

Technologia kwantowa jako determinanta suwerenności technologicznej i cyberbezpieczeństwa Unii Europejskiej

Quantum technology as a determinant of technological sovereignty
and cybersecurity of the European Union

MARCELI HĄŻŁA

Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu

 <https://orcid.org/0000-0003-0681-5668>

Abstrakt

W ostatnich dekadach można zaobserwować stopniową technologiczną marginalizację Europy, polegającą m.in. na uzależnieniu od importu zaawansowanych technologicznie mikrochipów ze Stanów Zjednoczonych i Tajwanu. Planowane inwestycje w rozwój i produkcję półprzewodników w krajach członkowskich UE najprawdopodobniej nie spowodują, że Europa dorówna w tym zakresie USA i Chinom. Rozwiązaniem tego problemu może się okazać technologia kwantowa, której wykorzystanie w gospodarce jest we wszystkich światowych ośrodkach w początkowej fazie. Wydajność obliczeń kwantowych przewyższa algorytmy stosowane w technologii krzemowej o kilkadziesiąt rzędów wielkości. To oznacza, że dostęp do technologii kwantowej stanie się w nadchodzących latach podstawową determinantą bezpieczeństwa. Celem artykułu jest przedstawienie zagadnienia technologii kwantowej i jej najważniejszych implikacji w kontekście suwerenności technologicznej Unii Europejskiej.

Słowa kluczowe technologia kwantowa, mikrochipy, Unia Europejska, cyberbezpieczeństwo, suwerenność technologiczna

Abstract

Over the past decades, a gradual technological marginalisation of Europe could be observed, as it became dependent on imports of advanced microchips from the United States and Taiwan. However, despite planned investments in the development and production of semiconductors in the EU Member States, Europe is still unlikely to be able to compete with the United States and China in this area. The solution to this problem may lie within quantum technology, the economic use of which is in the initial phase in all world centres. The performance of quantum computing surpasses algorithms used in silicon technology by several tens of orders of magnitude. This means that access to quantum technology will become a basic determinant of security in the coming years. The aim of this paper is to present the issue of quantum technology and its most important implications in the context of the technological sovereignty of the European Union.

Keywords

quantum technology, microchips, European Union, cybersecurity, technological sovereignty

Wprowadzenie

W trzeciej dekadzie XXI w. znaczna część uwagi opinii publicznej skupiła się na rozwoju sztucznej inteligencji (ang. *artificial intelligence*, AI) i jej możliwym wpływie na gospodarkę, społeczeństwa i państwa narodowe¹. W ciągu ostatnich kilkunastu lat liczba obliczeń wykorzystywanych do szkolenia wiodących systemów sztucznej inteligencji wzrosła 350 mln razy², co przełamało wcześniejsze ograniczenia i umożliwiło powstanie modeli takich jak ChatGPT, DALL-E czy DeepSeek. Jednak to nowa technologia kwantowa³, która będzie oferować poziom złożoności obliczeń

¹ K. Rybiński, J. Królewski, *Algokracja. Jak i dlaczego sztuczna inteligencja zmienia wszystko?*, Warszawa 2023, s. 11–23.

² L. Heim i in., *Computing Power and the Governance of AI*, Centre for the Governance of AI, 14 II 2024 r., <https://www.governance.ai/analysis/computing-power-and-the-governance-of-ai> [dostęp: 30 III 2025].

³ Na potrzeby artykułu technologia kwantowa jest nazywana nową technologią. Takie podejście wynika z najnowszych osiągnięć technicznych. Dopiero od drugiej dekady XXI w. stało się bowiem możliwe komercyjne zastosowanie technologii kwantowej w algorytmach obliczeniowych, które są główną osią dalszych analiz. Należy pamiętać, że mechanika kwantowa jest tematem poruszonym w fizyce teoretycznej już od końca XIX w., a o potencjale wykorzystania algorytmów kwantowych

nieosiągalny za pomocą stosowanych do tej pory procesorów krzemowych, może całkowicie zmienić paradygmaty rozwoju technologicznego⁴.

Oznacza to, że dostęp do technologii kwantowej stanie się w nadchodzących latach jedną z podstawowych determinant bezpieczeństwa narodowego. Komputery kwantowe z jednej strony spowodują, że dotychczasowe metody kryptograficzne staną się przestarzałe i nie będą zapewniały poufności danych. Z drugiej strony, przyczynią się do gwałtownego wzrostu produktywności gospodarek przez wyniesienie jakości zarządzania łańcuchami dostaw, portfelami inwestycyjnymi czy procesami projektowania na niespotykany dotychczas poziom⁵.

Celem artykułu jest przedstawienie zagadnienia technologii kwantowej i jej najważniejszych implikacji w kontekście suwerenności technologicznej Unii Europejskiej. Artykuł podzielono na trzy części. W pierwszej są rozważane geopolityczne i gospodarcze uwarunkowania rynku mikrochipów krzemowych. W drugiej porównano możliwości obliczeniowe technologii krzemowej i technologii kwantowej oraz opisano najważniejsze możliwości zastosowania i ograniczenia tej drugiej technologii. W trzeciej części przedstawiono zagadnienie rozwoju technologii kwantowej w kontekście suwerenności technologicznej UE.

W publikacji zastosowano analizę literatury przedmiotu, analizę danych statystycznych oraz rozumowanie dedukcyjne. Ze względu na charakter analizowanych zagadnień w artykule wykorzystano także liczne źródła internetowe.

Geopolityczne i gospodarcze uwarunkowania rynku mikrochipów krzemowych

Obecnie mikrochipy krzemowe są używane niemalże w każdym sprzęcie elektronicznym – od kart kredytowych przez sprzęty gospodarstwa domowego po samochody⁶. To sprawia, że znaczenie mikrochipów dla światowej gospodarki dalece

po raz pierwszy wspomniał w 1982 r. Richard Feynman. Prototypy komputerów kwantowych powstały jednak na przełomie pierwszej i drugiej dekady XXI w., a rządowych i prywatnych inwestycji umożliwiających dynamiczny rozwój technologii kwantowych zaczęto dokonywać dopiero w trzeciej dekadzie XXI w. Zob. L. Chen, *A Brief History of Quantum Computing*, Medium. Quantumpedia, 2 IV 2023 r., <https://quantumpedia.uk/a-brief-history-of-quantum-computing-e0bbd05893d0> [dostęp: 30 III 2025].

