

Skaner technologii

Opisy wybranych technologii
cyfrowych

2026



Skaner Technologii. Opisy wybranych technologii cyfrowych.

Opracowanie: Natalia Wawryniewicz, Centrum Analiz i Strategii, Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości

Raport powstał w oparciu o zróżnicowane źródła danych, wskazane przy poszczególnych opisach technologii. Ponadto w Raporcie wykorzystano część informacji ze Słownika technologii ICT, opracowanego dla Fundacji Platforma Przemysłu Przyszłości.

Kontakt w sprawie Raportu: analizy@parp.gov.pl

Spis treści

Wstęp	8
Automatyzacja, robotyzacja i sztuczna inteligencja	9
Automatyzacja (ang. Automation)	9
Opis technologii.....	9
Zaawansowanie	12
Bibliografia i dodatkowe informacje	13
Robotyzacja (ang. Robotization)	14
Opis technologii.....	14
Zaawansowanie	19
Robotyzacja w Polsce.....	20
Bibliografia i dodatkowe informacje	21
Sztuczna inteligencja (ang. Artificial Intelligence – AI)	22
Opis technologii.....	22
Zaawansowanie	28
Sztuczna inteligencja w Polsce	28
Bibliografia i dodatkowe informacje	31
Półprzewodniki, fotonika i mikroelektronika	33
Fotonika i optoelektronika (ang. Photonics and Optoelectronics)	33
Opis technologii.....	33
Zaawansowanie	36
Fotonika w Polsce	36
Bibliografia i dodatkowe informacje	37
Mikro- i nanoelektronika (ang. Micro- and nanoelectronics)	39
Opis technologii.....	39
Bibliografia i dodatkowe informacje	42
Półprzewodniki (ang. Semiconductors)	43
Opis technologii.....	43
Bibliografia i dodatkowe informacje	44
Układy scalone/mikrochipy/chipy (ang. Integrated circuits/microchips/chips)	46
Opis technologii.....	46

Bibliografia i dodatkowe informacje	50
Zaawansowanie mikroelektroniki, półprzewodników i chipów	51
Ekosystem mikroelektroniki, półprzewodników i chipów w Polsce	51
Bibliografia i dodatkowe informacje	55
Sensoryka i percepcja maszynowa	57
Czujniki/sensory (ang. Sensors)	57
Opis technologii	57
Zaawansowanie	60
Czujniki w Polsce	61
Bibliografia i dodatkowe informacje	61
Technologie naprowadzające, nawigacyjne i lokalizacyjne (ang. guidance, navigation and localization technologies)	62
Opis technologii	62
Systemy naprowadzania i nawigacyjne w Polsce	65
Bibliografia i dodatkowe informacje	65
Sieci i technologie łączności	67
5G, 6G i łączność bezprzewodowa (ang. Wireless networks)	67
Opis technologii	67
Zaawansowanie	72
Sieci bezprzewodowe w Polsce	73
Bibliografia i dodatkowe informacje	74
Infrastruktura podwodna (ang. Submarine infrastructure)	76
Opis technologii	76
Zaawansowanie	77
Infrastruktura podwodna w Polsce	77
Bibliografia i dodatkowe informacje	78
Internet Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT)	80
Opis technologii	80
Zaawansowanie	83
Internet Rzeczy w Polsce	84
Bibliografia i dodatkowe informacje	84
Łączność (ang. Connectivity)	86

Opis technologii.....	86
Zaawansowanie	88
Łączność w Polsce	89
Bibliografia i dodatkowe informacje	91
Technologie bezpieczeństwa	93
Cyberbezpieczeństwo (ang. Cybersecurity)	93
Opis technologii.....	93
Zaawansowanie	99
Cyberbezpieczeństwo w Polsce	100
Bibliografia i dodatkowe informacje	101
Technologie cyfrowe i przetwarzanie danych	103
Bliźniak cyfrowy (ang. Digital Twin)	103
Opis technologii.....	103
Zaawansowanie	109
Cyfrowy bliźniak w Polsce.....	109
Bibliografia i dodatkowe informacje	111
Chmura obliczeniowa (ang. Cloud computing)	112
Opis technologii.....	112
Zaawansowanie	116
Chmura obliczeniowa w Polsce	116
Bibliografia i dodatkowe informacje	118
Duże zbiory danych (ang. Big Data)	119
Opis technologii.....	119
Zaawansowanie	125
Big Data w Polsce	125
Bibliografia i dodatkowe informacje	126
Obliczenia wysokiej wydajności (ang. High Performance Computing – HPC)	127
Opis technologii.....	127
Zaawansowanie	129
HPC w Polsce	131
Bibliografia i dodatkowe informacje	132

Oprogramowanie (ang. Software)	133
Opis technologii.....	133
Zaawansowanie	139
Oprogramowanie w Polsce	139
Bibliografia i dodatkowe informacje	140
Przetwarzanie brzegowe (ang. Edge Computing)	141
Opis technologii.....	141
Zaawansowanie	143
Przetwarzanie brzegowe w Polsce	143
Bibliografia i dodatkowe informacje	144
Technologie rozproszonych rejestrów (ang. Distributed Ledger Technology – DLT)	146
Opis technologii.....	146
Zaawansowanie	149
Technologie rozproszonych rejestrów w Polsce	149
Bibliografia i dodatkowe informacje	150
Wirtualna rzeczywistość (ang. Virtual Reality)	151
Opis technologii.....	151
Zaawansowanie	157
Bibliografia i dodatkowe informacje	158
Technologie kwantowe i postkwantowe	159
Kryptografia kwantowa i postkwantowa (ang. Quantum and Post-quantum cryptography)	159
Opis technologii.....	159
Zaawansowanie	161
Kryptografia kwantowa i postkwantowa w Polsce	162
Bibliografia i dodatkowe informacje	164
Technologie kwantowe (ang. Quantum technologies)	166
Opis technologii.....	166
Zaawansowanie	172
Technologie kwantowe w Polsce	173
Bibliografia i dodatkowe informacje	176
Zaawansowane wytwarzanie	177

Druk 3D i technologie przyrostowe (ang. 3D printing and additive manufacturing)	177
Opis technologii.....	177
Zaawansowanie	180
Druk 3D w Polsce	181
Bibliografia i dodatkowe informacje	183

Wstęp

Raport „Skaner technologii – opisy wybranych technologii cyfrowych”, opracowany przez Polską Agencję Rozwoju Przedsiębiorczości (PARP), przedstawia kompleksowy przegląd najważniejszych technologii cyfrowych, które mają istotny potencjał kształtowania rozwoju gospodarki oraz konkurencyjności państw w nadchodzących latach. Dokument obejmuje m.in. zagadnienia związane ze sztuczną inteligencją, robotyzacją, Internetem Rzeczy (IoT), technologiami chmurowymi, cyberbezpieczeństwem, technologiami kwantowymi, półprzewodnikami, sieciami 5G i 6G, przetwarzaniem danych, drukiem 3D oraz cyfrowymi bliźniakami. Dla każdej z technologii przedstawiono jej charakterystykę, poziom zaawansowania, potencjalne zastosowania oraz informacje dotyczące rozwoju i ekosystemu technologicznego w Polsce.

Raport został przygotowany jako materiał wspierający administrację publiczną i odnosi się do priorytetowych kierunków rozwoju technologicznego wskazywanych przez Unię Europejską, w tym do założeń przyszłej polityki konkurencyjności i inwestycji, uwzględnionych m.in. w projekcie rozporządzenia dotyczącego Europejskiego Funduszu Konkurencyjności. Opracowanie przybliży wiedzę na temat obszarów, w których Polska dysponuje kompetencjami, realizuje projekty i posiada potencjał rozwojowy, a także wskazuje technologie wymagające dalszych inwestycji i wzmacniania krajowego ekosystemu innowacji. Raport prezentuje również poziom zaawansowania poszczególnych technologii oraz ich znaczenie dla rozwoju innowacyjności i transformacji cyfrowej przedsiębiorstw.

Wiedza zgromadzona w raporcie może stanowić podstawę do identyfikacji technologii wymagających szczególnego wsparcia finansowego, regulacyjnego i edukacyjnego. Opracowanie może być wykorzystane przy planowaniu programów wspierających cyfryzację przedsiębiorstw, rozwój kompetencji cyfrowych, działalność badawczo-rozwojową, wzmacnianie cyberbezpieczeństwa oraz rozwój nowoczesnej infrastruktury cyfrowej. W konsekwencji raport może wspierać lepsze dostosowanie krajowej polityki rozwoju i instrumentów wsparcia do kierunków wyznaczanych przez Unię Europejską.

Dołożono należytej staranności, aby zaprezentowane w raporcie informacje były możliwie kompletne, rzetelne i aktualne na dzień jego opracowania. Ze względu na dynamiczny rozwój części opisanych technologii oraz szybkie pojawianie się nowych inicjatyw i wyników badań, raport może nie uwzględniać wszystkich zmian, które nastąpiły po zakończeniu prac nad publikacją.

Raport będzie sukcesywnie aktualizowany i rozwijany. Zachęcamy Czytelników do przekazywania informacji o nowych projektach, istotnych wydarzeniach, wynikach badań lub innych zmianach związanych z opisanymi technologiami. Będziemy wdzięczni za wszelkie uwagi i materiały, które pomogą w doskonaleniu kolejnych edycji raportu

(analizy@parp.gov.pl).

Centrum Analiz i Strategii, Polska Agencja Rozwoju Przedsiębiorczości

Automatyzacja, robotyzacja i sztuczna inteligencja

Automatyzacja (ang. Automation)

Opis technologii

Definicja

Automatyzacja: to proces wdrażania systemów, które wykonują zadania lub procesy bez potrzeby interwencji lub z minimalną ingerencją człowieka. W kontekście Przemysłu 4.0 automatyzacja odgrywa kluczową rolę, umożliwiając firmom zwiększenie efektywności, redukcję kosztów i poprawę jakości produktów oraz usług poprzez zastosowanie zaawansowanych technologii, takich jak robotyka, sztuczna inteligencja i Internet Rzeczy (IoT). Automatyzacja zazwyczaj łączona jest z procesem robotyzacji, tj. wdrażaniem do działania w firmie robotów, które są w stanie realizować fizyczne, powtarzalne zadania wymagające precyzji oraz szybkości działania.

Dodatkowe zalety wdrożenia automatyzacji to:

- niższe koszty eksploatacji,
- poprawa bezpieczeństwa pracowników,
- skrócenie czasu realizacji zamówień,
- szybszy zwrot z inwestycji,
- zwiększenie konkurencyjności oraz wydajności produkcji,
- mniejszy ślad środowiskowy,
- lepsze planowanie,
- mniejsze zapotrzebowanie na outsourcing,
- optymalne wykorzystanie powierzchni,
- łatwa integracja,
- maksymalne wykorzystanie siły roboczej,
- zwiększenie wszechstronności oraz elastyczności systemu produkcyjnego.

Inteligentna automatyzacja (ang. intelligent automation): połączenie automatyzacji z technologiami opartymi na sztucznej inteligencji, m.in. uczeniem maszynowym, przetwarzaniem języka naturalnego lub optycznym rozpoznawaniem znaków w celu udoskonalenia i usprawnienia procesów. Takie połączenie pozwala na tworzenie systemów automatyzacji, które mogą wykonywać powtarzalne zadania, analizować dane, interpretować konteksty, podejmować decyzje czy adaptować się do zmian.

Powiązane technologie

- **Big Data:** W automatyzacji przetwarzanie dużych ilości danych umożliwia monitorowanie i optymalizację procesów produkcyjnych w czasie rzeczywistym.
- **Bliźniak cyfrowy:** Symulacje cyfrowych bliźniaków pomagają w optymalizacji i prognozowaniu pracy systemów automatycznych, co pozwala na testowanie nowych rozwiązań bez przerywania produkcji.
- **Internet Rzeczy:** Urządzenia IoT zbierają i przekazują dane między maszynami w celu automatycznego monitorowania, diagnostyki oraz konserwacji predykcyjnej.
- **Robotyzacja:** Roboty przemysłowe realizują zadania na liniach produkcyjnych, takie jak montaż, pakowanie i kontrola jakości, z dużą precyzją i szybkością.
- **Sztuczna inteligencja:** Systemy automatyzacji wspierane przez AI mogą analizować dane w czasie rzeczywistym, prognozować problemy oraz podejmować decyzje bez udziału człowieka.

Podstawowe elementy

- **Roboty przemysłowe:** Maszyny wykonujące zadania fizyczne m.in. na liniach produkcyjnych.
- **Kontrolery PLC (ang. Programmable Logic Controllers):** Urządzenia sterujące, które kontrolują pracę maszyn i systemów w oparciu o zaprogramowane instrukcje.
- **Czujniki/sensory:** Urządzenia monitorujące parametry środowiskowe i status maszyn w czasie rzeczywistym, umożliwiające dostosowanie procesów.
- **Systemy SCADA (ang. Supervisory Control and Data Acquisition):** Systemy nadzorujące, zbierające i analizujące dane z urządzeń w celu optymalizacji produkcji.
- **Oprogramowanie do zarządzania procesami:** Platformy umożliwiające konfigurację i kontrolę automatycznych procesów w firmie.

Mechanizm działania

- **Zbieranie danych:** Czujniki i urządzenia IoT gromadzą dane o procesach, takie jak temperatura, ciśnienie, stan maszyny, które są następnie przesyłane do systemów kontrolnych.
- **Przetwarzanie danych:** Dane są analizowane przez systemy oparte na sztucznej inteligencji lub SCADA, które identyfikują wzorce, wykrywają nieprawidłowości i przewidują ewentualne problemy.
- **Podejmowanie decyzji:** W oparciu o przetworzone dane, kontrolery PLC lub inne systemy podejmują decyzje dotyczące optymalizacji procesów lub korekty działań, co minimalizuje przestoje i poprawia wydajność.

- **Realizacja procesów:** Roboty przemysłowe i inne urządzenia wykonują zautomatyzowane zadania zgodnie z instrukcjami dostarczonymi przez systemy kontrolne, co eliminuje potrzebę ręcznej interwencji.
- **Monitorowanie i optymalizacja:** Systemy monitorują przebieg procesów w czasie rzeczywistym, dokonując korekt i optymalizacji w oparciu o aktualne dane. Oprogramowanie SCADA oraz cyfrowe bliźniaki pozwalają na bieżąco monitorować i dostosowywać procesy produkcyjne, co zwiększa ich wydajność i niezawodność.

Przykładowe wykorzystania

- **Zrobotyzowana automatyzacja procesów (ang. Robotic Process Automation – RPA):** technologia automatyzacji procesów biznesowych poprzez wykorzystanie oprogramowania w formie botów do wykonywania powtarzalnych, czasochłonnych zadań. Boty mogą wykonywać proste, regularne zadania zgodne z predefiniowanymi, ustrukturyzowanymi instrukcjami działania. Typowe zadania RPA to np. wprowadzanie i ekstrakcja danych, obsługa plików i dokumentów, walidacja i porównanie danych, przetwarzanie transakcji.
- **Automatyzacja przemysłowa:** Procesy wykorzystujące roboty, linie produkcyjne i systemy kontroli, które pozwalają na produkcję masową z minimalną potrzebą interwencji człowieka.
- **Automatyzacja biurowa:** Zastosowanie oprogramowania, które automatyzuje powtarzalne zadania administracyjne, takie jak przetwarzanie danych, fakturowanie czy raportowanie.
- **Automatyzacja procesów biznesowych (ang. Business Process Automation – BPA):** Technologia wykorzystywana do automatyzacji procesów wewnętrznych firmy, takich jak zarządzanie zamówieniami, planowanie zasobów przedsiębiorstwa (ERP) oraz zarządzanie relacjami z klientami (CRM).
- **Automatyzacja logistyki i systemów magazynowych:** obejmuje wdrażanie technologii zarządzania przepływem towarów, transportu wewnętrznego oraz systemów kompletacji zamówień. Wykorzystuje roboty mobilne, zautomatyzowane systemy przechowywania oraz zaawansowane oprogramowanie WMS (Warehouse Management System), co umożliwia optymalizację operacji magazynowych, zwiększenie efektywności oraz zmniejszenie kosztów.
- **Automatyzacja procesów technologicznych:** obejmuje wdrożenie systemów i urządzeń, które redukuje potrzebę ręcznej interwencji w procesach produkcyjnych i technologicznych. Wykorzystuje programowalne sterowniki logiczne (PLC), systemy SCADA oraz roboty przemysłowe w celu zwiększenia efektywności, powtarzalności oraz dokładności procesów.
- **Rozwiązania metrologii przemysłowej i kontroli procesów:** obejmują systemy i technologie wykorzystywane do precyzyjnego pomiaru i monitorowania parametrów produkcyjnych w czasie rzeczywistym. Dzięki tym technologiom możliwe jest zapewnienie wysokiej jakości produktów, minimalizacja błędów oraz optymalizacja

procesów w produkcji przemysłowej. Metrologia przemysłowa wspiera automatyzację oraz ciągłe doskonalenie procesów, przyczyniając się do zwiększenia efektywności i konkurencyjności przedsiębiorstw.

