów scalonych”. A w kosmosie taki „wczesny adopcjonizm” bywa różnicą między sukcesem a katastrofą.

Równolegle rodził się satelitarny aparat nerwowy Zimnej Wojny. Amerykański program CORONA, obejmujący pierwsze operacyjne satelity rozpoznawcze, przeobraził misję wywiadowczą w systematyczną czynność przemysłową. Na orbicie kamera Itek/Perkin-Elmer fotografowała ZSRR, Chiny i inne cele, a kapsuły z filmem chwytano w locie, niczym bezcenne depesze zrzucone z maszyny obliczeniowej na niebie. Początkowo elektronika była mieszanką rozwiązań lampowych i tranzystorowych, z czasem jednak komputerowej „tkanki łącznej” systematycznie przybywało. W konsekwencji to nie jeden czip „wygrał

zimną wojnę”, lecz stopniowa integracja czujników, telemetrii i obróbki danych. Był to zalążek tego, co dziś nazwalibyśmy łańcuchem danych, zasilanym układami o rosnącej gęstości tranzystorów. „Program CORONA powstał, by wypełnić wywiadowczą pustkę” — pisze lakonicznie NRO. Ironią losu jest, że tę pustkę wypełniła nie tylko informacja, lecz także potężny popyt na powtarzalność i niezawodność mikroelektroniki.

Chipy w kosmosie: od Apollo do satelitów szpiegowskich

W kolejnych dekadach kosmos wymusił ewolucję własnej, specyficznej „biologii” chipów. W środowisku wysokiego promieniowania i próżni narodziła się koncepcja rad-hard, czyli układów utwardzanych radiacyjnie, zaprojektowanych i wytworzonych tak, by znosić zjawiska takie jak całkowita dawka jonizująca (TID) czy pojedyncze, destrukcyjne zdarzenia SEU/SEL. Słynny procesor RAD750 firmy BAE Systems, potomek rodziny PowerPC, stał się koniem roboczym niezliczonych sond i satelitów od połowy lat 2000. Jest znacznie wolniejszy od swoich konsumenckich kuzynów, ale pozostaje niewzruszony tam, gdzie uszkodzenie pojedynczego bitu oznacza utratę całej misji, a nie tylko restart aplikacji. Równolegle jednak narodziła się przeciwstawna filozofia COTS, czyli wykorzystanie komponentów komercyjnych prosto z półki sklepowej. Zamiast drogich, opancerzonych układów rad-hard, postawiono na masowe komponenty chronione inteligentną redundancją, kodami korekcji błędów, resetującymi watchdogami i fizycznymi tarczami. W erze „Nowej Przestrzeni”, w konstelacjach na niskiej orbicie okołoziemskiej i satelitach o krótszym cyklu życia, to podejście bywa opłacalne. Kiedy jednak promieniowanie „przytnie” żywotność orbity lub burza geomagnetyczna zdziesiątkuje konstelację, rachunek ryzyka wraca jak bumerang.

Warto tu wtrącić małą, kulturową dyskusję techniczną. Amerykański kosmos rynkowy znacznie częściej akceptuje filozofię „taniej i częściej, z redundancją”, podczas gdy europejskie i japońskie programy badawcze historycznie preferowały wyższą kwalifikację sprzętu i dłuższe, bardziej rygorystyczne testy środowiskowe. Chińska szkoła kosmiczna, zwłaszcza w programach państwowych, skłania się ku żmudnemu testowaniu naziemnemu i powolnej iteracji kwalifikacyjnej, choć tamtejszy sektor prywatny coraz śmielej naśladuje zuchwałość podejścia COTS. Różnice te nie są jednak kwestią ideologii. To po prostu odmienne rachunki ryzyka i inaczej zdefiniowany poziom odpowiedzialności publicznej.

Chipy w kosmosie: dylemat rad-hard vs. COTS

Początkowo triumf krzemu nad stalą był kwestią czysto praktyczną. Z perspektywy wojskowej układ scalony pojawił się jako zbawienie od logistycznego koszmaru, jakim były zawodne i prądożerne lampy próżniowe.

Przełom nastąpił wraz z programem rakiet balistycznych Minuteman II, gdy Texas Instruments zdobyło kontrakt na wyspecjalizowane chipy dla systemu naprowadzania. W połowie lat sześćdziesiątych Minuteman stał się największym pojedynczym konsumentem układów scalonych, deklasując nawet program Apollo i ostatecznie przenosząc krzem z kategorii inżynierskiego gadżetu do rangi kluczowego komponentu przemysłowego. To podręcznikowy przykład, jak popyt wojskowy internalizuje gigantyczne koszty badań i wdrożeń, aby na końcu cywilny rynek otrzymał tańszy i doskonalszy produkt. Suchy zapis z muzeum historii komputerów, mówiący o kontrakcie na 13 układów w 1962 roku, brzmi jak fragment z podręcznika ekonomii, lecz jego konsekwencje rezonują do dziś.