⁴ C. Chou, J. Manyika, H. Neven, *The Race to Lead the Quantum Future. How the Next Computing Revolution Will Transform the Global Economy and Upend National Security*, „Foreign Affairs” 2025, t. 104, nr 1, s. 154–167.

⁵ Tamże.

⁶ S. Dover, *The vital role of microchips on the global economy*, California 2023, s. 1–2.

wykracza poza udział ich rynku w światowym PKB (ok. 0,5%) – ta technologia napędza bowiem towary i procesy o wartości bilionów dolarów. Przykładowo, choć w obliczu pandemii w 2020 r. światowe PKB spadło o 3,5%, to w związku z przenoszeniem coraz większej liczby procesów do świata cyfrowego popyt na mikrochipy wzrósł o kilkanaście procent, a ich ceny nawet o kilkadziesiąt procent⁷.

Ten stan jest jednak efektem przemian sięgających kilkadziesiąt lat wstecz. Pierwsze zakłady produkujące mikrochipy powstały w latach 50. XX w.⁸ Przez następne dekady światowa gospodarka znajdowała się pod silnym wpływem Stanów Zjednoczonych, które przyjęły rolę technologicznego lidera i kształtowały łańcuchy wartości (ang. *value chain*)⁹ w konkurencji międzynarodowej. W wyniku czynników gospodarczych (outsourcing procesów produkcyjnych i minimalizacja kosztów przez amerykańskie firmy) i politycznych (wspieranie przez amerykański rząd władz Republiki Chińskiej, które po wojnie domowej i przejściu władzy przez komunistów w kontynentalnej części Chin ewakuowały się w 1949 r. na wyspę Tajwan) jednym z głównych światowych ośrodków produkujących mikrochipy stał się Tajwan. Duże znaczenie Tajwanu w branży półprzewodników utrzymywało się przez dziesięciolecia, jeszcze w 2019 r. udział wyspy w całkowitej produkcji mikrochipów wynosił 20%, a w przypadku najbardziej zaawansowanych chipów sięgał nawet 92% (tabela 1). Zaczęło się to zmieniać w drugiej dekadzie XXI w. wraz ze zmianą sytuacji geopolitycznej.

Pandemia COVID-19, wojna w Ukrainie, wojna w Palestynie i powrót Donalda Trumpa do Białego Domu przyspieszyły trendy reshoringu, nearshoringu i friendshoringu¹⁰, w wyniku których gospodarka światowa przestała być tak silnie zglobalizowana, jak to było na przełomie XX i XXI w. W konsekwencji główne ośrodki gospodarcze świata, takie jak USA, Chińska Republika Ludowa i UE, dążą do uniezależnienia swoich łańcuchów wartości od ryzyka geopolitycznego. Można to zaobserwować

⁷ Spowodowało to globalny niedobór mikrochipów. Zob. W. Mohammad, A. Elomri, L. Kerbach, *The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies*, „IFAC-Papers-OnLine” 2022, t. 55, nr 10, s. 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>.

⁸ C. Miller, *Chip War. The Fight for the World's Most Critical Technology*, London 2022, s. 19–28.

⁹ Podczas zimnej wojny Związek Radziecki co prawda był postrzegany jako główny gospodarczy przeciwnik Stanów Zjednoczonych, jednak w rzeczywistości radzieccy naukowcy w dużej mierze kopowali amerykańskie rozwiązania. Zob. tamże, s. 41–44.

¹⁰ *Reshoring* to proces, w którym przedsiębiorstwa wracają z produkcją do swojego ojczystego kraju. *Nearshoring* to sytuacja, gdy firma przenosi swój łańcuch dostaw lub produkcję do pobliskiego kraju. *Friendshoring* to strategia łańcucha dostaw, w ramach której przedsiębiorstwa pozyskują lub produkują towary w krajach o wspólnych wartościach. Zob. B. Thompson, *What is Friendshoring, Nearshoring, Reshoring and Offshoring*, IncoDocs, 26 III 2024 r., <https://incodocs.com/blog/friendshoring-nearshoring-reshoring-offshoring/> [dostęp: 30 III 2025].

na przykładzie rynku mikrochipów¹¹. W latach 2022–2024 Stany Zjednoczone zapowiedziały, że zainwestują w produkcję mikrochipów 450 mld dolarów¹², Chiny planują wydać łącznie niemal 100 mld dolarów¹³, a UE w ramach tzw. European Chips Act ogłosiła inwestycje do 2030 r. w wysokości 43 mld dolarów¹⁴.

Wkład krajów członkowskich UE w światową produkcję mikrochipów wynosi jedynie 10%¹⁵, tymczasem Komisja Europejska szacuje, że poziom zapotrzebowania na ten produkt jest zbliżony do 20%. Na podstawie inwestycji planowanych przez głównych graczy na arenie międzynarodowej przewiduje się, że ten udział się nie zmieni (tabela 1), czyli Europa nie osiągnie niezależności w sektorze mikrochipów. W latach 2019–2032 produkcja półprzewodników przeniesie się z Tajwanu, ale głównie do USA (które planują specjalizować się w mikrochipach najnowszych generacji, < 10 nm) i Chin (które będą specjalizować się w mikrochipach średnich i starszych generacji, > 10 nm). Unia Europejska przejmie najprawdopodobniej jedynie część produkcji wyspecjalizowanych mikrochipów na własne potrzeby, np. w sektorze medycznym czy sprzętach AGD.

Tabela 1. Udział poszczególnych państw (grup państw) w światowej produkcji mikrochipów z podziałem na ich rodzaje w latach 2019 i 2022 oraz prognoza tego udziału na rok 2032 opracowana na podstawie inwestycji w produkcję półprzewodników zapowiedzianych przez poszczególne państwa.

Państwo/ grupa państw	Rok	Układy pamięciowe	Układy logiczne < 10 nm	Układy logiczne 10–22 nm	Układy logiczne > 28 nm	Pozostałe (wyspecjalizowane)	Ogólnie
USA	2019	5%	0%	43%	8%	19%	13%
	2022	3%	0%	28%	8%	14%	10%
	2032	9%	28%	20%	10%	18%	14%
Chiny	2019	14%	0%	3%	21%	17%	16%
	2022	18%	0%	6%	33%	25%	24%
	2032	13%	2%	19%	37%	27%	21%

¹¹ Artykuł został ukończony w marcu 2025 r., prezentowane w nim dane mogły ulec zmianie.

¹² *2024 State of the U.S. Semiconductor Industry*, https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2024/10/SIA_2024_State-of-Industry-Report.pdf, s. 4 [dostęp: 30 III 2025].