- **Usługi integratorskie:** obejmują procesy związane z projektowaniem, wdrażaniem i zarządzaniem kompleksowymi systemami robotycznymi oraz technologiami automatyzacji w różnych sektorach przemysłu. Integratorzy systemów łączą różne urządzenia i technologie, takie jak roboty, oprogramowanie zarządzające, czujniki oraz sieci komunikacyjne, aby stworzyć zintegrowane środowisko pracy. Usługi te są kluczowe dla firm, które chcą wprowadzić zaawansowane technologie automatyzacji w swoich procesach produkcyjnych, logistycznych i operacyjnych.
- **Inne rozwiązania z zakresu automatyzacji:** obejmują technologie i koncepcje, które nie mieszczą się bezpośrednio w standardowych kategoriach automatyzacji, ale wspierają rozwój zaawansowanych systemów produkcyjnych i przemysłowych. Przykłady obejmują dynamiczne systemy adaptacyjne, inteligentne linie produkcyjne oraz zintegrowane platformy zarządzania procesami w czasie rzeczywistym.

Zaawansowanie

Według raportu opublikowanego przez Fortune Business Insights wielkość światowego rynku automatyki przemysłowej oszacowano w 2025 r. na 272,51 mld USD. Przewiduje się, że wartość rynku wzrośnie z 299,21 mld USD w 2026 r. do 632,12 mld USD w 2034 r., rosnąc w tempie 9,80% w latach 2026–2034. W 2025 r. Europa zdominowała rynek automatyki przemysłowej, osiągając udział w rynku na poziomie 32,99%¹.

Pojawienie się technologii bezprzewodowej 5G oraz rosnące wdrażanie koncepcji Przemysłu 4.0 powodują gwałtowny wzrost popytu na rozwiązania automatyzacyjne we wszystkich sektorach. Oczekuje się, że rozwój rzeczywistości rozszerzonej (AR), cyfrowych bliźniaków, cyfryzacji oraz przemysłowego Internetu rzeczy (IoT) będzie istotnym wskaźnikiem wzrostu globalnego rynku automatyki przemysłowej.

Natomiast w przypadku inteligentnej automatyzacji raport opublikowany przez Grand View Research wskazuje, że wielkość światowego rynku inteligentnej automatyzacji procesów oszacowano w 2024 r. na 14,55 mld USD i przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie ona poziom 44,74 mld USD, rosnąc w latach 2025–2030 w tempie 22,6% (CAGR). Rynek inteligentnej automatyzacji procesów w Ameryce Północnej miał największy udział w przychodach, wynoszący 38,0% w 2024 r.².

Liczne branże i przedsiębiorstwa koncentrują się na obniżaniu kosztów przy jednoczesnym zwiększaniu wydajności poprzez ograniczanie możliwości wystąpienia błędów ludzkich w procesach, co stanowi główny czynnik napędzający popyt rynku inteligentnej automatyzacji. Włączenie technologii sztucznej inteligencji (AI) do innych zaawansowanych rozwiązań, takich jak robotyka, uczenie maszynowe, przetwarzanie języka naturalnego, wizja komputerowa,

¹ <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/industrial-automation-market-101589>

² <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/intelligent-process-automation-market>

analitka, optyczne rozpoznawanie znaków (OCR) i inne, pomaga organizacjom osiągać większą wydajność oraz minimalizować ryzyko i straty, jednocześnie stopniowo zwiększając produktywność.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://pie.net.pl/premiera-raportu-wsparcie-procesu-robotyzacji-w-polsce-rekomendacje/>
2. <https://www.sap.com/poland/resources/what-is-intelligent-automation>
3. <https://www.oracle.com/pl/cloud/intelligent-automation/>
4. <https://akademia.parp.gov.pl/course/view.php?id=310>
5. <https://www.sap.com/poland/resources/what-is-rpa>
6. <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/industrial-automation-market-101589>
7. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/intelligent-process-automation-market>

Robotyzacja (ang. Robotization)

Opis technologii

Definicja

Robotyzacja: to proces wprowadzania robotów i systemów automatycznych, które są w stanie realizować zadania fizyczne i powtarzalne, wymagające precyzji oraz szybkości działania. W kontekście Przemysłu 4.0 robotyzacja stanowi jeden z kluczowych elementów optymalizacji procesów produkcyjnych, magazynowych i logistycznych. Robotyka umożliwia przedsiębiorstwom zwiększenie efektywności, bezpieczeństwa oraz kontroli jakości poprzez automatyzację skomplikowanych zadań, które wcześniej wymagały interwencji człowieka.

Dodatkowe zalety wdrożenia robotyzacji to:

- niższe koszty eksploatacji,
- poprawa bezpieczeństwa pracowników,
- skrócenie czasu realizacji zamówień,
- szybszy zwrot z inwestycji,
- zwiększenie konkurencyjności oraz wydajności produkcji,
- mniejszy ślad środowiskowy,
- lepsze planowanie,
- mniejsze zapotrzebowanie na outsourcing,
- optymalne wykorzystanie powierzchni,
- łatwa integracja,
- maksymalne wykorzystanie siły roboczej,
- zwiększenie wszechstronności oraz elastyczności systemu produkcyjnego.

Robotyka: interdyscyplinarna dziedzina nauki zajmująca się projektowaniem, budową, obsługą, rozwojem i wykorzystaniem robotów³.

Robot: programowalne maszyny posiadające pewien stopień autonomii, zdolne do wykonywania zadań związanych z przemieszczaniem się, manipulacją obiektami lub precyzyjnym pozycjonowaniem.

Do podstawowych rodzajów robotów zaliczają się:

- **Roboty przemysłowe:** maszyny przystosowane do wykonywania powtarzalnych zadań na liniach produkcyjnych, takich jak spawanie, montaż, malowanie, pakowanie i kontrola jakości. Automatycznie sterowany, wielofunkcyjny, programowalny, składa

³ https://mfiles.pl/pl/index.php/Automatyka_i_robotyka

się z trzech lub więcej osi, może być przymocowany na stałe lub na platformie mobilnej, przeznaczony do zastosowań automatyzacyjnych w środowisku przemysłowym⁴. Roboty przemysłowe charakteryzują się dużą szybkością działania, precyzją oraz możliwością pracy w trudnych lub niebezpiecznych warunkach, co przyczynia się do zwiększenia efektywności produkcji. Roboty przemysłowe wykonują zadania programowane za pomocą kontrolerów, które sterują ich manipulatorem. W oparciu o dane z sensorów, roboty mogą precyzyjnie lokalizować przedmioty, manipulować nimi lub wykonywać operacje, takie jak spawanie czy malowanie. Zautomatyzowane programowanie umożliwia robotom szybkie dostosowywanie się do zmieniających się warunków w procesie produkcyjnym, a operatorzy mogą nadzorować ich pracę w czasie rzeczywistym dzięki interfejsom HMI.

- **System zrobotyzowany:** w jego skład wchodzi robot przemysłowy, narzędzia końcowe oraz wszelkie czujniki i urządzenia zintegrowane z narzędziem końcowym (np. systemy wizyjne, sterowniki, aplikatory, chwytaki), które są potrzebne do wykonania zadania lub ich zaprogramowanego programu⁵.
- **Robot usługowy:** przeznaczony do użytku osobistego lub profesjonalnego, wykonuje zadania użyteczne zarówno dla ludzi, jak i dla sprzętu, m.in. przenoszenie lub podawanie przedmiotów, transport, wsparcie fizyczne, inspekcję, nadzór, gotowanie czy sprzątanie.
- **Pojazdy autonomiczne i bezzałogowe:** to systemy transportowe, które mogą poruszać się samodzielnie bez potrzeby bezpośredniego sterowania przez człowieka. Wykorzystują zaawansowane technologie, takie jak sztuczna inteligencja, czujniki i systemy nawigacyjne, aby samodzielnie analizować otoczenie, podejmować decyzje i przemieszczać się w środowisku. Tego rodzaju pojazdy mają szerokie zastosowanie w transporcie, logistyce, rolnictwie, wojsku i eksploracji. Pojazdy autonomiczne wykorzystują kombinację technologii, takich jak sztuczna inteligencja, systemy nawigacyjne i czujniki, aby poruszać się w swoim środowisku. Czujniki zbierają dane na temat otoczenia, które są analizowane przez systemy AI, umożliwiając pojazdowi podejmowanie decyzji, takich jak omijanie przeszkód, reagowanie na zmieniające się warunki drogowe czy wybór najlepszej trasy. Systemy komunikacyjne pozwalają pojazdom na wymianę informacji z innymi jednostkami, co dodatkowo zwiększa ich efektywność i bezpieczeństwo. Przykładem tego typu robotów są AGV i AMR.
- **Roboty mobilne (ang. Automated Guided Vehicle – AGV i Autonomous Mobile Robot – AMR):** samobieżne pojazdy, które poruszają się w obrębie zakładu, magazynu lub centrum dystrybucji (np. transportują materiały). AGV poruszają się po

⁴ <https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2025/05/PP-3-2025-Wsparcie-robotyzacji.pdf>

⁵ Tamże.

zaprogramowanych trasach, a AMR działają autonomicznie (nie wymagają ustalania stałych ścieżek)⁶.

- **Koboty/roboty współpracujące (ang. cobots):** roboty zaprojektowane do bezpiecznej współpracy z ludźmi w tych samych przestrzeniach roboczych, np. w procesach montażowych.
- **Roboty serwisowe:** maszyny wspierające działania serwisowe, takie jak magazynowanie, logistykę oraz czyszczenie.
- **Drony/bezzałogowe statki powietrzne (ang. Unmanned Aerial Vehicles – UAV):** to pojazdy latające, które nie wymagają obecności pilota na pokładzie. Są sterowane zdalnie lub mogą działać autonomicznie na podstawie zaprogramowanych instrukcji. Drony znajdują szerokie zastosowanie w wielu sektorach, w tym w fotografii, rolnictwie, logistyce, ratownictwie, monitoringu, a także w wojsku. Drony działają poprzez kombinację systemów nawigacyjnych, silników oraz sensorów. Sterowanie dronem odbywa się zazwyczaj zdalnie przez operatora lub może być autonomiczne dzięki wcześniej zaprogramowanym trasom. Systemy GPS i LIDAR umożliwiają dronowi precyzyjne określenie pozycji i unikanie przeszkód, a zaawansowane sensory zbierają dane, które są przetwarzane w czasie rzeczywistym.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** roboty przemysłowe i systemy robotyczne zintegrowane z systemami automatyzacji pozwalają na pełną automatyzację produkcji, eliminując potrzebę interwencji człowieka w powtarzalnych i wymagających zadaniach.
- **Big Data:** dane zbierane przez roboty mogą być analizowane w celu optymalizacji wydajności oraz planowania działań konserwacyjnych.
- **Bliźniak cyfrowy:** tworzenie cyfrowych modeli robotów umożliwia symulację, testowanie i optymalizację pracy robotów bez potrzeby ingerencji w fizyczne zasoby.
- **Internet Rzeczy:** urządzenia IoT w robotyce zbierają dane na temat wydajności maszyn, ich stanu technicznego oraz efektywności procesów, co pozwala na monitorowanie i optymalizację działania robotów.
- **Sztuczna inteligencja:** AI umożliwia robotom przetwarzanie danych i podejmowanie autonomicznych decyzji, co jest wykorzystywane w zaawansowanych aplikacjach, takich jak sortowanie, kontrola jakości i inspekcja wizualna.

Podstawowe elementy

- **Manipulatory:** ramię robota, które wykonuje precyzyjne ruchy i operacje, takie jak chwytanie, montowanie, przenoszenie czy obróbka materiałów.

⁶ <https://mobile-industrial-robots.com/pl/blog/agv-vs-amr>

- **Kontrolery robotów:** urządzenia sterujące, które przetwarzają polecenia i sterują ruchami manipulatora oraz innymi funkcjami robota.
- **Systemy wizyjne:** kamery i czujniki, które pozwalają robotom na rozpoznawanie obiektów, kontrolę jakości i precyzyjne wykonywanie zadań w oparciu o obrazy.
- **Napędy i siłowniki:** elementy zapewniające ruch robota, sterujące szybkością i precyzją operacji.
- **Interfejsy HMI (ang. Human-Machine Interface):** interfejsy umożliwiające komunikację i współpracę pomiędzy człowiekiem a robotem, co jest szczególnie ważne w przypadku kobotów.

Mechanizm działania

- **Programowanie i planowanie:** roboty są programowane do realizacji określonych zadań, takich jak montaż czy spawanie, a planowanie ruchów i działań uwzględnia ich optymalizację i bezpieczeństwo.
- **Percepcja i analiza danych:** systemy wizyjne, czujniki i algorytmy przetwarzania danych pozwalają robotom na ocenę otoczenia, identyfikację obiektów oraz analizę warunków pracy, co umożliwia dynamiczne dostosowanie działania.
- **Podejmowanie decyzji:** roboty wykorzystują wbudowane kontrolery i algorytmy sztucznej inteligencji do podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym, co pozwala na autonomiczne reagowanie na zmienne warunki i unikanie przeszkód.
- **Realizacja zadania:** roboty wykonują zaprogramowane zadania, takie jak przenoszenie, montaż, kontrola jakości, w sposób precyzyjny i powtarzalny. Ich działania są realizowane zgodnie z instrukcjami, z zachowaniem odpowiednich parametrów jakości i bezpieczeństwa.
- **Monitorowanie i konserwacja predykcyjna:** dzięki zastosowaniu IoT i analizie danych, roboty mogą monitorować własny stan techniczny oraz zgłaszać potrzeby konserwacyjne. Monitorowanie stanu robota pozwala na planowanie konserwacji predykcyjnej, co minimalizuje ryzyko awarii.
- **Optymalizacja i adaptacja:** w zależności od danych zebranych w trakcie pracy, roboty mogą być dostosowywane do zmieniających się warunków lub nowych zadań, a dzięki analizie danych możliwe jest ciągłe doskonalenie ich działania.

Przykładowe wykorzystania

- **Robotyka konsumencka:** to segment robotyki skierowany bezpośrednio do użytkowników domowych i indywidualnych. Obejmuje urządzenia zaprojektowane do automatyzacji codziennych zadań, takich jak sprząatanie, gotowanie, monitorowanie domowe, a także roboty edukacyjne i rozrywkowe. Robotyka konsumencka stale się rozwija, wprowadzając coraz bardziej zaawansowane, autonomiczne urządzenia, które ułatwiają życie użytkownikom i podnoszą jakość życia. Roboty konsumenckie

działają na zasadzie automatyzacji zadań domowych przy użyciu czujników, systemów nawigacyjnych i algorytmów AI. Czujniki wykrywają przeszkody, a system nawigacyjny kieruje robota w sposób optymalny po pomieszczeniach, np. przy sprzątaniu. Roboty te są programowane do wykonywania określonych zadań, które mogą być sterowane zdalnie przez użytkownika, a także autonomicznie wykonywane przez robota dzięki algorytmom uczenia maszynowego.