Gdy opanowano miniaturyzację, nadeszła era precyzji napędzanej przez czujniki i algorytmy. Prawdziwa broń inteligentna narodziła się w Wietnamie, a program Paveway – zestaw do konwersji bomb grawitacyjnych w broń naprowadzaną laserowo – powstał, mówiąc wprost, na budżetowej sznurówce. Jego siłą była jednak inżynierska prostota i skuteczność. Bojowy debiut w 1968 roku i zniszczenie legendarnego mostu „Smocza Paszcza” to nie tylko anegdota, lecz twarda statystyka. Skala trafień, nieosiągalna dla bomb niekierowanych, stała się taktyczną normą. Jak pisali później analitycy, bomby naprowadzane laserowo zmieniły wojnę powietrzną na zawsze. Inżynier z Texas Instruments pokazał, że prosta fotodioda i garść tranzystorów potrafią zamienić bezwładną, stalową grawitację w matematyczną pewność. W latach dziewięćdziesiątych tę narrację podchwyciły pociski Tomahawk, latające „mózgi” wyposażone w systemy TERCOM, czyli mechanizm porównywania profilu terenu z cyfrową mapą, oraz DSMAC, który korelował obraz terenu z zapisanymi w pamięci zdjęciami. To była już klasyczna fuzja danych, algorytmiczny zwiad wewnątrz samego pocisku. Techniczna definicja brzmi sucho, ale jej operacyjne znaczenie jest fundamentalne: chipy pozwalają trafić we właściwy budynek w labiryncie wrogiego miasta.

W szerszej, strategicznej perspektywie, Stany Zjednoczone w latach 70. i 90. zbudowały doktrynę znaną jako „offset strategy”. Jej celem było zrównoważenie przytłaczającej przewagi liczebnej Układu Warszawskiego własną technologią: precyzją, niewykrywalnością, zwiadem i potęgą obliczeniową. Taktyczne zwycięstwa broni precyzyjnej stały się medialnymi symbolami, lecz offset był logiką systemową, obejmującą wszystko, od satelitów GPS, przez chipy w systemach nawigacji, po komputery pokładowe. Wizjonerzy tacy jak Bill Perry i Andrew Marshall rozumieli, że krzem nie jest zwykłym komponentem. Jest mnożnikiem siły, który potęguje zdolności całych sił zbrojnych. Dziś używamy skrótów myślowych w rodzaju „AI w systemach rozpoznania i dowodzenia”, ale ich sens pozostaje ten sam: rosnąca moc obliczeniowa na krawędzi pola walki pozwala podejmować decyzje szybciej, na podstawie lepszych danych i w pełnej synchronizacji. Nic dziwnego, że w XXI wieku oficerowie zaczęli mówić o mocy obliczeniowej jako nowej mierze siły militarnej.

Wreszcie nadszedł ostatni etap ewolucji: autonomia. W drugiej dekadzie XXI wieku agencja DARPA uruchomiła program ACTUV, którego owocem był Sea Hunter – bezzałogowy okręt zaprojektowany do

wielomiesięcznego tropienia cichych okrętów podwodnych. To nie jest zdalnie sterowany dron, lecz pływający proces decyzyjny, w którym sensory, algorytmy i układy sterowania tworzą zamkniętą, autonomiczną pętlę. Równolegle na oceanach pojawiły się Saildrone’y, zrodzone z potrzeb klimatologii, lecz szybko zaadaptowane przez służby bezpieczeństwa morskiego. Pływają miesiącami, napędzane wiatrem i słońcem, a ich „krzemowe żagle” zbierają terabajty danych mielonych później przez klastry sztucznej inteligencji. To nie jest branżowy żart. To fundamentalna zmiana w ekonomii projekcji siły. Zamiast wysyłać wartą miliardy fregatę, wysyłasz flotyllę tanich, inteligentnych sensorów. Chip nie tylko zwiększa istniejące zdolności; on całkowicie przekształca rachunek koszt-efekt, otwierając pole gry dla nowych aktorów i zmuszając starych do nauki nowych reguł.

> To nie jest branżowy żart. To fundamentalna zmiana w ekonomii projekcji siły. Zamiast wysyłać wartą miliardy fregatę, wysyłasz flotyllę tanich, inteligentnych sensorów. Chip nie tylko zwiększa istniejące zdolności; on całkowicie przekształca rachunek koszt-efekt, otwierając pole gry dla nowych aktorów i zmuszając starych do nauki nowych reguł.

Inspiracje

[1] **Christopher Miller**

APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: 5525f10c-d47b-4fb9-a5f9-1c706527be89