¹³ *China sets up third fund with \$47.5 bln to boost semiconductor sector*, Reuters, 27 V 2024 r., <https://www.reuters.com/technology/china-sets-up-475-bln-state-fund-boost-semiconductor-industry-2024-05-27/> [dostęp: 30 III 2025].

¹⁴ *European Chips Act*, European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en [dostęp: 1 X 2025].

¹⁵ Tamże.

Państwo/ grupa państw	Rok	Układy pamięciowe	Układy logiczne < 10 nm	Układy logiczne 10–22 nm	Układy logiczne > 28 nm	Pozostałe (wyspecjalizowane)	Ogólnie
Tajwan	2019	11%	92%	28%	40%	3%	20%
	2022	20%	69%	40%	30%	5%	18%
	2032	17%	47%	29%	25%	4%	17%
Korea Płd.	2019	44%	8%	5%	8%	5%	19%
	2022	52%	31%	4%	5%	7%	17%
	2032	57%	9%	6%	5%	5%	19%
Japonia	2019	20%	0%	0%	10%	27%	17%
	2022	7%	0%	0%	10%	25%	17%
	2032	4%	5%	6%	10%	21%	15%
UE	2019	0%	0%	12%	5%	22%	8%
	2022	0%	0%	13%	4%	17%	8%
	2032	0%	6%	14%	3%	19%	8%
Pozostałe	2019	6%	0%	9%	10%	7%	7%
	2022	0%	0%	8%	9%	9%	7%
	2032	0%	3%	6%	9%	7%	5%

Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. Varas i in., *Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era*, <https://web-assets.bcg.com/9d/64/367c63094411b6e9e1407bec0dcc/bcgxia-strengthening-the-global-semiconductor-value-chain-april-2021.pdf>, s. 35 [dostęp: 30 III 2025]; R. Varadarajan i in., *Emerging Resilience in the Semiconductor Supply Chain*, <https://web-assets.bcg.com/25/6e/7a123efd40199020ed1b4114be84/emerging-resilience-in-the-semiconductor-supply-chain-r.pdf>, s. 14 [dostęp: 30 III 2025].

Słabość UE w tej dziedzinie zaczęły wykorzystywać Stany Zjednoczone, które w styczniu 2025 r. ograniczyły eksport mikrochipów. Decyzję o wprowadzeniu restrykcji oficjalnie uzasadniono chęcią powstrzymania ambicji Chin dotyczących hegemonii technologicznej¹⁶. Plan ogłoszony przez Biały Dom zakładał nielimitowany eksport półprzewodników jedynie do wybranych krajów, na większość nakładał limity wynoszące 50 000 jednostek GPU rocznie, a na państwa wrogie USA – całkowity zakaz eksportu. Podzielenie UE „technologiczną żelazną kurtyną”

¹⁶ *US announces new restrictions on AI chip exports*, The Economic Times, 14 I 2025 r., <https://economictimes.indiatimes.com/tech/artificial-intelligence/us-announces-new-restrictions-on-ai-chip-exports/articleshow/117219486.cms?from=mdr> [dostęp: 30 III 2025].

wywołało zdumienie w Europie. Niektóre kraje UE (w tym Polska) zostały bowiem wyłączone z grona amerykańskich sojuszników¹⁷. To wszystko przyczyniło się do dyskusji o konieczności technologicznego uniezależnienia się UE od Stanów Zjednoczonych, które po kilkudziesięciu latach bliskiego sojuszu próbują prowadzić politykę coraz mniej zbieżną z potrzebami europejskich partnerów¹⁸.

Sytuację UE komplikuje fakt, że w przeciwieństwie do Stanów Zjednoczonych i Chin nie ma ona na swoim terytorium złóż metali ziem rzadkich, które są niezbędne do produkcji półprzewodników. Pewnym rozwiązaniem byłaby współpraca z Ukrainą, która dysponuje złożami o wartości szacowanej od dwóch do nawet kilkunastu bilionów dolarów¹⁹. Przedłużająca się wojna oraz rosyjska okupacja wschodniej części kraju, gdzie znajduje się większość złóż, ograniczają jednak możliwości ich eksploatacji²⁰. To powoduje, że szanse UE na osiągnięcie suwerenności technologicznej w zakresie mikrochipów są niewielkie.

Porównanie możliwości technologii kwantowej i technologii krzemowej

Sytuacja na światowym rynku mikrochipów nie jest optymistyczna dla Europy. Światelkiem w tunelu dla jej suwerenności technologicznej może się okazać technologia kwantowa. Choć pierwsze pomysły dotyczące obliczeń kwantowych

¹⁷ Regulacja *Framework for Artificial Intelligence Diffusion* spowodowała duży sprzeciw wielu krajów, w tym Polski. W maju 2025 r. (a więc już po zamknięciu artykułu) Stany Zjednoczone wycofały się z tych przepisów (przyj. red.).

¹⁸ I. Murphy, M. Hążła, *Chipping Away a Long-Standing Alliance: The Impact of Tech Restriction Communications on US-Polish Relations*, Small Wars Journal, 27 III 2025 r., <https://smallwarsjournal.com/2025/03/27/chipping-away-a-long-standing-alliance-the-impact-of-tech-restriction-communications-on-us-polish-relations/> [dostęp: 30 III 2025].

¹⁹ R. Muggah, V. Dryganov, *Russia's Resource Grab in Ukraine*, Foreign Policy, 28 IV 2022 r., <https://foreignpolicy.com/2022/04/28/ukraine-war-russia-resources-energy-oil-gas-commodities-agriculture/> [dostęp: 30 III 2025]; G. McKenna, *Trump wants half of Ukraine's estimated \$11.5 trillion in rare earth minerals. Is a deal even possible?*, Fortune, 19 II 2025 r., <https://fortune.com/2025/02/19/trump-ukraine-rare-earth-minerals/> [dostęp: 1 X 2025]; B. Aris, *Ukraine doesn't have any rare earth metals, and the strategic minerals it does have are not worth trillions of dollars*, bne IntelliNews, 23 II 2025 r., <https://www.intellinews.com/ukraine-doesn-t-have-any-rare-earth-metals-and-the-strategic-minerals-it-does-have-are-not-worth-trillions-of-dollars-368472/> [dostęp: 1 X 2025].

²⁰ M. Hążła, *Zasobowy wymiar wojny w Ukrainie oraz perspektywy rozwojowe po jej zakończeniu, w: Perspektywy i wyzwania Europy*, J. Higgins, A. Moskal, M. Tomala (red.), Poznań 2024, s. 82–96.

pojawiły się już w latach 80. XX w., to dopiero w drugiej dekadzie XXI w. postęp technologiczny umożliwił realizację tych idei²¹.