- **Robotyzacja logistyki i systemów magazynowych:** obejmuje zastosowanie zaawansowanych technologii i robotów do automatyzacji procesów magazynowych, takich jak sortowanie, pakowanie, kompletowanie zamówień, transport wewnętrzny oraz zarządzanie magazynem. Dzięki wykorzystaniu robotów, sztucznej inteligencji oraz systemów IoT, możliwa jest optymalizacja pracy magazynów, zwiększenie efektywności i redukcja błędów w operacjach logistycznych. Roboty i systemy automatyzacji w logistyce działają w sposób zintegrowany, realizując operacje magazynowe na podstawie zaprogramowanych algorytmów i analizy danych. Roboty transportowe przemieszczają towary, a systemy WMS zarządzają całym przepływem towarów, koordynując działania maszyn. Czujniki i kamery monitorują magazyn, a systemy AGV optymalizują ruch towarów w przestrzeni magazynowej. Interfejsy HMI umożliwiają pracownikom śledzenie stanu operacji w czasie rzeczywistym i reagowanie na ewentualne problemy.
- **Robotyzacja procesów technologicznych:** odnosi się do automatyzacji powtarzalnych i precyzyjnych czynności w procesach produkcyjnych i technologicznych za pomocą robotów przemysłowych. Wykorzystuje systemy robotyczne do optymalizacji procesów w przemyśle, poprawy efektywności, redukcji błędów i zwiększenia wydajności. Procesy te obejmują między innymi montaż, spawanie, malowanie, pakowanie oraz inne czynności, które mogą być realizowane przez maszyny. Robotyzacja procesów technologicznych opiera się na automatyzacji powtarzalnych zadań w liniach produkcyjnych przy użyciu robotów przemysłowych. Roboty te są programowane do wykonywania konkretnych zadań, takich jak montaż, spawanie czy pakowanie. Sensory i kamery monitorują otoczenie, co pozwala na dynamiczne dostosowywanie się robotów do warunków produkcji. Systemy kontroli sterują pracą robotów, a interfejsy człowiek-maszyna umożliwiają nadzorowanie procesów w czasie rzeczywistym.
- **Usługi integratorskie:** obejmują procesy związane z projektowaniem, wdrażaniem i zarządzaniem kompleksowymi systemami robotycznymi oraz technologiami automatyzacji w różnych sektorach przemysłu. Integratorzy systemów łączą różne urządzenia i technologie, takie jak roboty, oprogramowanie zarządzające, czujniki oraz sieci komunikacyjne, aby stworzyć zintegrowane środowisko pracy. Usługi te są kluczowe dla firm, które chcą wprowadzić zaawansowane technologie automatyzacji w swoich procesach produkcyjnych, logistycznych i operacyjnych. Usługi integratorskie zaczynają się od analizy potrzeb klienta i projektowania rozwiązań technologicznych dopasowanych do specyfiki działalności. Następnie integrator łączy

różne technologie, takie jak roboty, czujniki, oprogramowanie i systemy zarządzania, w spójny system, który automatyzuje określone procesy. Po wdrożeniu systemu przeprowadzane są testy, szkolenia personelu oraz serwis techniczny, aby zapewnić płynne działanie i maksymalną efektywność.

- **Inne rozwiązania z zakresu robotyzacji:** to szeroka kategoria obejmująca nowatorskie, niestandardowe i interdyscyplinarne zastosowania robotyki, które nie pasują bezpośrednio do bardziej tradycyjnych kategorii, takich jak roboty przemysłowe czy autonomiczne pojazdy. Obejmuje to zaawansowane rozwiązania robotyczne w sektorach takich jak medycyna, rolnictwo, przemysł usługowy oraz nowe typy robotów wspierających, które mogą asystować ludziom w codziennych czynnościach, pracować w niebezpiecznych warunkach lub rozwijać technologie przyszłości. Zaawansowane roboty wykorzystywane w niestandardowych rozwiązaniach działają na bazie kombinacji czujników, systemów nawigacyjnych, sztucznej inteligencji oraz interfejsów człowiek-robot.

Zaawansowanie

Według raportów opublikowanych przez Grand View Research światowy rynek robotyki kształtuje się w następujący sposób:

- Wielkość światowego rynku robotyki usługowej oszacowano w 2023 r. na 46,99 mld USD i przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie ona poziom 107,75 mld USD, rosnąc w latach 2024–2030 w tempie 12,4% (CAGR). Robotyka usługowa odnotowuje rosnącą penetrację w różnych sektorach dzięki takim czynnikom, jak precyzyjne usługi, niedrogie rozwiązania, elastyczność oraz zmniejszenie nakładu pracy ludzkiej⁷.
- Wielkość światowego rynku robotyki przemysłowej oszacowano w 2024 r. na 33 956,1 mln USD i przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie ona poziom 60 562,0 mln USD, rosnąc w latach 2025–2030 w tempie 9,9% (CAGR). Gwałtowny rozwój handlu elektronicznego przyspieszył popyt na robotykę przemysłową, magazynowanie i logistykę. Roboty usprawniają operacje poprzez automatyzację procesów, takich jak sortowanie, kompletacja, pakowanie i dostawa⁸.
- Wielkość światowego rynku robotyki mobilnej oszacowano w 2024 r. na 25,40 mld USD i przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie ona poziom 73,68 mld USD, rosnąc w latach 2025–2030 w tempie 20,7% (CAGR). Wzrost ten wynika z coraz powszechniejszego wdrażania automatyzacji w różnych branżach, w tym w przemyśle wytwórczym, logistyce i służbie zdrowia⁹.

Według najnowszego raportu International Federation of Robotics (IFR) w 2026 r. w robotyce będzie dominować 5 głównych trendów do których należą¹⁰:

⁷ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/service-robotics-industry>

⁸ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-robotics-market>

⁹ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/mobile-robotics-market>

¹⁰ <https://fairp.pl/aktualnosci/robotyka-2026-ai-humanoidy-i-bezpieczenstwo-napedza-globalny-rynek/>

- **Wykorzystanie AI i rozwój autonomii w robotyce:** wykorzystanie najnowszych rozwiązań sztucznej inteligencji w celu zwiększania autonomii systemów robotycznych.
- **Zwiększenie wszechstronności robotów poprzez integrację technologii informatycznych IT i technologii operacyjnych OT:** połączenie przetwarzania danych z fizycznym sterowaniem w celu zwiększenia elastyczności robotów poprzez wymianę danych w czasie rzeczywistym, automatyzację i zaawansowaną analitykę.
- **Rozwój robotów humanoidalnych:** przejście od rozwiązań prototypowych do rzeczywistych wdrożeń.
- **Bezpieczeństwo i cyberbezpieczeństwo w robotyce:** projektowanie i certyfikowanie robotów zgodnie z istniejącymi normami, a także rozwiązywanie nowych wyzwań związanych z wykorzystaniem AI oraz systemów połączonych z chmurą.
- **Roboty jako sposób niwelowania braków kadrowych:** wdrażanie robotów i automatyzacji w celu przejmowania rutynowych zadań i niwelowania braków w wykwalifikowanej kadrze.

Według raportu „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” obecnie dynamicznie rozwija się obszar robotyki i autonomii w systemach fizycznych, tj. projektowanie, budowa i eksploatacja inteligentnych maszyn, które są zdolne do samodzielnego działania w środowisku fizycznym¹¹. Jako główne wyzwanie w tym obszarze identyfikuje się integrację robotyki z innymi technologiami cyfrowymi, m.in. sztuczną inteligencją, systemami wizyjnymi, czujnikami i Internetem Rzeczy. Ekosystem, w skład którego będą wchodzić rozwiązania należące do tych technologii, ma pozwolić na tworzenie autonomicznych systemów zdolnych do postrzegania otoczenia, podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym oraz dostosowywania się do zmiennych warunków. Roboty i systemy autonomiczne mogą być wykorzystywane w szerokim spektrum branż i zastosowań np. w produkcji, rolnictwie, transporcie, logistyce, energetyce i wielu innych. W publikowanych badaniach i opracowaniach dotyczących robotyki widoczne jest wyraźne przesunięcie obszaru zainteresowań z prostych robotów przemysłowych na roboty wykorzystujące sensorykę, AI oraz inteligentne systemy sterowania.

Robotyzacja w Polsce

Według danych zawartych w raporcie „Wsparcie procesu robotyzacji w Polsce. Rekomendacje” opublikowanego przez Polski Instytut Ekonomiczny w Polsce w 2023 r. zainstalowano 2 203 roboty przemysłowe w sektorze przetwórstwa przemysłowego. Z tego 31% robotów przemysłowych wykorzystywano w branży motoryzacyjnej. W tym samym roku na 10 tys. osób zatrudnionych w sektorze przetwórstwa przemysłowego przypadało 61 robotów¹². Dla porównania w 2023 r. największa gęstość robotyzacji w sektorze przetwórstwa

¹¹ „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji”, PARP, Warszawa, 2026.

¹² <https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2025/05/PP-3-2025-Wsparcie-robotyzacji.pdf>

przemysłowego wśród krajów Unii Europejskiej wystąpiła w Szwecji – na 10 tys. pracowników przypadło 293 robotów.

Według raportu „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” obszar robotyki w Polsce charakteryzuje się wysokim potencjałem B+R – w badaniu została wykazana wysoka aktywność publikacyjna oraz patentowa¹³. Pod względem aktywności przemysłowej ocena ta była niższa – w ramach badania zostały potwierdzone ograniczone, ale obecne na rynku podmioty (startupy i scaleupy) rozwijające rozwiązania z zakresu robotyki, automatyki i systemów autonomicznych. Skupiają się one głównie na rozwiązaniach z zakresu automatyzacji procesów, robotyzacji produkcji, a także zastosowaniu systemów autonomicznych w przemyśle i mobilności.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://pie.net.pl/wp-content/uploads/2025/05/PP-3-2025-Wsparcie-robotyzacji.pdf>
2. <https://fairp.pl/aktualnosci/robotyka-2026-ai-humanoidy-i-bezpieczenstwo-napedza-globalny-rynek/>
3. <https://www.parp.gov.pl/component/content/article/90389:coboty-jako-narzedzie-wspierajace-automatyzacje-we-wspolczesnych-fabrykach>
4. <https://mobile-industrial-robots.com/pl/blog/agv-vs-amr>

¹³ „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji”, PARP, Warszawa, 2026.

Sztuczna inteligencja (ang. Artificial Intelligence – AI)

Opis technologii

Definicja

Sztuczna inteligencja – SI: to dziedzina technologii, która koncentruje się na tworzeniu systemów i algorytmów zdolnych do naśladowania ludzkiego myślenia, uczenia się, rozumowania i podejmowania decyzji. AI pozwala maszynom i programom na samodzielne rozwiązywanie złożonych problemów, analizę dużych zbiorów danych, a także optymalizację procesów w oparciu o wzorce i przewidywania. W kontekście Przemysłu 4.0, AI jest kluczowym elementem, który wspiera automatyzację, analizę danych w czasie rzeczywistym, personalizację usług oraz rozwój inteligentnych systemów zarządzania produkcją.

Algorytmy sztucznej inteligencji: zestawy instrukcji i modeli matematycznych, które krok po kroku przedstawiają kolejne etapy danego procesu przeprowadzanego przez model AI, np. analizy danych, wykrywania wzorców, predykcji.

Modele sztucznej inteligencji: program, który został wytrenowany na zbiorze danych w celu rozpoznawania określonych wzorców, generowania treści lub podejmowania decyzji bez dalszej interwencji człowieka.

Model AI ogólnego przeznaczenia (ang. General Purpose AI – GPAI): wg definicji zawartej w unijnym AI Act, jest to „model AI, w tym w przypadku gdy taki model AI jest trenowany z wykorzystaniem dużej ilości danych z wykorzystaniem nadzoru własnego na dużą skalę, który wykazuje znaczną ogólność i jest w stanie kompetentnie wykonywać szeroki zakres różnych zadań niezależnie od sposobu wprowadzania modelu do obrotu i który można zintegrować z różnymi systemami lub aplikacjami niższego szczebla.”¹⁴

Uczenie maszynowe (ang. Machine Learning – ML): dziedzina sztucznej inteligencji skupiająca się na algorytmach które „uczą się” rozpoznawania wzorców na podstawie danych szkoleniowych. Uczenie maszynowe wykorzystywane jest m.in. do klasyfikacji, predykcji oraz analizy wzorców.

(Sztuczne) sieci neuronowe (ang. neural networks): struktury złożone z warstw sztucznych neuronów (wzorowanych na neuronach biologicznych) wykorzystywane do złożonych analiz, takich jak rozpoznawanie obrazu, przetwarzanie języka i prognozowanie.

W skład sieci neuronowych wchodzi następujące warstwy:

- **Warstwa wejściowa/zewnętrzna:** rejestruje bodźce z zewnątrz, przetwarza informacje i decyduje o przesłaniu ich do kolejnej warstwy.
- **Warstwy ukryte:** przeliczają informacje przesłane z poprzedniej warstwy i przekazują je dalej. Liczba tego rodzaju warstw zależy od rodzaju modelu sztucznej inteligencji, w której dana sieć jest wykorzystywana.

¹⁴ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/faqs/general-purpose-ai-models-ai-act-questions-answers>

- **Warstwa wyjściowa:** dokonuje ostatecznych obliczeń informacji otrzymanych od poprzednich warstw, a następnie na podstawie otrzymanego wyniku podejmuje decyzję.

Uczenie głębokie (ang. deep learning): poddziedzina uczenia maszynowego, w którym wykorzystywane są wielowarstwowe sieci neuronowe (inspirowane budową ludzkiego mózgu). Model tego typu na podstawie dużych zbiorów danych treningowych uczy się rozpoznawania wzorców, co pozwala mapować dane wejściowe na dane wyjściowe¹⁵. Aby model mógł zostać uznany za uczenie głębokie, wykorzystana w nim sieć neuronowa musi składać się z co najmniej 4 warstw (z których każda przeprowadza operacje matematyczne).

Duże modele językowe (ang. Large Language Models – LLMs): kategoria modeli uczenia głębokiego, które zostały wytrenowane na ogromnych zbiorach danych, dzięki czemu potrafią generować język naturalny oraz inne rodzaje treści. Modele LLM opierają się na architekturze sieci neuronowej zwanej transformatorem, która radzi sobie z sekwencjami słów i wychwytywaniem wzorców w tekście. Modele LLM działają jak gigantyczne maszyny do prognozowania statystycznego, które przewidują następne słowo w sekwencji. Uczą się wzorców występujących w tekście i generują język zgodny z tymi wzorcami.

Generatywna sztuczna inteligencja (ang. Generative Artificial Intelligence – GenAI): modele sztucznej inteligencji pozwalające na generowanie różnego rodzaju nowych treści np. tekstu, obrazu, wideo, muzyki, kodu itp. W przeciwieństwie do tradycyjnych modeli działających tylko na podstawie wyuczonych wzorców, GenAI może naśladować lub reinterpreterować właściwości danych wejściowych¹⁶. Generatywna sztuczna inteligencja generuje treści na podstawie tzw. promptów, czyli zapytań tekstowych. **Promptowanie** można zdefiniować jako „(...) umiejętność zadawania pytań modelom językowym w taki sposób, aby otrzymać odpowiedzi jak najbardziej zbliżone do naszych oczekiwań.”¹⁷

Do narzędzi GenAI należą m.in.

- Chatboty takie jak m.in.: ChatGPT, Claude, Copilot, Gemini, Grok, DeepSeek i inne chatboty. Polskie chatboty to PLLuM oraz Bielik.
- Modele tekst na obraz (ang. text-to-image models): Dall-E, Firefly, Stable Diffusion, Midjourney.
- Modele tekst na wideo (ang. text-to-video models): Veo, LTX.

Edge AI: modele sztucznej inteligencji uruchamiane bezpośrednio na urządzeniach końcowych lub w infrastrukturze brzegowej.

¹⁵ Dokładny opis działania sztucznych neuronów i sieci neuronowych:

<https://www.sztuczna-inteligencja.org.pl/kurs/sztuczna-inteligencja-dla-poczatkujacych/sztuczne-sieci-neuronowe/>

¹⁶ <https://zpe.gov.pl/a/i-o-kreatywnosci-generatywnej-sztucznej-inteligencji-11-generatywna-sztuczna-inteligencja-genai-a-kreatywnosc/D16yodZxY>

¹⁷ <https://zpe.gov.pl/a/14-inzynieria-podpowiedzi-ang-prompt-engineering/DMfAEMwe2>

Agenci AI (ang. AI Agents): systemy AI, które mogą samodzielnie wykonywać specyficzne zadania w celu osiągnięcia określonego celu poprzez podejmowanie decyzji i korzystanie z narzędzi.

Agentowa sztuczna inteligencja (ang. Agentic AI): system zarządzający wieloma agentami AI, co pozwala na wykonywanie skomplikowanych, wieloetapowych zadań.

Problem nadmiernego dopasowania: sytuacja, w której sieć neuronowa jest zbyt dopasowana do danych treningowych, przez co ma znacznie mniejszą skuteczność w działaniu na nowych danych.

Halucynacje: treść wygenerowana przez AI, która zawiera fałszywe lub wprowadzające w błąd informacje przedstawione jako fakty.