W mikrochipach opartych na technologii krzemowej przyrost mocy obliczeniowej zależy przede wszystkim od liczby tranzystorów, które operują na wartościach 0 i 1, reprezentujących bity²². Tymczasem kubity, czyli kwantowy odpowiednik bitów, mogą przyjmować dowolny stan między 0 a 1²³, a nawet kilka stanów jednocześnie w ramach tzw. superpozycji. Cechy te zwiększają możliwości obliczeniowe o kilkadziesiąt rzędów wielkości i umożliwiają rozwiązywanie wielu obliczeń jednocześnie, co deklasuje technologię krzemową²⁴. Przykładowo rozwiązanie problemu przy użyciu komputera kwantowego jest możliwe w ciągu jednego dnia, a przy wykorzystaniu superkomputera krzemowego zajęłoby to więcej czasu niż minęło od Wielkiego Wybuchu (rysunek 1).

Komputery kwantowe mogą znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach wymagających skomplikowanych obliczeń²⁵, związanych m.in. z opracowywaniem leków, tworzeniem nowych syntetycznych materiałów, zarządzaniem łańcuchami dostaw i portfelem inwestycyjnym, uczeniem maszynowym czy kryptografią²⁶. Przewidywana wartość rynku technologii kwantowych na 2040 r. wynosi ponad 100 mld dolarów²⁷. Kwota ta może być znacznie wyższa, ponieważ obecne prognozy skupiają się na inwestycjach publicznych i nie uwzględniają sektora prywatnego. Oprócz tego, biorąc pod uwagę wzrost produktywności branż, które będą w stanie wykorzystać technologię kwantową, jej całkowity wpływ na gospodarkę znacznie przekroczy – podobnie jak w przypadku rynku mikrochipów – jej udział w PKB.

²¹ C. Chou, J. Manyika, H. Neven, *The Race to Lead the Quantum Future...*

²² Zmniejszenie tranzystorów i odległości między nimi pozwala na miniaturyzację mikrochipów. Generacja chipów 2 nm oznacza, że między poszczególnymi tranzystorami są jedynie 2 nm przerwy.

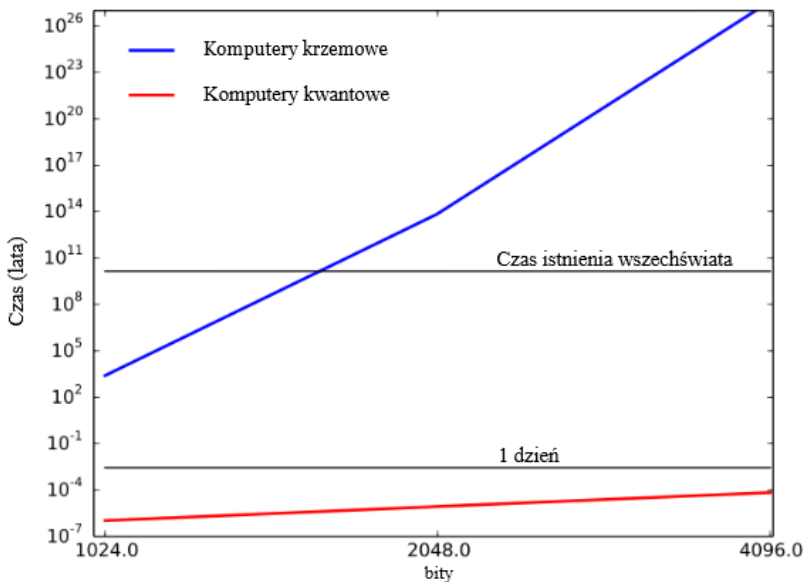
²³ M. Pisarski, *Jak komputery kwantowe mogą zmienić naszą rzeczywistość?*, Ernst&Young, 10 II 2023 r., https://www.ey.com/pl_pl/insights/digital-first/jak-komputery-quantowe-moga-zmienicnasza-rzeczywistosc [dostęp: 25 IX 2025].

²⁴ J. Amundson, E. Sexton-Kennedy, *Quantum Computing*, „The European Physical Journal Web of Conferences” 2019, nr 214, s. 2. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921409010>.

²⁵ M. Brooks, *Quantum computers: what are they good for?*, „Nature” 2023, nr 617, s. S1–S3. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-01692-9>.

²⁶ M. Pisarski, *Jak komputery kwantowe...*; M. Brooks, *Towards quantum machine learning*, Nature, 24 V 2023 r., <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01718-2> [dostęp: 30 III 2025].

²⁷ *Quantum Technology Monitor*, <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf>, s. 4 [dostęp: 30 III 2025].



Rysunek 1. Czas w latach potrzebny na sfaktoryzowanie liczby o wielkości $2^{\text{bitów}}$ przy użyciu komputera krzemowego i komputera kwantowego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: J. Amundson, E. Sexton-Kennedy, *Quantum Computing*, „The European Physical Journal Web of Conferences” 2019, nr 214, s. 3. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921409010>.

Cyberbezpieczeństwo stanowi obszar szczególnego zainteresowania decydentów politycznych na całym świecie. Popularyzacja komputerów kwantowych wiąże się z nadejściem tzw. dnia Q (ang. *Q-Day*), w którym komputery kwantowe będą w stanie złamać dowolne klasyczne szyfrowanie²⁸. Implikacje tego wydarzenia będą doniosłe. Będzie to oznaczało, że państwa pozbawione dostępu do technologii kwantowej staną się podatne na ataki hakerów i służb specjalnych nieprzyjacielskich rządów, ponieważ wszystkie systemy zabezpieczeń będą mogły być złamane w kilka godzin. Jednocześnie wymusi to potężne inwestycje – zarówno rządowe, jak i prywatne – w nowe, kwantowe systemy zabezpieczeń we wszystkich branżach operujących na zaszyfrowanych informacjach, np. w sektorze bankowym czy teleinformatycznym.