„Czarna skrzynka” (ang. Black Box AI): system AI, którego wewnętrzne działanie jest tajemnicą dla jego użytkowników, tj. widzą oni dane wejściowe i wyjściowe, ale nie wiedzą, co dzieje się wewnątrz narzędzia AI, aby uzyskać wygenerowane wyniki.

Deep fake: wygenerowane lub zmanipulowane przez sztuczną inteligencję obrazy, treści dźwiękowe lub treści wideo, które przypominają istniejące osoby, przedmioty, miejsca, podmioty lub zdarzenia, które odbiorca mógłby niesłusznie uznać za autentyczne lub prawdziwe.

Załamanie modelu (ang. model collapse): jest to proces, w ramach którego modele AI trenowane na innych treściach generowanych przez sztuczną inteligencję (tj. danych syntetycznych) coraz bardziej oddalają się od rzeczywistych danych, popełniają coraz więcej błędów, tracą zdolność do radzenia sobie z rzadkimi i nietypowymi przypadkami oraz oddawaniem różnorodności i subtelności. Coraz większy odsetek danych syntetycznych (tj. wygenerowanych przez AI) w zbiorze danych treningowych prowadzi do stopniowego zubożenia modelu AI – generowane przez niego treści stają się coraz bardziej zestandaryzowane i coraz mniej różnorodne.

Fabryki AI: to, wg definicji Komisji Europejskiej, dynamiczne ekosystemy skupione wokół europejskich superkomputerów, które łączą kluczowe elementy potrzebne do opracowywania najnowszych generatywnych modeli sztucznej inteligencji. Elementy te to: superkomputery, centra danych, badacze i naukowcy specjalizujący się w dziedzinach związanych z AI i danymi, a także przedstawiciele biznesu (w tym MŚP). Częścią ekosystemu mają być również centra wsparcia w zakresie superkomputerów, które ułatwią dostęp do tej technologii oraz do dedykowanych narzędzi programowania i wsparcia algorytmicznego.

AI Testing and Experimentation Facilities (TEF): to wyspecjalizowane, wielkoskalowe ośrodki badawcze, otwarte dla wszystkich europejskich dostawców technologii, służące do testowania i przeprowadzania eksperymentów na dużą skalę z wykorzystaniem najnowocześniejszych rozwiązań w dziedzinie sztucznej inteligencji, w tym zarówno produktów sprzętowych i programowych, jak i usług, np. robotów, w rzeczywistych warunkach.

Centrum danych: to obiekt służący do przechowywania infrastruktury informatycznej, (m.in. serwerów, urządzeń przechowywania danych czy infrastruktury sieciowej), a także dystrybucji cyfrowych danych. Centra danych stanowią infrastrukturę o znaczeniu krytycznym dla przechowywania i przetwarzania informacji oraz wspierają globalny system finansowy, usługi w chmurze, uczenie maszynowe i sztuczną inteligencję.

Centra danych różnią się pod względem wielkości, wymagań energetycznych i ogólnej struktury. Generalnie jednak są one obiektami wymagającymi zużycia wielu zasobów, zarówno w procesie budowy i wyposażenia, jak i późniejszej eksploatacji. Działanie centrów danych wymaga zwłaszcza dużego zużycia energii elektrycznej, co może stanowić znaczne obciążenie dla sieci przesyłowych oraz elektrowni.

Można wyróżnić cztery popularne kategorie tego typu obiektów:

- lokalne centra danych przedsiębiorstw, z których korzystają głównie pracownicy i klienci firmy,
- obiekty kolokacyjne, w których wiele firm wynajmuje przestrzeń we wspólnym centrum danych,
- hiperskalowe centra danych należące do bardzo dużych firm świadczących usługi w chmurze,
- brzegowe centra danych zlokalizowane blisko użytkowników końcowych.

Podstawowe rodzaje

- **Przetwarzanie języka naturalnego (NLP):** Technologie umożliwiające komputerom rozumienie, interpretację i generowanie języka ludzkiego, stosowane w chatbotach, analizie tekstu, automatycznych tłumaczeniach.
- **Rozpoznawanie obrazów i wizji komputerowej:** Algorytmy analizujące obrazy i wideo, stosowane w rozpoznawaniu obiektów, kontroli jakości, monitoringu oraz autonomicznych pojazdach.
- **Systemy rekomendacyjne:** Algorytmy personalizujące treści i produkty, używane w marketingu, handlu elektronicznym i platformach streamingowych.
- **Robotyka autonomiczna:** Zastosowanie AI w robotach, które są zdolne do samodzielnego wykonywania zadań i dostosowywania się do zmieniających się warunków w środowisku przemysłowym i logistycznym.

Główne role

- **Inteligentne fabryki:** zdolność do analizy dużych zbiorów danych i zastosowania AI w procesach produkcyjnych; organizowanie i wykorzystanie zbiorów danych w celu poprawy kontroli jakości, standaryzacji i konserwacji; tworzenie analiz funkcjonalności sprzętu i gruntowne usprawnianie linii produkcyjnych.

- **Konserwacja predykcyjna:** znalezienie wzorców, które mogą pomóc w przewidywaniu i ostatecznym zapobieganiu awarii; zautomatyzowana i inteligentna predykcja umożliwia lepsze planowanie i określanie stanu urządzeń i sprzętu.
- **Wizja komputerowa:** wykrywanie, identyfikacja i oznaczanie obiektów.
- **Systemy cyberfizyczne:** inteligentne sieci energetyczne, robotyka i inteligentna produkcja; prowadzenie wydajnej i efektywnej współpracy (z dowolnego miejsca na świecie) w celu zapewnienia w pełni rozproszonego środowiska produkcyjnego.
- **Robotyzacja oraz współpraca człowiek-robot:** zapewnienie bezpieczeństwa personelu, a także przekazywanie robotom większej odpowiedzialności za podejmowanie decyzji, które mogą jeszcze bardziej zoptymalizować procesy w oparciu o dane zbierane w czasie rzeczywistym z hali produkcyjnej.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** AI umożliwia automatyzację złożonych procesów poprzez predykcję i analizę, co prowadzi do minimalizacji błędów i zwiększenia efektywności.
- **Big Data:** AI analizuje dane pochodzące z Big Data, co pozwala na identyfikację wzorców, prognozowanie trendów oraz optymalizację procesów produkcyjnych i biznesowych.
- **Chmura obliczeniowa:** AI korzysta z mocy obliczeniowej chmury do przetwarzania dużych zbiorów danych i złożonych modeli, co umożliwia skalowanie i zdalny dostęp do algorytmów AI.
- **Cyberbezpieczeństwo:** AI wspiera identyfikację zagrożeń oraz anomalii w ruchu sieciowym, co umożliwia wykrywanie potencjalnych ataków i reagowanie na nie w czasie rzeczywistym.
- **Internet Rzeczy:** AI wspiera analizę danych zbieranych przez urządzenia IoT, umożliwiając automatyzację procesów, przewidywanie awarii oraz monitorowanie w czasie rzeczywistym.

Podstawowe elementy

- **Algorytmy uczenia maszynowego (ML):** metody, które umożliwiają algorytmom na samodzielne uczenie się z danych bez ręcznego programowania. Podstawowe rodzaje ML obejmują uczenie nadzorowane, nienadzorowane oraz uczenie przez wzmacnianie, które mają różne zastosowania, np. klasyfikacja, klasteryzacja czy optymalizacja procesów.
- **Sztuczne sieci neuronowe:** struktury modelujące sposób działania ludzkiego mózgu, wykorzystywane do złożonych analiz, takich jak rozpoznawanie obrazu, przetwarzanie języka i prognozowanie. Sieci neuronowe są podstawą zaawansowanych technik, takich jak deep learning.

- **Przetwarzanie języka naturalnego (NLP):** technologie umożliwiające interakcję z komputerami w języku naturalnym. NLP znajduje zastosowanie w chatbotach, tłumaczeniach maszynowych oraz analizie sentymentu, co pozwala maszynom na zrozumienie i interpretację mowy ludzkiej.
- **Algorytmy predykcyjne:** algorytmy oparte na danych historycznych, które przewidują przyszłe zachowania lub wyniki. Są stosowane w zarządzaniu produkcją, prognozowaniu popytu oraz konserwacji predykcyjnej.
- **Systemy rekomendacyjne:** algorytmy personalizujące treści i rekomendujące produkty lub usługi użytkownikom na podstawie analizy ich zachowań. Znajdują zastosowanie w handlu elektronicznym, marketingu i platformach streamingowych.
- **Algorytmy optymalizacyjne:** metody matematyczne wykorzystywane do optymalizacji procesów przemysłowych i logistycznych. Pomagają one minimalizować koszty, zwiększać wydajność oraz usprawniać planowanie.

Mechanizm działania

- **Zbieranie danych:** AI wymaga dużych ilości danych, które mogą pochodzić z różnych źródeł, takich jak urządzenia IoT, bazy danych, multimedia i dokumenty. Dane te są zbierane, przygotowywane i oczyszczane przed użyciem.
- **Przetwarzanie i przygotowanie danych:** dane są przygotowywane do analizy, co obejmuje ich wstępne przetwarzanie, oczyszczanie, usuwanie błędów oraz transformację do formatu odpowiedniego dla algorytmów AI.
- **Trenowanie modeli:** modele AI są trenowane na bazie danych, co pozwala algorytmom na identyfikację wzorców i zależności. W przypadku uczenia nadzorowanego, model trenuje się na danych oznaczonych, natomiast w uczeniu nienadzorowanym na danych nieoznaczonych.
- **Ewaluacja i optymalizacja:** po przeszkoleniu, model jest testowany na nowych danych, aby ocenić jego skuteczność i dokładność. Modele AI są optymalizowane w celu minimalizacji błędów i dostosowania ich do wymagań aplikacji.
- **Implementacja i zastosowanie:** po przetestowaniu model jest wdrażany w środowisku produkcyjnym, gdzie przetwarza dane na bieżąco i podejmuje decyzje lub generuje prognozy w zależności od aplikacji.
- **Monitorowanie i aktualizacja:** modele AI wymagają regularnego monitorowania i aktualizacji, aby dostosować się do zmieniających się danych oraz warunków operacyjnych. Często stosuje się retrenowanie modeli, aby zachować ich dokładność i skuteczność.
- **Interakcja z użytkownikiem i systemami:** w zależności od aplikacji, systemy AI mogą komunikować się z użytkownikami przez interfejsy graficzne, chatboty lub z innymi systemami w sposób automatyczny, co pozwala na zdalne monitorowanie i kontrolę.

Zaawansowanie

Do najważniejszych aktów prawnych regulujących rozwój AI w Unii Europejskiej należy tzw. AI Act czyli akt o sztucznej inteligencji, którego celem jest stworzenie kompleksowych ram prawnych wspierających powstawanie i wykorzystanie godnej zaufania AI w Europie. Ustala on m.in. użycie jakiego rodzaju sztucznej inteligencji jest zabronione na terenie UE (np. systemy oceny społecznej – ang. social scoring), czy też poziomy ryzyka dla poszczególnych rozwiązań AI (np. jako przypadki wysokiego ryzyka określono AI m.in. w infrastrukturze krytycznej, oświacie, zatrudnianiu czy prawie). AI Act nakłada rygorystyczne obowiązki na systemy sztucznej inteligencji wysokiego ryzyka w celu ochrony obywateli UE¹⁸.

Komisja Europejska prowadzi również działania w zakresie „Apply AI Strategy” oraz „AI in Science Strategy”, których zadaniem jest wspomaganie rozwoju europejskiego ekosystemu sztucznej inteligencji.

Sztuczna inteligencja jest obecnie mocno promowana jako jeden z kluczowych czynników rozwoju technologii cyfrowych, głównie w kontekście automatyzacji, cyfryzacji procesów oraz wzrostu produktywności. Poziom zaawansowania rozwiązań AI zależy od rodzaju omawianych rozwiązań: sztuczna inteligencja w dziedzinach oprogramowania i algorytmicznych rozwija się dynamicznie, natomiast systemy autonomiczne mają wciąż charakter technologii wschodzących.

Sztuczna inteligencja w Polsce

„W dostępnych danych GUS i Eurostatu można zaobserwować wyraźne tendencje wzrostowe – w latach 2021-2023 odsetek wykorzystania AI, zarówno ogółem, jak i w każdej klasie wielkości firm, zwiększył się około dwukrotnie. Odsetek firm wykorzystujących sztuczną inteligencję w dużym stopniu zależy od klasy wielkości przedsiębiorstwa oraz rodzaju prowadzonej działalności.

Największe różnice widoczne są pomiędzy odsetkiem małych i dużych firm wdrażających rozwiązania AI. Najwyższy poziom wykorzystania sztucznej inteligencji obserwuje się wśród dużych przedsiębiorstw – wzrósł on z 17,46% w 2021 r. do 24,38% w 2023 r. oraz do 32,96% w 2024 r. Natomiast AI najrzadziej wykorzystywana jest w małych firmach – w 2021 r. było to zaledwie 1,88%, w 2023 r. 2,25%, a w 2024 r. 3,93%. Choć odsetek tych przedsiębiorstw również zwiększał się w czasie, tempo wzrostu było zdecydowanie wolniejsze niż w pozostałych klasach wielkości.

W 2024 r. aż 94,1% firm nie korzystało z rozwiązań sztucznej inteligencji, z czego 3,2% przedsiębiorstw deklaroowało rozważanie wdrożenia tego typu rozwiązań. Oznacza to wzrost o 1,2 p.p. w porównaniu do 2023 r., kiedy jedynie 2% firm rozważało wdrożenie technologii AI. Wśród powodów braku wykorzystania sztucznej inteligencji w 2024 r. firmy najczęściej wskazywały brak zasobów ludzkich oraz wiedzy dotyczącej wykorzystania technologii AI

¹⁸ Patrz np. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/regulatory-framework-ai>; <https://artificialintelligenceact.eu/>

(1,9%, wzrost o 0,6 p.p. r/r). Do pozostałych przyczyn zaliczano m.in. zbyt wysokie koszty wdrożenia, brak jasności regulacyjnej, obawy dotyczące naruszenia prywatności lub ochrony danych, trudności w dostępie do danych, a także niezgodność z posiadanym sprzętem lub oprogramowaniem. Najbardziej wskazywaną barierą były wątpliwości etyczne (0,9% – wzrost z 0,5% w 2023 r.).

W porównaniu ze średnią unijną widoczny jest znacznie niższy poziom wdrażania rozwiązań sztucznej inteligencji w polskich przedsiębiorstwach. W latach 2021-2023 różnica ta oscylowała w granicach nieco powyżej 4 p.p., natomiast w 2024 r. wzrosła do 7,58 p.p. Również w podziale na klasy wielkości przedsiębiorstw widoczne są różnice pomiędzy firmami polskimi i unijnymi korzystającymi z rozwiązań AI. Podobnie jak w Polsce, także w UE najwyższy poziom wykorzystania AI obserwowany jest wśród dużych przedsiębiorstw, natomiast najniższy – wśród firm małych. W latach 2021–2023 wzrost odsetka firm unijnych korzystających z AI był wyraźny i wynosił od 5,83 p.p. do 12,76 p.p. w zależności od klasy wielkości. Jednakże we wszystkich klasach przedsiębiorstw, w całym badanym okresie, firmy unijne konsekwentnie przewyższały firmy polskie pod względem poziomu wykorzystania AI.

W przypadku firm unijnych, podobnie jak w Polsce, najczęściej wskazywaną przyczyną braku wykorzystania AI był brak zasobów ludzkich oraz wiedzy w zakresie zastosowań tej technologii – w 2024 r. odsetek ten wyniósł 7,1%. Wśród pozostałych barier istotną rolę odgrywały obawy dotyczące ochrony prywatności oraz kwestie prawne – rok do roku widoczny jest wyraźny wzrost odsetka firm zgłaszających tego typu obawy. Co istotne, odsetek przedsiębiorstw wskazujących bariery techniczne, takie jak brak odpowiedniej jakości danych czy niezgodność z innymi rozwiązaniami technologicznymi, był niższy niż w przypadku barier prawnych i regulacyjnych.

GUS i Eurostat zbierają dane dotyczące celów wykorzystania sztucznej inteligencji w przedsiębiorstwach do których zaliczają się:

- bezpieczeństwo ICT,
- działalność badawczo-rozwojowa lub innowacyjna,
- finanse, księgowość, controlling,
- logistyka,
- organizacja pracy i prace biurowe,
- proces marketingu lub sprzedaży,
- proces produkcji,
- rekrutacja, zarządzanie zasobami ludzkimi, zarządzanie kadrami,
- wspomaganie procesu produkcji lub świadczenia usług,
- zarządzanie przedsiębiorstwem, wspomaganie procesów decyzyjnych.

W latach 2021-2024 widoczny jest stały, choć niewielki, wzrost odsetka firm, które korzystają z rozwiązań sztucznej inteligencji do ww. celów. W badanym okresie wzrost ten nie przekroczył 2 p.p. dla żadnego z analizowanych obszarów zastosowań. W 2024 r. sztuczna inteligencja najczęściej była wykorzystywana w procesach marketingu i sprzedaży (2,4%) oraz

w procesach organizacyjno-zarządczych (2,2%). Ogółem wartości dla poszczególnych zastosowań mieściły się w przedziale 1,4-2,4%.

Odsetek firm wykorzystujących AI do konkretnych celów jest wyższy wśród przedsiębiorstw unijnych niż wśród firm polskich. Także w UE obserwowany jest systematyczny wzrost wykorzystania AI w poszczególnych celach, przy czym tempo tego wzrostu jest wyższe niż w Polsce – szczególnie w obszarze marketingu i sprzedaży, gdzie różnica pomiędzy 2021 r. a 2024 r. wyniosła 3 p.p. Podobnie jak w Polsce, również w UE największą popularnością cieszyły się te same obszary zastosowań, tj. marketing lub sprzedaż (4,6%) oraz organizacja procesów administracyjnych i zarządzania (3,7%).

W latach 2021-2024 w większości analizowanych technologii AI można zaobserwować wzrost ich wykorzystania wśród przedsiębiorstw rok do roku, przy jednoczesnych znaczących różnicach w skali ich stosowania. Największy wzrost dotyczył technologii generowania języka naturalnego – z 0,3% do 2,4% (wzrost o 2,1 p.p.). Można przypuszczać, że jest to związane z dynamicznym rozwojem rozwiązań opartych na tej technologii, takich jak ChatGPT, które stały się powszechnie dostępne dla użytkowników Internetu, w tym przedsiębiorców, a ich wykorzystanie w codziennej pracy nie wymaga zaawansowanych kompetencji technicznych. Najmniejszy wzrost odnotowano w przypadku autonomicznych pojazdów i dronów – w latach 2021-2024 wyniósł on zaledwie 0,1 p.p. (z 0,4% do 0,5%).

W przypadku przedsiębiorstw unijnych również obserwowany jest stały wzrost wykorzystania poszczególnych technologii AI. Najbardziej dynamiczny wzrost rok do roku wystąpił w latach 2023-2024 i wahał się od 0,1 p.p. (autonomiczne roboty i drony) do 4 p.p. (text mining). Drugą pod względem wykorzystania technologią było generowanie języka naturalnego – w 2024 r. korzystało z niej 5,4% firm. Najniższy wzrost, podobnie jak w Polsce, odnotowano w przypadku autonomicznych robotów i dronów – wyniósł on 0,1 p.p. (z 0,9% do 1%).¹⁹

W 2025 r. polski rząd przyjął „Politykę rozwoju sztucznej inteligencji w Polsce do 2030 r.”, który to dokument przedstawia wizję rozwoju polskiego ekosystemu AI na kolejne lata²⁰.

Do najważniejszych polskich inicjatyw związanych ze sztuczną inteligencją należą polskie fabryki AI oraz modele PLLuM i Bielik.AI.

W Polsce obecnie funkcjonują dwie fabryki AI (ogólnie w UE ma ich powstać 19). Pierwszą z nich jest [PIAST-AI](#) działająca przy Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym²¹. Drugą z nich jest [Gaia AI Factory](#) działająca przy Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet w Krakowie²².

¹⁹ Fragment ten pochodzi z raportu „Wybrane technologie cyfrowe i stopień ich wykorzystania w przedsiębiorstwach w latach 2019-2025”, PARP, 2026.
<https://www.parp.gov.pl/component/publications/publication/wybrane-technologie-cyfrowe-i-stopien-ich-wykorzystania-w-przedsiębiorstwach-w-latach-2019-2025>

²⁰ <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/polityka-rozwoju-sztucznej-inteligencji-w-polsce-do-2030-roku--bezpieczne-i-odpowiedzialne-wykorzystanie-sztucznej-inteligencji>

²¹ <https://www.pcass.pl/piast-ai/>

²² <https://www.cyfronet.pl/pl/projects/initiatives/eurohpc-ju/gaia-ai-factory>

[PLLuM](#) jest to inicjatywa, której celem jest stworzenie otwartego polskiego modelu językowego oddającego złożoność języka polskiego. Ma on być wykorzystywany w sektorach publicznym (np. wirtualny asystent w mObywatel) i prywatnym. Model jest udostępniany na otwartej licencji oraz jako czat.

[Bielik.AI](#) jest to społeczny projekt tworzenia polskich modeli dużych modeli językowych (LLM) działający jako non-profit. Jego celem jest zapewnienie dostępu do polskiego,, lokalnego i niezależnego modelu AI, który rozumie polski język i kulturę. W jego ramach prowadzone są również działania edukacyjne i popularyzujące AI. Projekt jest niekomercyjny.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/ALL/?uri=CELEX%3A32024R1689>
2. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52025DC0724>
3. <https://www.eu-cloud-ai-act.com/>
4. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:52025DC0723>
5. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX:52025DC0165&qid=1773653830156>
6. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/regulatory-framework-ai>
7. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/polityka-rozwoju-sztucznej-inteligencji-w-polsce-do-2030-roku--bezpieczne-i-odpowiedzialne-wykorzystanie-sztucznej-inteligencji>
8. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/nowa-polityka-ai---dolacz-do-konsultacji-i-pomoz-wspoltworzyc-przyszlosc-cyfrowej-Polski>

Dodatkowe materiały

1. <https://bielik.ai/>
2. <https://pllum.org.pl/>
3. <https://ai.gov.pl/>
4. <https://www.gov.pl/web/ai/>
5. <https://www.pcass.pl/piast-ai/>
6. <https://www.cyfronet.pl/pl/projects/initiatives/eurohpc-ju/gaia-ai-factory>
7. <https://www.ibm.com/think/machine-learning#605511093>
8. https://cyberprofilaktyka.pl/blog/deepfake-jak-sztuczna-inteligencja-moze-nas-oszukiwac_i40.html
9. <https://ose.gov.pl/aktualnosci/wpis/sekret-y-sztucznej-inteligencji-model-collapse-czyli-czego-ai-uczy-sie-na-bledach>
10. <https://www.gov.pl/web/ai/czym-jest-sztuczna-inteligencja2>
11. <https://artificialintelligenceact.eu/>
12. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/769492/EPRS_BRI\(2025\)769492_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/769492/EPRS_BRI(2025)769492_EN.pdf)

13. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/745708/EPRS_ATA\(2023\)745708_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/745708/EPRS_ATA(2023)745708_EN.pdf)
14. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775859/EPRS_BRI\(2025\)775859_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775859/EPRS_BRI(2025)775859_EN.pdf)

Półprzewodniki, fotonika i mikroelektronika

Fotonika i optoelektronika (ang. Photonics and Optoelectronics)

Opis technologii

Definicja

Fotonika i optoelektronika: to dziedziny technologii zajmujące się generowaniem, wykrywaniem, przetwarzaniem i kontrolą światła oraz innych form promieniowania elektromagnetycznego. Fotonika odnosi się do technologii opartej na świetle (fotonach), natomiast optoelektronika obejmuje urządzenia i systemy, które przekształcają energię świetlną na sygnały elektryczne i odwrotnie. W kontekście Przemysłu 4.0, fotonika i optoelektronika są kluczowe w aplikacjach takich jak komunikacja optyczna, sensoryka, przetwarzanie obrazów, produkcja precyzyjna oraz medycyna.

Podstawowe rodzaje

- **Komunikacja optyczna:** transmisja danych przy użyciu światła (np. światłowody) umożliwia szybki przesył informacji na duże odległości z minimalnymi stratami.
- **Sensoryka optyczna:** wykorzystanie sensorów opartych na fotonice i optoelektronice do pomiarów, takich jak detekcja zanieczyszczeń, pomiary temperatury, analizy chemiczne.
- **Przetwarzanie obrazów i wizualizacja:** kamery optyczne i systemy przetwarzania obrazów wykorzystywane do kontroli jakości, automatyzacji produkcji oraz medycyny.
- **Mikroobróbka laserowa:** technika wykorzystywania laserów do precyzyjnej obróbki materiałów, która znajduje zastosowanie w produkcji komponentów elektronicznych i biotechnologii.

Przykładowe wykorzystania

- **Informatyka i telekomunikacja:** światłowody, foniczne układy scalone, sensoryka optyczna, aparaty fotograficzne itp.
- **Przemysł i wytwarzanie:** technologie laserowe do specjalistycznych i precyzyjnych zastosowań np. mikroobróbki, cięcia, grawerowania, oznaczania materiałów (w celu ich śledzenia w cyklu produkcji), spawania, obróbki powierzchniowej różnych materiałów, w tym szkła, ogniw słonecznych, płytek półprzewodnikowych, półprzewodników, ceramiki, metali, polimerów oraz materiałów medycznych.
- **Medycyna:** technologie laserowe i optyczne stosowane są w diagnostyce, terapii oraz chirurgii (np. korekcja wad wzroku), umożliwiając precyzyjne zabiegi i analizy.
- **Branża fotowoltaiczna:** fotonikę wykorzystuje się do produkcji i zwiększania wydajności ogniw słonecznych.

- **Lotnictwo:** systemy LiDAR (ang. Light Detection and Ranging to technologia teledetekcji, która wykorzystuje wiązki laserowe do precyzyjnego pomiaru odległości i ruchu w otoczeniu w czasie rzeczywistym).
- **Motoryzacja:** fotoniczne chipy, diody wykorzystywane w reflektorach, czujniki laserowe i LiDAR wykorzystywane w samochodach autonomicznych.
- **Rolnictwo i leśnictwo:** obserwacja i rozpoznawanie bieżącego stanu roślin i zwierząt.
- **Branża obronna i technologie podwójnego zastosowania:** sensory, detektory, rozwiązania telekomunikacyjne, systemy obrazowania w podczerwieni (widzenie nocne), lasery (np. systemy naprowadzania).
- **Robotyka:** sensory, obrazowanie i technologie łączności.
- **Technologie kosmiczne:** technologie telekomunikacyjne, nawigacyjne i sensoryka.
- **Kosmetologia:** technologie optyczne do diagnozy chorób skóry, lasery IPL (ang. intense pulsed light) używane do m.in. usuwania blizn, tatuaży i owłosienia ciała oraz odnowy skóry.

Powiązane technologie

- **Sztuczna inteligencja:** algorytmy AI analizują dane z czujników optycznych i systemów przetwarzania obrazów, co umożliwia dokładne rozpoznawanie wzorców i automatyzację procesów decyzyjnych.
- **Big Data:** sensory optyczne generują ogromne ilości danych, które są analizowane w aplikacjach Big Data, np. do analizy obrazu w czasie rzeczywistym.
- **Internet Rzeczy:** fotonika wspiera technologie IoT poprzez tworzenie wysoce czułych czujników optycznych wykorzystywanych do monitorowania środowiska i maszyn.
- **Bliźniak cyfrowy:** fotonika jest wykorzystywana do zbierania danych potrzebnych do tworzenia cyfrowych modeli rzeczywistych procesów i urządzeń.
- **Automatyzacja:** optoelektronika wspiera automatyzację procesów produkcyjnych, szczególnie w obszarach, które wymagają precyzyjnego monitorowania i kontroli jakości.

Podstawowe elementy

- **Laser:** źródło światła o dużej koherencji, które emituje skupioną wiązkę światła wykorzystywaną w precyzyjnej obróbce, komunikacji oraz medycynie. Lasery mogą być stosowane w różnorodnych procesach, od cięcia materiałów po diagnostykę medyczną.
- **Diody elektroluminescencyjne (LED) i laserowe (LD):** komponenty emitujące światło wykorzystywane w oświetleniu, wyświetlaczach oraz w komunikacji optycznej. LED-y

są stosowane w szerokim zakresie urządzeń oświetleniowych, a LD służą m.in. do transmisji danych w sieciach optycznych.

- **Światłowody:** przewody optyczne, które umożliwiają transmisję sygnałów świetlnych na duże odległości z minimalnymi stratami. Są podstawowym elementem sieci komunikacji optycznej i znajdują zastosowanie w telekomunikacji oraz medycynie.
- **Fotodetektory (np. fotodiody, fototranzystory):** urządzenia przekształcające sygnały świetlne na sygnały elektryczne, wykorzystywane w czujnikach, systemach przetwarzania obrazu oraz w komunikacji optycznej.
- **Modulatory optyczne:** urządzenia, które zmieniają właściwości sygnału świetlnego, takie jak intensywność lub długość fali, co jest wykorzystywane w transmisji danych oraz systemach detekcyjnych.
- **Filtry optyczne:** komponenty używane do selektywnego przepuszczania lub blokowania określonych długości fal światła, co umożliwia precyzyjne pomiary i kontrolę w systemach optycznych.
- **Kryształy i materiały optyczne:** materiały, takie jak kwarc, szkło optyczne i kryształy fotoniczne, które są wykorzystywane do tworzenia soczewek, pryzmatów i innych elementów optycznych, wpływając na kształtowanie i kierowanie promieni świetlnych.

Mechanizm działania

- **Generowanie światła:** źródła światła, takie jak lasery i diody LED, generują wiązki świetlne o określonych właściwościach, które są wykorzystywane w różnych zastosowaniach. Lasery oferują wysoką precyzję, natomiast diody LED znajdują szerokie zastosowanie w oświetleniu.
- **Przekazywanie światła:** światłowody oraz inne systemy optyczne przekazują sygnały świetlne, umożliwiając ich transmisję na duże odległości bez znaczących strat. W systemach komunikacji optycznej wykorzystywane są światłowody, które zapewniają szybki i stabilny przekaz danych.
- **Modulacja i manipulacja światłem:** modulatory optyczne zmieniają intensywność, długość fali lub kierunek wiązki świetlnej, co jest stosowane w transmisji danych oraz w czujnikach optycznych, które wymagają precyzyjnej kontroli nad światłem.
- **Wykrywanie i przetwarzanie sygnałów:** fotodetektory odbierają sygnały świetlne i przekształcają je na sygnały elektryczne, które są następnie analizowane. W aplikacjach takich jak przetwarzanie obrazów, fotodetektory odgrywają kluczową rolę w zbieraniu danych optycznych.
- **Analiza i interpretacja danych:** dane optyczne są przetwarzane i analizowane przez systemy komputerowe, w tym AI, co pozwala na automatyczną analizę obrazu, wykrywanie wzorców oraz podejmowanie decyzji w oparciu o dane wizualne.

- **Zastosowanie praktyczne:** w zależności od aplikacji, przetworzone dane optyczne mogą być wykorzystane do monitorowania środowiska, kontrolowania jakości w produkcji, diagnostyki medycznej oraz w precyzyjnych procesach przemysłowych, takich jak obróbka laserowa.

Zaawansowanie

Według danych z raportu Marketsandmarkets w 2025 r. wartość światowego rynku fotoniki wyniosła 1,094 miliarda USD. Przewidywana wartość rynku fotoniki ma wzrosnąć do 1481,8 mld USD w 2030 r. ze skumulowanym rocznym wskaźnikiem wzrostu na poziomie 6,3% w latach 2025-2030²³.

Komisja Europejska uznała fotonikę za jedną z kluczowych technologii prorozwojowych (ang. Key Enabling Technology – KET) dla Europy.

Rozwiązania fotoniki wykorzystywane są w wielu dziedzinach – niektóre z nich są na etapie badań, natomiast niektóre z nich są powszechnie wykorzystywaną częścią codziennego życia. Do najczęściej spotykanych rozwiązań fotoniki należą m.in. światłowody, lasery (np. kosmetyczne lub w drukarkach laserowych), kamery i ekrany (np. komputerowe, smartfonów i telewizyjne), zdalne sterowanie (np. pilot do telewizora), skanery, sensory, urządzenia CD/DVD/Blu-Ray, a także diody LED.

Fotonika w Polsce

Według opublikowanego w 2024 r. raportu „The Professional Electronics, Microelectronics and Photonics Sector in Poland” opracowanego przez PARP i Łukasiewicz – IMiF branża fotoniki w Polsce charakteryzuje się dobrymi wynikami eksportowymi, rozbudowanymi możliwościami badań i rozwoju, a także dynamicznie rozwijającą się bazą przemysłową.