Warto dodać, że komputery kwantowe najprawdopodobniej nie będą w stanie całkowicie wypierać komputerów krzemowych, co jest związane z ich fizycznymi

²⁸ *Quantum communication growth drivers: Cybersecurity and quantum computing*, McKinsey & Company, 21 II 2025 r., <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-communication-growth-drivers-cybersecurity-and-quantum-computing> [dostęp: 30 III 2025].

ograniczeniami. Po pierwsze, przechowywanie kubitów na nośnikach pamięci powoduje występowanie błędów w zawartych na nich informacjach kwantowych, co ogranicza możliwości replikacji danych. Po drugie, wraz ze wzrostem liczby kubitów dodawanych do systemu wzrasta także ryzyko dekoherencji, czyli spadku spójności systemu, co wymusza ciągłe monitorowanie go. Po trzecie, do prawidłowego funkcjonowania komputerów kwantowych jest wymagane utrzymywanie ekstremalnie niskich temperatur, a to ogranicza ich potencjał do przemysłowego wykorzystania. Bariere stanowią również możliwości zatrudnienia specjalistów, ponieważ w większości szkół wyższych wiedza w zakresie algorytmów kwantowych nie jest jeszcze uwzględniona w programach kształcenia²⁹.

Rzeczywistość technologii kwantowej jako determinanta suwerenności technologicznej UE

Fakt, że technologia kwantowa znajduje się obecnie na początku rozwoju, stanowi szansę dla UE, która startuje do tego kwantowego wyścigu na równi ze Stanami Zjednoczonymi i Chinami. Do tej pory całkowite światowe inwestycje w technologie kwantowe (rysunek 2) wyniosły ok. 42 mld dolarów³⁰, w tym 15,3 mld przeznaczyły Chiny (36,3%), 3,8 mld – USA (9,0%), 12,7 mld – kraje UE i Wielka Brytania³¹ łącznie (30,2%). Oznacza to, że UE ma szansę stać się, w przeciwieństwie do opisywanego wcześniej sektora mikrochipów, jednym z głównych graczy na wyłaniającym się rynku technologii kwantowych³².

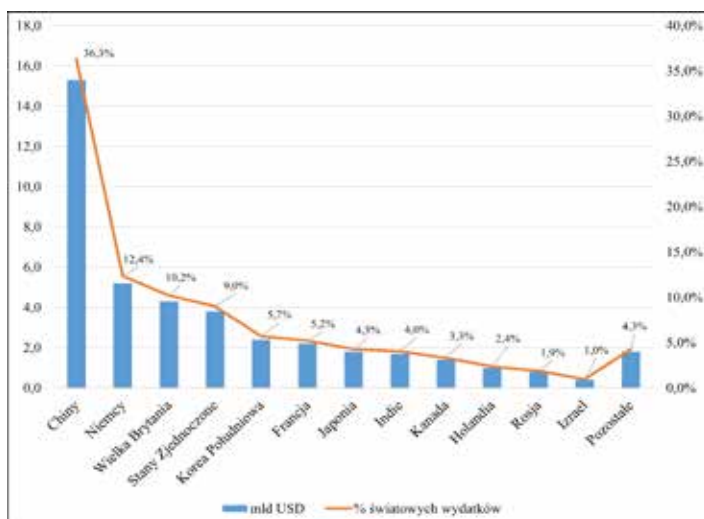
²⁹ N.B.S. Vijay Kumar i in., *An Investigation on “Unlocking the Potential: Advances and Challenges in Quantum Computing”*, „International Journal for Modern Trends in Science and Technology” 2023, t. 9, nr 11, s. 63–70. <https://doi.org/10.46501/IJMTST0911013>.

³⁰ Są to dane z 2023 r. W informacjach prasowych z marca 2025 r. dotyczących ogłoszonych inwestycji w technologie kwantowe na całym świecie pojawiła się już kwota 44 mld dolarów. Zob. *Quantum Initiatives Worldwide 2025*, Qureca, 25 III 2025 r., <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/> [dostęp: 30 III 2025].

³¹ Wielka Brytania, mimo brexitu z 2020 r., pozostaje ważnym graczem w europejskim układzie sił. Jej proukraińska postawa w kontekście wojny z Rosją oraz liczne sygnały dotyczące konieczności ponownego zacieśnienia relacji gospodarczych z UE pozwalają domniemywać, że Brytyjczycy będą istotnymi partnerami w odbudowie europejskiej architektury bezpieczeństwa. Zob. *Collection. Strengthening ties with Europe*, Gov.uk, 4 III 2025 r., <https://www.gov.uk/government/collections/the-uks-reset-with-europe> [dostęp: 30 III 2025].

³² Podobnie jak w przypadku produkcji mikrochipów budowa komputerów kwantowych wymaga dostępu – choć w mniejszej ilości – do surowców takich jak metale ziem rzadkich, lit, kobalt, nikiel czy aluminium. Zob. *Google’s ground-breaking quantum chip needs critical minerals*, The Oregon Group, 10 XII 2024 r., <https://theorengroup.com/energy-transition/technology/googles-ground-breaking-quantum-chip-needs-critical-minerals/> [dostęp: 30 III 2025].

Kraje członkowskie UE wydają się tego świadome. Już w 2023 r. Komisja Europejska opracowała europejską deklarację w sprawie technologii kwantowych (ang. *European Declaration on Quantum Technologies*, w skrócie *Quantum Pact*), w której wyrażono zamiar opracowania pierwszych komputerów kwantowych w 2025 r. oraz osiągnięcia statusu światowego lidera w 2030 r. Dzięki temu Europa ma się stać światową doliną kwantową (ang. *quantum valley*)³³. Początkowo tą inicjatywą były zainteresowane głównie Niemcy, Francja, Dania, Holandia i Irlandia, których rządy najszybciej przyjęły narodowe strategie rozwoju technologii kwantowych³⁴. W marcu 2025 r. *Quantum Pact* podpisało już 26 krajów europejskich, w tym Polska.



Rysunek 2. Inwestycje w technologie kwantowe w miliardach dolarów oraz udział poszczególnych państw w światowych inwestycjach na tym rynku, dane z 2023 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Steady progress in approaching the quantum advantage*, McKinsey&Company, 24 IV 2024 r., <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/steady-progress-in-approaching-the-quantum-advantage#/> [dostęp: 30 III 2025].

³³ *European Declaration on Quantum Technologies*, European Commission, 6 XII 2023 r., <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies> [dostęp: 30 III 2025].

³⁴ H.Q. van Ufford, *From niche innovations to global powerhouse: An EU quantum strategy*, European Council on Foreign Relations, 20 XII 2024 r., <https://ecfr.eu/article/from-niche-innovations-to-global-powerhouse-an-eu-quantum-strategy/> [dostęp: 30 III 2025].