Według informacji zawartych w najnowszej strategii „Polityka dla sektora półprzewodników 2025+” opracowanej przez Ministerstwo Cyfryzacji w Polsce działa obecnie ok. 200 podmiotów z branży fotoniki²⁴.

Do projektów w obszarze fotoniki należy m.in. [HyperPIC](#), który jest realizowany przez VIGO Photonics, Politechnikę Warszawską i Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (IMiF). Celem tej inicjatywy jest rozwój technologii fotoniki scalonej oraz stworzenie krajowej platformy do produkcji zaawansowanych układów fonicznych. Ma on także odpowiadać na potrzeby zastosowań fotoniki w czujnikach, komunikacji optycznej, systemach mobilnych, diagnostyce zdalnej i obronności²⁵.

Do polskich organizacji działających w obszarze fotoniki należą m.in. Centrum Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (Łukasiewicz – ImiF), Polskie Stowarzyszenie Foniczne i Polska Platforma Technologiczna Fotoniki.

²³ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/photonics-market-88194993.html>

²⁴ <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/uchwala-rady-ministrow-w-sprawie-przyjecia-polityki-publicznej-pod-nazwa-polska-w-grze-o-przyszlosc---polityka-dla-sektora-polprzewodnikow-2026>

²⁵ Tamże.

Centrum Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki (Łukasiewicz - IMiF), jest częścią sieci Łukasiewicz. Działania instytutu obejmują badania naukowe i prace rozwojowe w obszarach: mikro-, nanoelektroniki, optoelektroniki, inżynierii materiałowej, fotoniki (w tym nanofotoniki), elektroniki mikrofalowej, energoelektroniki, elektroniki drukowanej, przeźroczystej i giętkiej. Instytut zajmuje się opracowywaniem technologii wytwarzania nowych materiałów, a także badaniem ich właściwości oraz możliwości wykorzystania w różnych gałęziach przemysłu m.in. energetyce, elektronice, fotonice, medycynie, przemyśle lotniczym, obronnym, kosmicznym, branży motoryzacyjnej oraz innych sektorach gospodarki. Celem IMiF jest również współpraca ze środowiskiem biznesowym m.in. w zakresie komercjalizacji, a także sprzedaży i dostawy towarów i usług opracowanych przez IMiF.

Polskie Stowarzyszenie Fotoniczne (ang. Photonics Society of Poland – PSP) jest to organizacja konsolidująca krajowe środowisko naukowo-techniczne i zrzeszająca osoby (naukowców, przedsiębiorców, studentów, doktorantów oraz administratorów nauki) związanych z fotoniką i optoelektroniką. Do celów PSP należy m.in. popularyzacja wiedzy, rozwój sieci kontaktów pomiędzy naukowcami, inżynierami i praktykami z dziedziny fotoniki i nauk pokrewnych (optyka, telekomunikacja optyczna, metrologia, techniki laserowe, optoelektronika), a także reprezentowanie krajowego środowiska nauki i techniki. Oficjalnie stowarzyszenie działa od 2008 roku.

Polska Platforma Technologiczna Fotoniki (PPTF) jest to organizacja powstała w dniu 27 lutego 2013 roku w siedzibie PCO S.A. Jej powstanie było wspólną inicjatywą polskich przedsiębiorstw, stowarzyszeń, wyższych uczelni oraz instytutów badawczych działających w obszarze fotoniki. Misją PPTF jest zwiększenie innowacyjności polskiego przemysłu fotonicznego poprzez koordynację działań polskich przedsiębiorców, jednostek naukowych, administracji rządowej i samorządowej, a także organizacji pozarządowych w zakresie opracowywania nowych technologii i wyrobów optoelektronicznych, rozwoju kadr oraz szerszego wykorzystania technologii fotonicznych w Polsce. Wizją PPTF jest dynamiczny rozwój fotoniki i optoelektroniki w Polsce, aby do 2030 r. polska branża fotoniki stała się znaczącym i uznanym graczem europejskim, dostarczającym kluczowe technologie i innowacyjne produkty na potrzeby przemysłu krajowego i międzynarodowego. W ramach PPTF funkcjonuje Klaster Mikroelektroniki, Elektroniki i Fotoniki (microEPC).

W ramach Instytutu łączności funkcjonuje Zespół Badań i Zastosowań w Dziedzinie Fotoniki.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://www.trade.gov.pl/brand-hub-sektor-elektroniki-profesjonalnej-mikroelektroniki-i-fotoniki/>
2. <https://imif.lukasiewicz.gov.pl/>
3. <https://pptf.pl/>
4. <https://www.paih.gov.pl/en/wp-content/uploads/sites/2/2025/09/Semiconductors-industry-in-Poland-2025.pdf>

5. <https://en.parp.gov.pl/component/publications/publication/the-professional-electronics-microelectronics-and-photonics-sector-in-poland>
6. <https://www.photonics21.org/>
7. <https://perspectivasolutions.com/co-to-jest-fotonika-polski-wklad-w-swiat-fotoniki/>
8. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/photonics>
9. <https://photonics.pl/>
10. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/photonics-market-88194993.html>
11. <https://www.gov.pl/web/instytut-lacznosci/zespol-badan-i-zastosowan-w-dziedzinie-fotoniki>

Mikro- i nanoelektronika (ang. Micro- and nanoelectronics)

Opis technologii

Definicja

Mikro i nanoelektronika: to dziedziny technologii zajmujące się projektowaniem oraz produkcją elektronicznych komponentów i układów w skali mikrometrowej i nanometrowej. Mikroelektronika odnosi się do miniaturyzacji urządzeń do poziomu mikrometrów, natomiast nanoelektronika obejmuje skalę nanometrową, gdzie dominują zjawiska kwantowe, które mogą być wykorzystywane do tworzenia nowych rodzajów urządzeń i materiałów. Mikro i nanoelektronika stanowią fundament współczesnych technologii informatycznych i komunikacyjnych, umożliwiając rozwój wydajnych i energooszczędnych układów scalonych, sensorów, procesorów oraz pamięci stosowanych m.in. w urządzeniach mobilnych, komputerach, robotyce i IoT.

Podstawowe rodzaje

- **Mikroprocesory i układy scalone:** Elementy stosowane w komputerach, urządzeniach mobilnych, systemach sterowania, umożliwiające wydajne przetwarzanie informacji.
- **Sensory MEMS:** Mikroskopijne urządzenia mechaniczne, które mogą mierzyć parametry fizyczne, takie jak ciśnienie, temperatura, przyspieszenie, stosowane w medycynie, motoryzacji, automatyce.
- **Tranzystory nanometrowe:** Kluczowe elementy stosowane w nowoczesnych procesorach, które dzięki miniaturyzacji oferują większą wydajność i niższe zużycie energii.
- **Pamięci nieulotne (np. Flash, MRAM):** Komponenty przechowujące dane bez potrzeby stałego zasilania, wykorzystywane w telefonach, komputerach, samochodach i urządzeniach IoT.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** Miniaturyzacja układów elektronicznych wspiera automatyzację poprzez rozwój małych i wydajnych systemów kontrolnych stosowanych w robotyce, liniach produkcyjnych i autonomicznych maszynach.
- **Big Data:** Mikro i nanoelektronika umożliwia rozwój wydajnych procesorów do przetwarzania dużych ilości danych, co przyspiesza analizy Big Data.
- **Cyberbezpieczeństwo:** Technologie mikro i nanoelektroniki są kluczowe dla rozwijania specjalizowanych modułów kryptograficznych, które zabezpieczają dane przed nieautoryzowanym dostępem.

- **Internet Rzeczy:** Miniaturowe układy elektroniczne pozwalają na integrację sensorów i procesorów w urządzeniach IoT, umożliwiając monitorowanie i przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym.
- **Sztuczna inteligencja:** Układy specjalizowane, takie jak procesory neuronowe, wspierają zastosowania AI, zwiększając wydajność i energooszczędność obliczeń.

Podstawowe elementy

- **Tranzystory i układy scalone:** Tranzystory są podstawowymi komponentami, które w połączeniu tworzą układy scalone (IC), odpowiedzialne za przetwarzanie i przechowywanie danych. Nanoelektronika pozwala na tworzenie tranzystorów nanometrowych, które zwiększają gęstość mocy obliczeniowej w procesorach.
- **Sensory MEMS (ang. Micro-Electro-Mechanical Systems):** Mikroskopijne urządzenia łączące elementy mechaniczne i elektroniczne. Sensory MEMS mierzą zmiany środowiskowe, takie jak przyspieszenie, wilgotność, a także wibracje i znajdują zastosowanie m.in. w telefonach, samochodach i urządzeniach medycznych.
- **Układy SOC (ang. System-on-a-Chip):** Zintegrowane układy scalone, które łączą różne funkcje, takie jak przetwarzanie, pamięć i kontrolę wejścia/wyjścia w jednym chipie. SOC są stosowane w smartfonach, systemach wbudowanych i urządzeniach IoT, umożliwiając miniaturyzację i zwiększenie efektywności energetycznej.
- **Pamięci flash i nowoczesne pamięci nieulotne (NVM):** Pamięci nieulotne przechowują dane bez konieczności zasilania. Nanoelektronika pozwala na rozwój pamięci MRAM, PRAM czy ReRAM, które oferują większą wydajność, trwałość i są wykorzystywane w urządzeniach przenośnych i systemach wbudowanych.
- **Nanowarstwy i nanostruktury:** Nanowarstwy stosowane w nanoelektronice pozwalają na tworzenie materiałów o specjalnych właściwościach, takich jak przewodnictwo czy odporność na ciepło. Nanostruktury są wykorzystywane w procesach litografii, co umożliwia produkcję bardziej zaawansowanych komponentów elektronicznych.
- **Technologie litograficzne (ang. Extreme Ultraviolet Lithography – EUV):** Technologie umożliwiające tworzenie miniaturowych struktur na podłożach półprzewodnikowych, co jest kluczowe dla produkcji tranzystorów i układów scalonych w nanoskali.

Mechanizm działania

- **Projektowanie układów:** Projektowanie układów scalonych i innych komponentów wymaga tworzenia schematów elektronicznych i symulacji działania w oparciu o zaawansowane modele. Projektanci używają narzędzi CAD do tworzenia precyzyjnych układów, które są następnie przenoszone na poziom fizyczny.
- **Produkcja w technologii półprzewodnikowej:** Mikro i nanoelektronika wykorzystują technologie półprzewodnikowe, takie jak krzem, w procesach produkcyjnych, które

obejmują naświetlanie, trawienie oraz nanoszenie nanowarstw i struktur półprzewodnikowych.

- **Litografia i nanoskala:** Procesy litograficzne, zwłaszcza EUV, pozwalają na nanoszenie nanostruktur na podłoża, co umożliwia tworzenie tranzystorów i innych elementów w skali nanometrowej, zwiększając gęstość obliczeniową i efektywność energetyczną.
- **Testowanie i kontrola jakości:** Wytworzone układy są testowane pod kątem poprawności działania i zgodności z projektem. Testy obejmują sprawdzanie parametrów elektrycznych, a także symulacje warunków pracy, aby upewnić się, że komponenty spełniają wymagania dotyczące wytrzymałości i wydajności.
- **Integracja z systemami:** Mikro i nanoelektronika umożliwiają integrację z innymi systemami elektronicznymi, co pozwala na rozwój kompleksowych urządzeń, takich jak smartfony, systemy wbudowane oraz urządzenia IoT. Systemy SOC i sensory MEMS są montowane w finalnych produktach, które następnie trafiają do użytkowników.
- **Optymalizacja energetyczna:** Ze względu na niewielkie rozmiary, mikro i nanoelektronika koncentrują się na wydajności energetycznej, co jest szczególnie ważne w urządzeniach mobilnych i IoT. Dzięki miniaturyzacji, urządzenia te zużywają mniej energii, co pozwala na dłuższą pracę przy zasilaniu bateryjnym.

Przykładowe wykorzystania

- **Elektronika konsumencka:** telewizory, laptopy, smartfony, smartwatche i inne urządzenia elektroniczne.
- **Przemysł motoryzacyjny:** samochody autonomiczne, zaawansowane systemy kontroli silnika, układy bezpieczeństwa, nawigacja, systemy komunikacji i rozrywki w pojazdach.
- **Medycyna:** urządzenia do monitorowania funkcji życiowych.
- **Przemysł lotniczy i kosmiczny:** układy sterownicze, układy monitorowania, sensory.
- **Energia odnawialna:** kontrolery i inwertery zastosowane w panelach fotowoltaicznych, wiatrakach i innych systemach odnawialnych źródeł energii.
- **Telekomunikacja:** sieciach przewodowe, łączność bezprzewodowa np. 5G.
- **Przemysł zbrojeniowy:** zaawansowanych systemy komunikacyjne, radary, drony i uzbrojenie.
- **Automatyzacja i robotyzacja:** systemy sterowania m.in. robotami przemysłowymi, manipulatorami i procesami produkcyjnymi.
- **Przemysł elektroniczny:** proces produkcji układów scalonych i komponentów mikroelektronicznych.

- **Biotechnologie:** zaawansowane narzędzia do badania i manipulacji materiałów biologicznych na poziomie molekularnym.
- **Budownictwo inteligentne:** systemy zarządzania budynkami.
- **Cyberbezpieczeństwo:** zaawansowane systemy zabezpieczeń cyfrowych, takie jak kryptografia kwantowa i technologie identyfikacji biometrycznej.
- **Przemysł filmowy:** produkcja efektów specjalnych, animacji komputerowych, kamer 3D i innych technologii związanych z przemysłem filmowym.
- **Technologie ubieralne (ang. wearables):** okulary rozszerzonej rzeczywistości, biometryczne opaski fitness i inne urządzenia śledzące zdrowie i aktywność.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://www.paih.gov.pl/wp-content/uploads/2025/08/The-Professional-Electronics-Sector-2025.pdf>
2. <https://www.paih.gov.pl/wp-content/uploads/2025/08/Branza-polprzewodnikow-w-Polsce-2025.pdf>
3. <https://en.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/The Professional-Electronics Microelectronics and Photonics Sector FINAL-24 09 2024.pdf>
4. <https://pptf.pl/klaster-mikroelektroniki-elektroniki-i-fotoniki/>
5. <https://imif.lukasiewicz.gov.pl/>
6. <https://cezamat.pw.edu.pl/home/>
7. <https://www.expertmarketresearch.com/reports/microelectronics-market>

Półprzewodniki (ang. Semiconductors)

Opis technologii

Definicja

Półprzewodniki: są to materiały o specyficznych właściwościach fizycznych, które w zależności od warunków mogą zmieniać swoje właściwości elektryczne. Pozwala to na kontrolowany przepływ prądu elektrycznego, a co za tym idzie precyzyjne sterowanie przepływem informacji lub energii.

Przewodzenie prądu w półprzewodnikach może zmienić się poprzez procesy fizyczne (np. podgrzewanie lub oświetlanie) lub domieszki (ang. doping) innych pierwiastków do struktury krystalicznej półprzewodnika.

Najczęściej wykorzystywanymi materiałami półprzewodnikowymi są pierwiastki z grupy czternastej układu okresowego (krzem i german) oraz związki pierwiastków z grup trzynastej i piętnastej np. arsenek galu, azotek galu, antymonek indu lub dwunastej i szesnastej – np. tellurek kadmu. Materiały półprzewodnikowe są najczęściej wytwarzane w postaciach: monokryształów, polikryształów i proszków (np. grafitowego).

Dzięki możliwości modyfikowania właściwości elektrycznych półprzewodników są one niezbędnym materiałem w produkcji tranzystorów, układów scalonych (czipów), mikroprocesorów, pamięci półprzewodnikowych i innych zminiaturyzowanych komponentów elektronicznych.

Wielkościami fizycznymi, które pozwalają zakwalifikować dany materiał do półprzewodników są:

- **Opór elektryczny właściwy:** miara zdolności materiału do stawiania oporu przepływającemu prądowi elektrycznemu. Dla półprzewodników wartości te wynoszą w granicach $1-10^4 \Omega$ (om).
- **Szerokość energetycznej przerwy wzbronionej:** energia, jaką muszą uzyskać elektrony związane z atomem, aby stały się elektronami swobodnymi i stały się nośnikami prądu. Dla półprzewodników typowa przerwa wzbroniona wynosi 0,1-3 eV (elektronowolt).

Rodzaje półprzewodników

Samoistne: półprzewodniki, których materiał jest idealnie czysty, bez żadnych zanieczyszczeń struktury krystalicznej. W przypadku pierwiastków występuje tylko jeden rodzaj atomów, a w przypadku związków półprzewodnikowych - liczba łączących się atomów dwóch pierwiastków jest jednakowa. Są to np. krzem (Si), german (Ge), boron (B), węgiel (C).

Domieszkowe (niesamoistne): półprzewodniki, w których do sieci krystalicznej atomu macierzystego dodawane są atomy obcych pierwiastków różniących się wartościowością, co wpływa na ich właściwości przewodzące. Zamiana atomu półprzewodnika na odpowiedni

atom domieszki powoduje pojawienie się nadmiaru bądź niedoboru elektronów. Są to np. arsenek galu (GaAs), azotek galu (GaN), antymonek indu (InSb), tellurek kadmu (CdTe).

Półprzewodniki domieszkowe dzieli się na dwie grupy:

- **Typ n (donorowy):** półprzewodnik, w którym w wyniku domieszkowania zwiększa się ilość ujemnych nośników prądu czyli elektronów swobodnych.
- **Typ p (akceptorowy):** półprzewodnik, w którym domieszkowanie zwiększa ilość dodatnich nośników prądu czyli tzw. dziur – wolnych miejsc po brakującym elektronie w wiązaniu międzyatomowym.

Półprzewodniki o szerokiej przerwie energetycznej/szerokopasmowe (ang. Wide Bandgap Semiconductors – WBS): są to materiały półprzewodnikowe (np. azotek galu – GaN lub węgiel krzemu – SiC) o przerwie energetycznej powyżej 2 eV, czyli szerszej niż standardowe półprzewodniki (np. krzem). Wpływa to na ich właściwości, w tym m.in.: lepszą odporność na wysokie temperatury, możliwość działania pod większym napięciem prądu elektrycznego oraz ograniczenie strat mocy nawet o 50%. Wykorzystanie np. GaN lub SiC pozwala na budowanie mniejszych, chłodniejszych i bardziej wydajnych układów np. przełączających oraz kompaktowych systemów zasilania, przetwornic, transformatorów i elementów pasywnych. Dzięki temu WBS mogą być używane w zastosowaniach wymagających przesyłania dużych ilości energii i odporności na wysokie temperatury np. w centrach danych i infrastrukturze AI.

Półprzewodniki stanowią fundament współczesnego świata – są one niezbędnym elementem różnego rodzaju elektroniki, używanej we wszystkich dziedzinach przemysłu i życia codziennego. Do przykładowych wykorzystania półprzewodników należą:

- procesory (chipy) komputerowe,
- elektronika użytkowa m.in. komputery, smartfony, laptopy, tablety, telewizory, smartfony i in.
- diody LED i OLED,
- ogniwa fotowoltaiczne,
- lasery,
- infrastruktura dla sztucznej inteligencji (np. GPU).

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://www.paih.gov.pl/wp-content/uploads/2025/08/Branza-polprzewodnikow-w-Polsce-2025.pdf>
2. <https://www.kearney.com/industry/technology/article/back-end-semiconductor-manufacturing-attractiveness-index>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act>
4. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-new-plan-for-europe-s-sustainable-prosperity-and-competitiveness/file-chips-act-ii>
5. <https://zpe.gov.pl/b/co-to-sa-polprzewodniki/Pvd8J2ztH>
6. <https://zpe.gov.pl/b/polprzewodniki-typu-n/Px0nAGMEz>

7. <https://zpe.gov.pl/b/polprzewodniki-typu-p/PYn2l4rCW>
8. <https://www.ibm.com/think/topics/semiconductors>

Układy scalone/mikrochipy/chipy (ang. Integrated circuits/microchips/chips)

Opis technologii

Definicje

Mikrochip (także układ scalony, chip, IC – ang. integrated circuit): to zespół zminiaturyzowanych obwodów elektronicznych umieszczonych na płycie monokryształu półprzewodnikowego (najczęściej krzemu). Nazywane są one monolitycznymi półprzewodnikowymi układami scalonymi, ponieważ wszystkie elementy takiego chipu, a także połączenia elektryczne pomiędzy elementami, wytwarzane są równocześnie i są wynikiem szeregu operacji technologicznych wykonywanych na płycie półprzewodnikowej.

Ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne materiałem półprzewodnikowym najczęściej wykorzystywanym w produkcji chipów jest krzem.

Układy scalone można podzielić na trzy główne kategorie:

Cyfrowe: przetwarzają dyskretne sygnały elektryczne, tj. takie, które zmieniają się w sposób skokowy lub impulsowy w czasie. Najczęściej są to sygnały o dwóch poziomach napięć: wysoki (H – high) i niskim (L – low). Operują na sygnałach binarnych, dzięki czemu mogą być wykorzystywane do aplikacji logicznych i sterujących m.in. przeprowadzania operacji logicznych i arytmetycznych, a także sterować innymi układami i urządzeniami.

Do cyfrowych układów scalonych zaliczają się:

- **Układy logiczne:** podstawowe komponenty elektroniki cyfrowej, przetwarzają i manipulują danymi binarnymi. Sygnały wejściowe reprezentowane są przez stany wysokie (1) lub stany niskie (0), które przetwarzane są zgodnie z zasadami operacji logicznych, aby wytworzyć określony sygnał wyjściowy. Podstawowe układy tego typu nazywa się bramkami logicznymi.
- **Procesor (ang. Central Processing Unit – CPU):** centralna jednostka obliczeniowa, główny cyfrowy układ scalony obsługujący wszystkie podstawowe instrukcje i zadania systemowe, odpowiedzialny za prawidłowe przeprowadzenie wszelkich procesów w komputerze. Procesor pobiera dane z pamięci, interpretuje je i wykonuje jako rozkazy identyfikowane na podstawie binarnego kodu maszynowego. Następnie zwraca dane do pamięci lub wyjściowego strumienia danych. Procesor wykonuje wszystkie obliczenia i koordynuje pracę pozostałych podzespołów, decydując, które elementy powinny zająć się pojawiającymi się zadaniami. Ważnym parametrem procesora jest częstotliwość taktowania. Drugim podstawowym parametrem określającym procesor jest liczba bitów (nazywana długością słowa procesora), na których procesor wykonuje operacje. Długość słowa procesora jest równa szerokości jego magistrali danych (liczbie bitów). Od długości słowa procesora zależy m.in. jego moc obliczeniowa. Innymi ważnymi cechami jest liczba rdzeni (fizycznych, zawierających

jednostkę wykonawczą oraz pamięć podręczną) i ilość wątków (rdzeni logicznych), które dzięki wielowątkowości mogą być jednocześnie wykonywane na nieaktywnych częściach pojedynczego rdzenia fizycznego²⁶.

- **Procesor graficzny (GPU):** to wyspecjalizowany układ elektroniczny przeznaczony do cyfrowego przetwarzania obrazów oraz przyspieszania grafiki komputerowej, występujący zarówno jako osobna karta graficzna, jak i układ wbudowany w płyty główne, telefony komórkowe, komputery osobiste, stacje robocze i konsole do gier. Procesory graficzne są coraz częściej wykorzystywane do przetwarzania danych w ramach sztucznej inteligencji (AI) dzięki możliwości przyspieszania obliczeń z zakresu algebry liniowej, która znajduje również szerokie zastosowanie w przetwarzaniu grafiki.
- **Przerzutniki:** to układy cyfrowe zdolne do przechowywania stanu logicznego, co czyni je kluczowymi elementami pamięci w systemach cyfrowych. Mogą przechowywać bit informacji do momentu zmiany ich stanu przez sygnał wejściowy. Przerzutniki są wykorzystywane w rejestrach, licznikach i układach synchronizacji.
- **Liczniki:** to układy cyfrowe, które zliczają impulsy wejściowe, co pozwala na śledzenie liczby zdarzeń lub generowanie określonych sekwencji sygnałów. Liczniki są stosowane w zegarach cyfrowych, licznikach zdarzeń, systemach czasowych oraz w układach podziału częstotliwości.
- **Mikrokontrolery:** to zaawansowane układy scalone, które integrują jednostkę centralną (CPU), pamięć oraz różnorodne peryferia na jednym chipie. Są one używane do sterowania urządzeniami i procesami w szerokim zakresie zastosowań, od prostych systemów wbudowanych po złożone systemy automatyki przemysłowej. Mikrokontrolery umożliwiają realizację skomplikowanych zadań sterowania i przetwarzania danych.
- **Mikroprocesory:** to układy cyfrowe, które zawierają jednostkę centralną (CPU) zdolną do wykonywania operacji arytmetycznych, logicznych i sterujących. W odróżnieniu od mikrokontrolerów, mikroprocesory nie mają zintegrowanej pamięci i peryferiów, co pozwala na elastyczne zastosowanie w komputerach, serwerach i innych zaawansowanych systemach obliczeniowych.
- **Układy pamięci:** układy przeznaczone do przechowywania danych binarnych. Podstawą ich konstrukcji są tzw. **nośniki danych**, czyli przedmiot fizyczny, pozwalający na zapis i ponowny odczyt informacji, np. taśma filmowa, dyskietka, dysk twardy, płyta CD, DVD i Blu-ray, pamięć USB (pendrive) i in. Pamięć cyfrowa może być półprzewodnikowa (np. RAM, ROM, SSD), optyczna (np. CD, DVD, flash) lub magnetyczna (np. dyskietki). Rodzaj nośnika określa właściwości, przeznaczenie i zastosowanie układów pamięci.
 - **Pamięć RAM (ang. Random-Access Memory):** Pamięć operacyjna komputera o dostępie swobodnym, w której przechowywane są aktualnie wykonywane

²⁶ <https://zpe.gov.pl/a/slowniczek-elementy-zestawu-komputerowego/DbhEDFhQl>

programy (w tym system operacyjny) wraz z niezbędnymi danymi oraz wynikami ich pracy. Każda komórka pamięci ma swój unikatowy adres, dzięki któremu procesor, poprzez magistrale systemu, uzyskuje do niej dostęp. Kość RAM dostarczana jest na pojedynczych płytkach pamięci i może mieć różne pojemności. Wielkość zainstalowanej w komputerze pamięci określa się w gigabajtach, a pojedynczy moduł może mieć pojemność od kilku do kilkuset GB. Pamięć operacyjna instalowana jest w specjalnych gniazdach umieszczonych na płycie głównej komputera. Komputery mogą być wyposażone w różną ilość pamięci operacyjnej. Pamięć operacyjna jest pamięcią ulotną, co oznacza, że po wyłączeniu zasilania komputera jej zawartość jest kasowana²⁷.

- **Pamięć ROM (ang. Read-Only Memory):** Pamięć stała tylko do odczytu. Zawarte są w niej wszystkie informacje potrzebne komputerowi do rozpoczęcia pracy. Jej zawartość jest zaprogramowana w procesie produkcji komputera i w zasadzie nie jest zmieniana w trakcie jego eksploatacji. Pamięć ROM jest pamięcią nieulotną, zachowuje zapisane na niej dane nawet po odłączeniu urządzenia od zasilania²⁸.

Analogowe: przetwarzają ciągłe sygnały elektryczne, które mogą przyjmować dowolną wartość w danym zakresie, tj. pracują z sygnałami o różnej amplitudzie i częstotliwości. Sygnały te mogą być wzmacniane, filtrowane, modulowane i demodulowane, a także przekształcane. Układy scalone tego typu używane są tam, gdzie kluczowa jest precyzyjna obróbka wysoko dokładnych i stabilnych sygnałów. Do urządzeń wykorzystujących analogowe mikrochipy należą np. sprzęt medyczny, systemy komunikacyjne, systemy audio i wideo oraz urządzenia pomiarowe.

Do analogowych układów scalonych zalicza się np.

- **Wzmacniacze operacyjne:** pozwalają na wzmacnianie sygnałów elektrycznych, wzmacnianie napięcia, różnicowe wzmacnianie sygnałów, integracja, różniczkowanie, oraz operacje arytmetyczne. Są one stosowane w aplikacjach wymagających wysokiej precyzji, takich jak systemy medyczne do monitorowania pacjentów, systemy audio do wzmacniania sygnałów dźwiękowych, oraz systemy pomiarowe do dokładnych pomiarów elektrycznych.
- **Generatory funkcji:** są układami scalonymi, które mogą generować różne przebiegi sygnałów, takie jak sinusoidalne, trójkątne i prostokątne. Są one używane w aplikacjach testowych i diagnostycznych, gdzie niezbędne jest dostarczanie kontrolowanych sygnałów do badanych układów.

Mieszane układy scalone: to urządzenia elektroniczne, które łączą funkcje zarówno układów analogowych, jak i cyfrowych. Dzięki tej hybrydowej naturze mogą przetwarzać zarówno

²⁷ <https://zpe.gov.pl/a/slowniczek-elementy-zestawu-komputerowego/DbhEDFhQl>

²⁸ Tamże.

ciągłe sygnały analogowe, jak i dyskretne sygnały cyfrowe, co pozwala na szerokie zastosowanie w różnych zaawansowanych technologiach. Należą do nich m.in. przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, a także generatory DCO, procesory dźwięku czy pętle synchronizacji fazowej (PLL).

Układy scalone można również klasyfikować według przeznaczenia, możliwości przeprogramowania oraz sposobu budowy chipu.

- **Układy scalone przeznaczone dla konkretnych zastosowań (ang. Application-Specific Integrated Circuit – ASIC):** układy scalone zaprojektowane w celu wykonywania konkretnego zadania, tworzone na zamówienie konkretnego klienta. Nie jest możliwe jego przeprogramowanie – logika obliczeniowa jest projektowana od podstaw i zapisana na trwałe w strukturze fizycznej chipu
- **Układy ASSP (ang. Application-Specific Standard Product):** układ scalony zaprojektowany i wyprodukowany do realizacji określonego zadania. W przeciwieństwie do ASIC są to rozwiązania dostępne komercyjnie, przez co są one bardziej uniwersalne i mogą być wykorzystywane przez różnych producentów do realizacji tych samych zadań.
- **Układy FPGA (ang. Field-Programmable Gate Arrays):** to programowalne układy logiczne, które można konfigurować do wykonywania specyficznych zadań logicznych. Umożliwiają one realizację złożonych algorytmów i prototypowanie układów cyfrowych bez konieczności projektowania nowego hardware'u. FPGA są wykorzystywane w telekomunikacji, przetwarzaniu sygnałów, systemach wbudowanych i wielu innych aplikacjach.
- **Układy typu „system-on-a-chip” (SoC):** integrują elementy komputera w jednym układzie scalonym, w tym m.in. procesor, procesor graficzny, pamięć, porty wejścia i wyjścia oraz pamięć masową. Układ SoC zazwyczaj zawiera specjalistyczne układy logiczne, które optymalizują obsługę określonego rodzaju danych. Zoptymalizowany układ SoC zapewnia najwyższą możliwą wydajność przy jednoczesnym zminimalizowaniu zużycia energii i rozmiarów systemu.

Podstawowe elementy

- **Tranzystory:** półprzewodnikowy element elektroniczny służący do sterowania przepływem prądu. Mogą pełnić funkcję przełącznika (steruje przepływem prądu w obwodach logicznych) i wzmacniacza (wzmacnia sygnały elektryczne w układach analogowych).
- **Rezystory:** elementy ograniczające przepływ prądu, co chroni inne elementy chipu i reguluje napięcie. Cechują się stałą wartością oporu, co zmniejsza natężenie prądu płynącego przez obwód.
- **Kondensatory:** służą do magazynowania i uwalniania energii elektrycznej, tj. w zależności od napięcia szybko gromadzą i uwalniają ładunek. Pozwala to na stabilizację napięcia i filtrację sygnałów (usuwanie zakłóceń).