Warto wspomnieć o jeszcze jednej kwestii związanej z poziomem rozwoju technologicznego poszczególnych państw. Chodzi o występujące w ekonomii zjawisko przewagi z zapóźnienia. Polega ono na tym, że niektóre gospodarki są w stanie wykorzystać swój niższy poziom rozwoju jako atut – ponieważ nie są nastawione na pewne rozwiązania, łatwiej przechodzą do następnej fazy³⁵. Z tej prawidłowości korzystają Chiny, które celowo pomijają niektóre etapy rozwoju technologicznego, np. zamiast inwestować w samochody spalinowe, stały się światowym liderem rynku samochodów elektrycznych³⁶.

W podobnej sytuacji są kraje Europy Środkowo-Wschodniej, które do 1991 r. znajdowały się za polityczną żelazną kurtyną. Z powodu niższego poziomu rozwoju technologicznego po rozpadzie ZSRR były one w stanie „przeskoczyć” niektóre z gałęzi przemysłu i stać się europejskimi liderami technologii cyfrowych. Znajduje to odzwierciedlenie w ponadprzeciętnym udziale ich usług z zakresu technologii informatyczno-komunikacyjnych (ang. *information and communications technology*, ICT) w całkowitym eksporcie usług krajów UE i Inicjatywy Trójmorza³⁷ (rysunek 3). Dowodem na to jest uwzględnienie zarówno Polski, jak i Czech w pierwszej szóstce europejskich krajów (razem z Niemcami, Francją, Hiszpanią i Włochami), w których znajdują się komputery kwantowe³⁸. Sprzęt pozyskany w ramach europejskiej inicjatywy ma się pojawić w Poznaniu w 2025 r.³⁹ Niezależnie od tego konsorcjum Politechniki Warszawskiej, Wojskowej Akademii Technicznej oraz Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia pracuje nad polskim prototypem takiego komputera, dostosowanym do potrzeb wojska i służb specjalnych⁴⁰.

³⁵ M. Hązła, E. Mińska-Struzik, *How to assess economic progress in the era of discontinuity?*, „Global Policy” 2023, t. 14, nr 2, s. 331–348. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.13180>.

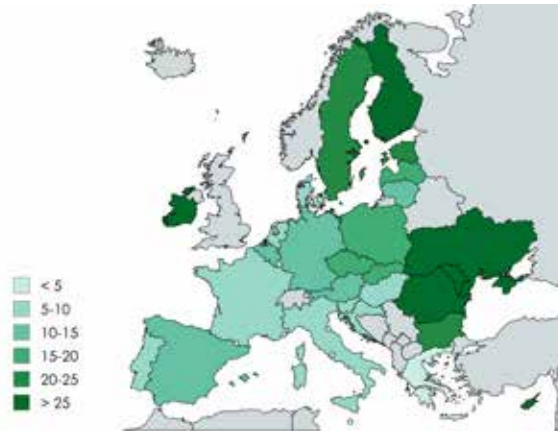
³⁶ D. Jolly, *The New Threat. China's Rapid Technological Transformation*, London 2022, s. 124.

³⁷ Jest to wskaźnik stopnia cyfryzacji społeczeństwa stosowany przez Organizację Narodów Zjednoczonych. Zob. *Digitally deliverable services boom risks leaving least developed countries behind*, United Nations Conference on Trade and Development, 28 IX 2023 r., <https://unctad.org/news/digitally-deliverable-services-boom-risks-leaving-least-developed-countries-behind> [dostęp: 30 III 2025].

³⁸ K. Kurowski, *Pierwsze komputery kwantowe w Polsce i Europie*, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, 15 VII 2024 r., <https://www.pcsc.pl/pierwsze-komputery-quantowe-w-polsce-i-europie/> [dostęp: 30 III 2025].

³⁹ M. Woźniak, *W Poznaniu powstanie pierwszy komputer kwantowy w Polsce! Minister cyfryzacji: „Dla kraju to epokowe wydarzenie”*, Głos Wielkopolski, 30 X 2024 r., <https://gloswielkopolski.pl/w-poznaniu-powstanie-pierwszy-komputer-quantowy-w-polsce-minister-cyfryzacji-dla-kraju-to-epokowe-wydarzenie/ar/c3p2-26938497> [dostęp: 30 III 2025].

⁴⁰ K. Nowak, *Polska buduje komputer kwantowy dla wojska. Prace są już zaawansowane*, Forsal, 22 I 2025 r., <https://forsal.pl/kraj/bezpieczenstwo/artykuly/9717653,polska-buduje-komputer-kwantowy-dla-wojska-prace-sa-juz-zaawansowane.html> [dostęp: 30 III 2025].



Rysunek 3. Procentowy udział usług ICT w całkowitym eksporcie usług krajów UE i Inicjatywy Trójmorza, dane z 2023 r.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: World Development Indicators, World Bank Group, <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> [dostęp: 29 III 2025].

W obliczu rosnącej dostępności komputerów kwantowych należy zwrócić uwagę również na możliwości wyszkolenia odpowiedniej liczby pracowników do operowania nimi. W Polsce jedynie Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu oferuje studia inżynierskie na kierunku informatyka kwantowa, które po raz pierwszy uruchomiono w roku akademickim 2025/2026⁴¹. Można postulować, aby podobne kierunki otwarto na Uniwersytecie Warszawskim i Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie, co przyczyniłoby się nie tylko do dywersyfikacji geograficznej kształcenia kadr, lecz także do ich ilościowego zwiększenia.

Wnioski

W przeciwieństwie do rynku mikrochipów krzemowych, na którym Europa jest uzależniona od importu ze Stanów Zjednoczonych i Tajwanu, wyłaniający się sektor technologii kwantowych stanowi tabula rasa. Daje to państwom członkowskim UE szansę na dołączenie do grona liderów technologii, która może mocno wpłynąć na cyberbezpieczeństwo oraz na wiele sektorów gospodarki.

Rozwój technologii kwantowych jest na wczesnym etapie, dlatego Europa może jeszcze zaplanować swoje strategie badawczo-rozwojowe. Ze względu

⁴¹ Informatyka kwantowa – informacje o kierunku, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, <https://rekrutacja.amu.edu.pl/kierunki-studiow/informatyka-quantowa,573> [dostęp: 19 V 2025].

na liczne możliwości zastosowania komputerów kwantowych pojawiają się opinie o konieczności jednoczesnego rozwoju kilku kwantowych klastrów, z których każdy miałby za zadanie współpracę z lokalnym ekosystemem naukowym, biznesowym i finansowym oraz uwzględniałby regionalne uwarunkowania⁴². Przykładowo wymienienia się klastrów francusko-niemiecko-holenderski, który mógłby się wyspecjalizować w rozwiązaniach komercyjnych⁴³.

Wydaje się, że w związku z trwającymi już pracami badawczo-rozwojowymi na potrzeby wojska, położeniem geograficznym oraz napiętą sytuacją geopolityczną Polska i Czechy mogłyby stanąć na czele klastra Europy Środkowo-Wschodniej specjalizującego się w cyberbezpieczeństwie. W przyszłości mogłyby dołączyć do tej grupy kraje bałtyckie, Bułgaria, Rumunia, a z czasem być może także Ukraina i Mołdawia, z uwagi na ich doświadczenia w zwalczaniu rosyjskich cyberataków⁴⁴. Wpisywałoby to się w priorytety polskiej prezydencji w Radzie UE z pierwszej połowy 2025 r., która koncentrowała się na zagadnieniach związanych z bezpieczeństwem⁴⁵. Jednocześnie byłoby to spójne z wyłaniającą się w ostatnich latach wizją Polski jako regionalnego lidera bezpieczeństwa⁴⁶. Polscy decydenci polityczni i dyplomaci powinni więc dłożyć starań w tym kierunku, gdyż taki rozwój sytuacji byłby korzystny dla Polski i całej UE.

Bibliografia

Amundson J., Sexton-Kennedy E., *Quantum Computing*, „The European Physical Journal Web of Conferences” 2019, nr 214, s. 1–6. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921409010>.

Brooks M., *Quantum computers: what are they good for?*, „Nature” 2023, nr 617, s. S1–S3. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-01692-9>.

⁴² *A quantum leap in finance. How to boost Europe's quantum technology industry*, https://www.eib.org/attachments/lucalli/20220112_a_quantum_leap_in_finance_en.pdf, s. 21–22 [dostęp: 30 III 2025].

⁴³ H.Q. van Ufford, *From niche innovations...*

⁴⁴ J. Osbourne, J. Jarnecki, *Battening Down the Hatches: Moldova's Cyber Defence*, The Royal United Services Institute, 10 VIII 2023 r., <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/battening-down-hatches-moldovas-cyber-defence> [dostęp: 30 III 2025].

⁴⁵ *Polish EU Presidency priority: strengthening European security and keeping Europe united*, 27 II 2025 r., European Economic and Social Committee, <https://www.eesc.europa.eu/en/news-media/press-releases/polish-eu-presidency-priority-strengthening-european-security-and-keeping-europe-united> [dostęp: 30 III 2025].

⁴⁶ *Poland ranks 6th in the global cybersecurity ranking*, Cybersec, 2 II 2024 r., <https://cybersecforum.eu/2024/02/02/poland-ranks-6th-in-the-global-cybersecurity-ranking/> [dostęp: 30 III 2025].

Chou C., Manyika J., Neven H., *The Race to Lead the Quantum Future. How the Next Computing Revolution Will Transform the Global Economy and Upend National Security*, „Foreign Affairs” 2025, t. 104, nr 1, s. 154–167.

Dover S., *The vital role of microchips on the global economy*, California 2023.

Hążła M., *Zasobowy wymiar wojny w Ukrainie oraz perspektywy rozwojowe po jej zakończeniu*, w: *Perspektywy i wyzwania Europy*, J. Higgins, A. Moskal, M. Tomala (red.), Poznań 2024, s. 82–96.

Hążła M., Mińska-Struzik E., *How to assess economic progress in the era of discontinuity?*, „Global Policy” 2023, t. 14, nr 2, s. 331–348. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.13180>.

Jolly D., *The New Threat. China's Rapid Technological Transformation*, London 2022.

Miller C., *Chip War. The Fight for the World's Most Critical Technology*, London 2022.

Mohammad W., Elomri A., Kerbach L., *The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies*, „IFAC-PapersOnLine” 2022, t. 55, nr 10, s. 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>.

Rybiński K., Królewski J., *Algokracja. Jak i dlaczego sztuczna inteligencja zmienia wszystko?*, Warszawa 2023.

Vijay Kumar N.B.S., Sri Divya A., Karuna Sree B., Paul Daniel M., *An Investigation on “Unlocking the Potential: Advances and Challenges in Quantum Computing”*, „International Journal for Modern Trends in Science and Technology” 2023, t. 9, nr 11, s. 63–70. <https://doi.org/10.46501/IJMTST0911013>.

Źródła internetowe

2024 State of the U.S. Semiconductor Industry, https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2024/10/SIA_2024_State-of-Industry-Report.pdf [dostęp: 30 III 2025].

A quantum leap in finance. How to boost Europe's quantum technology industry, https://www.eib.org/attachments/lucalli/20220112_a_quantum_leap_in_finance_en.pdf [dostęp: 30 III 2025].

Aris B., *Ukraine doesn't have any rare earth metals, and the strategic minerals it does have are not worth trillions of dollars*, bne IntelliNews, 23 II 2025 r., <https://www.intellinews.com/ukraine-doesn-t-have-any-rare-earth-metals-and-the-strategic-minerals-it-does-have-are-not-worth-trillions-of-dollars-368472/> [dostęp: 1 X 2025].

Brooks M., *Towards quantum machine learning*, Nature, 24 V 2023 r., <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01718-2> [dostęp: 30 III 2025].

Chen L., *A Brief History of Quantum Computing*, Medium. Quantumpedia, 2 IV 2023 r., <https://quantumpedia.uk/a-brief-history-of-quantum-computing-e0bbd05893d0> [dostęp: 30 III 2025].

China sets up third fund with \$47.5 bln to boost semiconductor sector, Reuters, 27 V 2024 r., <https://www.reuters.com/technology/china-sets-up-475-bln-state-fund-boost-semiconductor-industry-2024-05-27/> [dostęp: 30 III 2025].

Collection. Strengthening ties with Europe, Gov.uk, 4 III 2025 r., <https://www.gov.uk/government/collections/the-uks-reset-with-europe> [dostęp: 30 III 2025].

Digitally deliverable services boom risks leaving least developed countries behind, United Nations Conference on Trade and Development, 28 IX 2023 r., <https://unctad.org/news/digitally-deliverable-services-boom-risks-leaving-least-developed-countries-behind> [dostęp: 30 III 2025].

European Chips Act, European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-chips-act_en [dostęp: 1 X 2025].

European Declaration on Quantum Technologies, European Commission, 6 XII 2023 r., <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies> [dostęp: 30 III 2025].

Google's ground-breaking quantum chip needs critical minerals, The Oregon Group, 10 XII 2024 r., <https://theoregongroup.com/energy-transition/technology/googles-ground-breaking-quantum-chip-needs-critical-minerals/> [dostęp: 30 III 2025].

Heim L., Anderljung M., Bluemke E., Trager R., *Computing Power and the Governance of AI*, Centre for the Governance of AI, 14 II 2024 r., <https://www.governance.ai/analysis/computing-power-and-the-governance-of-ai> [dostęp: 30 III 2025].

Informatyka kwantowa – informacje o kierunku, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, <https://rekrutacja.amu.edu.pl/kierunki-studiow/informatyka-kwantowa,573> [dostęp: 19 V 2025].

Kurowski K., *Pierwsze komputery kwantowe w Polsce i Europie*, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, 15 VII 2024 r., <https://www.pcss.pl/pierwsze-komputery-quantowe-w-polsce-i-europie/> [dostęp: 30 III 2025].

McKenna G., *Trump wants half of Ukraine's estimated \$11.5 trillion in rare earth minerals. Is a deal even possible?*, Fortune, 19 II 2025 r., <https://fortune.com/2025/02/19/trump-ukraine-rare-earth-minerals/> [dostęp: 1 X 2025].

Muggah R., Dryganov V., *Russia's Resource Grab in Ukraine*, Foreign Policy, 28 IV 2022 r., <https://foreignpolicy.com/2022/04/28/ukraine-war-russia-resources-energy-oil-gas-commodities-agriculture/> [dostęp: 30 III 2025].

Murphy I., Hążła M., *Chipping Away a Long-Standing Alliance: The Impact of Tech Restriction Communications on US-Polish Relations*, Small Wars Journal, 27 III 2025 r., <https://smallwarsjournal.com/2025/03/27/chipping-away-a-long-standing-alliance-the-impact-of-tech-restriction-communications-on-us-polish-relations/> [dostęp: 30 III 2025].

Nowak K., *Polska buduje komputer kwantowy dla wojska. Prace są już zaawansowane*, Forsal, 22 I 2025 r., <https://forsal.pl/kraj/bezpieczenstwo/artykuly/9717653,polska-buduje-komputer-quantowy-dla-wojska-prace-sa-juz-zaawansowane.html> [dostęp: 30 III 2025].

Osbourne J., Jarnecki J., *Battening Down the Hatches: Moldova's Cyber Defence*, The Royal United Services Institute, 10 VIII 2023 r., <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/commentary/battening-down-hatches-moldovas-cyber-defence> [dostęp: 30 III 2025].

Pisarski M., *Jak komputery kwantowe mogą zmienić naszą rzeczywistość?*, Ernst&Young, 10 II 2023 r., https://www.ey.com/pl_pl/insights/digital-first/jak-komputery-quantowe-moga-zmienicnasza-rzeczywistosc [dostęp: 25 IX 2025].

Poland ranks 6th in the global cybersecurity ranking, Cybersec, 2 II 2024 r., <https://cybersecforum.eu/2024/02/02/poland-ranks-6th-in-the-global-cybersecurity-ranking/> [dostęp: 30 III 2025].

Polish EU Presidency priority: strengthening European security and keeping Europe united, European Economic and Social Committee, 27 II 2025 r., <https://www.eesc.europa.eu/en/news-media/press-releases/polish-eu-presidency-priority-strengthening-european-security-and-keeping-europe-united> [dostęp: 30 III 2025].

Quantum communication growth drivers: Cybersecurity and quantum computing, McKinsey & Company, 21 II 2025 r., <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-communication-growth-drivers-cybersecurity-and-quantum-computing> [dostęp: 30 III 2025].

Quantum Initiatives Worldwide 2025, Qureca, 25 III 2025 r., <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/> [dostęp: 30 III 2025].

Quantum Technology Monitor, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20technology%20sees%20record%20investments%20progress%20on%20talent%20gap/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf> [dostęp: 30 III 2025].

Steady progress in approaching the quantum advantage, McKinsey & Company, 24 IV 2024 r., <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/steady-progress-in-approaching-the-quantum-advantage#/> [dostęp: 30 III 2025].

Thompson B., *What is Friendshoring, Nearshoring, Reshoring and Offshoring*, IncoDocs, 26 III 2024 r., <https://incodocs.com/blog/friendshoring-nearshoring-reshoring-offshoring/> [dostęp: 30 III 2025].

Ufford H.Q. van, *From niche innovations to global powerhouse: An EU quantum strategy*, European Council on Foreign Relations, 20 XII 2024 r., <https://ecfr.eu/article/from-niche-innovations-to-global-powerhouse-an-eu-quantum-strategy/> [dostęp: 30 III 2025].

US announces new restrictions on AI chip exports, The Economic Times, 14 I 2025 r., <https://economictimes.indiatimes.com/industry/renewables/gentari-supports-indias-green-hydrogen-growth-with-strategic-initiatives/articleshow/118674893.cms> [dostęp: 30 III 2025].

Varadarajan R., Koch-Weser J., Richard Ch., Fitzgerald J., Singh J., Thornton M., Casanova R., Isaacs D., *Emerging Resilience in the Semiconductor Supply Chain*, <https://web-assets.bcg.com/25/6e/7a123efd40199020ed1b4114be84/emerging-resilience-in-the-semiconductor-supply-chain-r.pdf> [dostęp: 30 III 2025].

Varas A., Varadarajan R., Goodrich J., Yiung F., *Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era*, <https://web-assets.bcg.com/9d/64/367c63094411b6e9e-1407bec0dcc/bcgxsia-strengthening-the-global-semiconductor-value-chain-april-2021.pdf> [dostęp: 30 III 2025].

World Development Indicators, World Bank Group, <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators> [dostęp: 29 III 2025].

Woźniak M., *W Poznaniu powstanie pierwszy komputer kwantowy w Polsce! Minister cyfryzacji: „Dla kraju to epokowe wydarzenie”*, Głos Wielkopolski, 30 X 2024 r., <https://gloswielkopolski.pl/w-poznaniu-powstanie-pierwszy-komputer-quantowy-w-polsce-minister-cyfryzacji-dla-kraju-to-epokowe-wydarzenie/ar/c3p2-26938497> [dostęp: 30 III 2025].

Marceli Hązła

Doktorant na Uniwersytecie Ekonomicznym w Poznaniu. Jego zainteresowania badawcze obejmują zagadnienia związane z globalizacją, cyfryzacją, gospodarkami państw azjatyckich i geoekonomią.

Kontakt: marcelihazla@gmail.com