- **Diody półprzewodnikowe:** to elementy, które ukierunkowują przepływ prądu elektrycznego, tj. umożliwiają przepływ w jednym kierunku, a blokują go w kierunku przeciwnym. Wykonywane są z pierwiastków lub związków o specyficznych właściwościach fizykochemicznych, takich jak np. krzem (Si) lub german (Ge), które pozwalają na kontrolowanie przepływu prądu.
- **Induktory:** elementy magazynujące energię w postaci pola magnetycznego. Gromadzą one energię, kiedy przepływa przez nie prąd. Energia ta jest uwalniana, kiedy prąd przestaje płynąć przez induktor (zanika wytworzone pole magnetyczne).
- **Wafel krzemowy, płytka krzemowa, podłoże krzemowe, plaster krzemowy:** jest to cienka płytka monokrystalicznego krzemu, używana do wytwarzania przyrządów półprzewodnikowych, ogniw słonecznych oraz mikroukładów elektromechanicznych. Wafel uzyskuje się przez cięcie krystalicznego krzemu, jest podstawowym elementem wyjściowym w mikroelektronice. Najstarszą i wciąż jedną z najpowszechniej wykorzystywanych metod otrzymywania monokryształów krzemu do produkcji wafli jest tzw. metoda Czochralskiego, opracowana w 1916 r. przez polskiego chemika Jana Czochralskiego.
- **Obudowy**

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://botland.com.pl/blog/rodzaje-ukladow-scalonych/>
2. <https://botland.com.pl/blog/uklady-logiczne-czym-sa-i-do-czego-sluza/>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act>
4. <https://www.chips-ju.europa.eu/>
5. <https://lepsyserwis.pl/termin/asic-application-specific-integrated-circuit/>
6. <https://zpe.gov.pl/a/slowniczek-elementy-zestawu-komputerowego/DbhEDFhQl>
7. <https://www.tme.eu/pl/news/library-articles/page/63950/jak-dzialaja-podstawowe-elementy-ukladow-scalonych/>

Zaawansowanie mikroelektroniki, półprzewodników i chipów

Mikroelektronika, technologie półprzewodnikowe oraz układy scalone są fundamentem współczesnych technologii cyfrowych. Sektor tych technologii ma ugruntowaną pozycję jako sektor dojrzały, o dużym znaczeniu strategicznym.

Globalny rynek mikroelektroniki w 2025 r. osiągnął wartość 481.87 miliardów USD. Według przewidywań do 2035 r. wartość ta ma wzrosnąć do 838.84 miliardów USD²⁹.

Natomiast według danych World Semiconductor Trade Statistics globalny rynek półprzewodników w 2025 r. osiągnął wartość 796 miliardów USD. Jest to wzrost o 26,2% r/r. W 2025 roku światowy przemysł półprzewodników odnotował najlepszy wynik w historii, osiągając poziom bliski 800 mld USD. Zgodnie z najnowszą prognozą WSTS oczekuje się, że w 2026 roku światowa sprzedaż półprzewodników będzie nadal rostała, a branża zbliży się do granicy 1 biliona USD³⁰.

Globalne trendy w tym obszarze technologicznym są kształtowane m.in. przez rosnące zapotrzebowanie na moc obliczeniową związane z rozwojem sztucznej inteligencji. Ważnym czynnikiem są również zakłócenia łańcuchów dostaw surowców potrzebnych do produkcji urządzeń elektronicznych np. pierwiastków ziem rzadkich, które związane są m.in. z aktualną sytuacją geopolityczną³¹.

Rozwijanie krajowego potencjału, kompetencji i produkcji w zakresie mikroelektroniki, półprzewodników oraz chipów oceniane jest jako jeden z fundamentów suwerenności cyfrowej. Dlatego też zarówno na poziomie globalnym, europejskim, jak i krajowym prowadzone są różne działania mające na celu rozwój branży np. wprowadzanie aktów prawnych (unijny [Chips Act](#), krajowa Polityka dla sektora półprzewodników 2026+) oraz projekty B+R (np. [WBG Pilot Line](#), [InnoSemi](#)).

[Chips JU](#) jest to partnerstwo, w ramach którego prowadzone są działania mające na celu wzmocnienie europejskiego ekosystemu technologii w obszarach mikro i nanoelektroniki oraz produkcji układów scalonych.

Ekosystem mikroelektroniki, półprzewodników i chipów w Polsce

Aktualnie (kwiecień 2026 r.) trwają prace nad [polityką publiczną dot. sektora półprzewodników](#), która będzie również wpływać na sektor mikroelektroniki.

Według danych PAIH w 2023 r. w branży elektroniki funkcjonowało ponad 470 podmiotów, a wartość dodana brutto branży wyniosła 16.69 miliarda PLN. W 2024 r. zatrudnienie w sektorze osiągnęło poziom 63 700 pracowników. W tym samym roku wartość polskiego eksportu elektroniki wyniosła 8,157.3 m USD.

²⁹ <https://www.expertmarketresearch.com/reports/microelectronics-market>

³⁰ <https://www.wsts.org/76/Global-Semiconductor-Market-grows-26-in-2025-to-796B>

³¹ „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji”, PARP, Warszawa, 2026.

W 2024 r. PARP rozpoczął program promocji sektora elektroniki profesjonalnej, mikroelektroniki i fotoniki w ramach projektu niekonkurencyjnego „Umiędzynarodowienie MŚP – BRAND HUB”, działanie 2.26 programu „Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki 2021-2027” (FENG).

Głównym celem programu jest prezentacja polskiej oferty produktów i usług sektora elektroniki profesjonalnej, mikroelektroniki i fotoniki wśród partnerów zagranicznych oraz promocja Polski jako kraju wytwarzającego zaawansowane technologie i usługi, oferującego interesujące i innowacyjne rozwiązania, posiadającego potencjał do rozwoju na rynkach zagranicznych. Z programu mogą skorzystać polskie firmy działające w obszarze elektroniki profesjonalnej, mikroelektroniki oraz fotoniki, poszukujące partnerów zagranicznych.

W ramach programu realizowane są działania promocyjne nakierowane na promocję całego sektora elektroniki profesjonalnej, mikroelektroniki i fotoniki oraz promocję polskiej gospodarki.

W 2024 r. opublikowany został raport „The Professional Electronics, Microelectronics and Photonics Sector in Poland” opracowany przez PARP we współpracy z Łukasiewicz Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki. W ramach raportu przedstawiono stan polskiej sektora elektroniki, mikroelektroniki i fotoniki.

Według informacji zawartych w raporcie w Polsce funkcjonują firmy zarówno działające w modelu EMS (ang. electronic manufacturing services), jak i OEM (ang. original equipment manufacturer).

Branża EMS (kontraktowa produkcja elektroniki) obejmuje firmy specjalizujące się w świadczeniu usług produkcji elektronicznej na zlecenie. Oferują one szeroki zakres usług, od projektowania, przez montaż, aż po testowanie i dostawę gotowych produktów. Firmy z branży EMS zapewniają kompleksowe i elastyczne rozwiązania produkcyjne, dzięki czemu ich klienci mogą skupić się na innowacjach, marketingu i sprzedaży, bez konieczności inwestowania we własne zakłady produkcyjne.

OEM (produkcja oryginalnego sprzętu) to sektor branży elektronicznej, który specjalizuje się w projektowaniu, produkcji i dostarczaniu gotowych komponentów elektronicznych innym firmom. Wytwarzane w Polsce komponenty są wykorzystywane na całym świecie, w wielu różnych obszarach m.in. elektronika konsumencka, motoryzacja, rozwiązania dla przemysłu.

Według ustaleń raportu w Polsce prowadzone są również szeroko zakrojone działania B+R w zakresie rozwiązań dla różnorodnych producentów elektroniki oraz udział w międzynarodowych projektach badawczych. Podkreśla on także konieczność i znaczenie rozwoju produkcji w obszarze mikroelektroniki (np. układów scalonych) na polskim rynku. Raport zwraca również uwagę na wysoki poziom ekspertów, naukowców oraz lokalnych, polskich talentów działających w branży.

Od 2023 r. na polskim rynku funkcjonuje również [Klaster Mikroelektroniki, Elektroniki i Fotoniki](#) (microEPC). Inicjatorami powstania klastra byli Polska Platforma Technologiczna

Fotoniki (PPTF) oraz [Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii Politechniki Warszawskiej CEZAMAT](#).

W ramach sieci Łukasiewicz funkcjonuje [Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki](#) (Łukasiewicz – IMiF).

Według ustaleń projektu polityki „Polska w grze o przyszłość. Polityka dla sektora półprzewodników 2026+” przygotowanego przez Ministerstwo Cyfryzacji polski sektor półprzewodników, pomimo swego wschodzącego charakteru, wykazuje wyraźne oznaki zróżnicowania i specjalizacji³².

Według informacji zawartych w ww. projekcie dane dotyczące polskiego sektora półprzewodników są obecnie ograniczone, jednakże pozwalają na zidentyfikowanie kilku wyraźnych trendów i kompetencji.

Obecny kształt branży jest w znacznym stopniu wynikiem zmian zachodzących po 1989 r. Wcześniej istniejący przemysł mikroelektroniczny uległ rozpadowi, jednakże szereg kompetencji został zachowany w instytutach badawczych, uczelniach oraz prywatnych firmach. Dzisiejsze specjalizacje są ich kontynuacją, uzupełnioną o nowe impulsy technologiczne i współpracę z rynkami globalnymi³³.

Obszary specjalizacji i kompetencji występujące w polskim przemyśle półprzewodnikowym mogą zostać podzielone na trzy uzupełniające się ścieżki kompetencyjne, tj.:

- **Przełomowe innowacje:** fotonika scalona, materiały szerokoprzerwowe, mikrosystemy.
- **Integracja z globalnymi łańcuchami wartości:** projektowanie, wyspecjalizowane komponenty, narzędzia i systemy.
- **Zdolności strategiczne:** istotne dla bezpieczeństwa, transformacji energetycznej i suwerenności cyfrowej³⁴.

Według opracowania Ministerstwa Cyfryzacji do wyróżniających się obszarów należą:

- **Projektowanie układów scalonych i logika cyfrowa:** w Polsce rozwijane są kompetencje w zakresie projektowania układów scalonych, w tym specjalizowanych układów scalonych (ang. Application-Specific Integrated Circuit – ASIC)³⁵ oraz systemów hybrydowych (w tym tzw. architektury system na chipie – ang. System-on-

³² „Polska w grze o przyszłość. Polityka dla sektora półprzewodników 2026+”
<https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/uchwala-rady-ministrow-w-sprawie-przyjecia-polityki-publicznej-pod-nazwa-polska-w-grze-o-przyszlosc---polityka-dla-sektora-polprzewodnikow-2026>

³³ Tamże.

³⁴ Tamże.

³⁵ Układ scalony zaprojektowany w celu realizacji z góry określonego, konkretnego zadania.

Chip – SoC³⁶). W Polsce znajdują się zarówno krajowe oddziały międzynarodowych koncernów prowadzących działalność projektową, jak i firmy typu fabless³⁷.

- **Półprzewodniki szerokoprzerwowe (szerokopasmowe):** w kraju rozwijane są kompetencje w wytwarzaniu materiałów półprzewodnikowych będących alternatywą dla krzemu (Si). Są to zwłaszcza tzw. materiały III-V (z 13. i 15. grupy układu okresowego pierwiastków), takie jak: azotek galu (GaN), fosforek indu (InP) i fosforek galu (GaP), antymonek galu (GaSb), a także węglik krzemu (SiC). W Polsce technologie wykorzystujące węglik krzemu i azotek galu są wciąż na poziomie prac rozwojowych. Jednakże prognozowane zapotrzebowanie (np. w branży energetycznej) daje polskim podmiotom szansę na zagospodarowanie tej niszy rynkowej.
- **Fotonika scalona:** w polskich podmiotach rozwijane są technologie fotonicznych układów scalonych (ang. Photonics Integrated Circuits – PIC), koncentrujące się zwłaszcza na wykorzystaniu zakresu średniej podczerwieni. Według informacji zawartych w projekcie polityki polskie podmioty charakteryzują się unikalnym zestawem kompetencji i infrastruktury w tym obszarze, co może pozwolić na uzyskanie silnej pozycji w międzynarodowych łańcuchach wartości.
- **Inne zastosowania:** polskie podmioty wytwarzają również monokryształy półprzewodnikowe, a także prowadzą produkcję urządzeń i systemów wykorzystywanych w wytwarzaniu układów scalonych np. sprzęt do nanodruku, rozwiązania metrologiczne oraz systemy testowania. Jest to jednak produkcja na ograniczoną skalę. W Polsce można zaobserwować także rozwój kompetencji montażowych (np. działalność firmy Wilk Elektronik – jedyne go producenta modułów pamięci DRAM). W ramach ekosystemu działają także firmy specjalizujące się w budowie infrastruktury technicznej oraz ośrodki B+R globalnych firm. Choć według projektu polityki Ministerstwa Cyfryzacji nie mogą one na obecnym etapie zostać uznane za samodzielne specjalizacje, są to istotne elementy krajowego potencjału technologicznego, które powinny być wspierane w celu dalszego rozwoju.

Według informacji zawartych w projekcie polityki dot. półprzewodników, polskie podmioty posiadają głównie kompetencje w obszarze prowadzenia badań oraz projektowania. Natomiast największą lukę w polskim ekosystemie półprzewodników stanowią kolejne etapy produkcji, czyli tzw. front-end i back-end. W tych obszarach projekt określił krajowe kompetencje jako „ograniczone i niekompletne”.

Należy jednak zauważyć, że w przypadku potencjału polskiego segmentu back-end pojawiają się sprzeczne informacje. Według raportu „Back-End Semiconductor Manufacturing Attractiveness Index” opublikowanego przez Kearney, Polska znajduje się w globalnej

³⁶ Układ scalony zawierający kompletny system elektroniczny, w tym układy cyfrowe, analogowe (także radiowe) oraz cyfrowo-analogowe.

³⁷ Model biznesowy, który polega na projektowaniu i sprzedaży sprzętu elektronicznego i układów półprzewodnikowych przy jednoczesnym outsourcingu ich produkcji do wyspecjalizowanych producentów, zajmujących się wyłącznie produkcją (tzw. model foundry – odlewni). Nazwa pochodzi od ang. fabrication less – bez fabryk.

czołówe pod względem atrakcyjności tego segmentu (5. miejsce na świecie i 1. miejsce w UE)³⁸.

W obszarze wiedzy i kompetencji technologicznych fundament stanowią instytuty badawcze (m.in. Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Instytut Wysokich Ciśnień PAN - UNIPRESS, CEZAMAT Politechniki Warszawskiej) oraz uczelnie wyższe np. w Gdańsku, Krakowie, Łodzi, Poznaniu, Warszawie i Wrocławiu. W ośrodkach akademickich prowadzone są prace badawczo-rozwojowe w obszarze materiałów i zastosowań technologicznych w tym np. detektorów i fotoniki, techniki druku czy systemy projektowe. Projekt polityki zwraca uwagę na to, że choć ośrodki te współpracują ze sobą, wciąż brak jest spójnego planu rozwoju technologii, koordynacji działań i jasnego podziału ról.

W obszarze przemysłowym Polska posiada rozwinięte sektory m.in. AGD, elektroniki użytkowej, motoryzacji, technologii obronnych oraz systemów bezzałogowych i kosmicznych, które można uznać za oczywistych odbiorców wyprodukowanych półprzewodników.

Należy jednak zauważyć, że w związku z brakiem własnej produkcji układów scalonych na skalę przemysłową, Polska wciąż jest uzależniona od ich importu. W 2023 r. jego wartość wyniosła ok. 3,9 mld EUR.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-chips-act>
2. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-new-plan-for-europe-s-sustainable-prosperity-and-competitiveness/file-chips-act-ii>
3. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/uchwala-rady-ministrow-w-sprawie-przyjecia-polityki-publicznej-pod-nazwa-polska-w-grze-o-przyszlosc---polityka-dla-sektora-polprzewodnikow-2026>

Dodatkowe informacje

1. <https://www.trade.gov.pl/brand-hub-sektor-elektroniki-profesjonalnej-mikroelektroniki-i-fotoniki/>
2. <https://www.paih.gov.pl/en/wp-content/uploads/sites/2/2025/09/Semiconductors-industry-in-Poland-2025.pdf>
3. <https://en.parp.gov.pl/component/publications/publication/the-professional-electronics-microelectronics-and-photonics-sector-in-poland>
4. <https://www.paih.gov.pl/wp-content/uploads/2025/08/The-Professional-Electronics-Sector-2025.pdf>
5. <https://www.paih.gov.pl/wp-content/uploads/2025/08/Branza-polprzewodnikow-w-Polsce-2025.pdf>

³⁸ <https://www.kearney.com/industry/technology/article/back-end-semiconductor-manufacturing-attractiveness-index>

6. [https://en.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/The Professional-Electronics Microelectronics and Photonics Sector FINAL-24 09 2024.pdf](https://en.parp.gov.pl/storage/publications/pdf/The_Professional-Electronics_Microelectronics_and_Photonics_Sector_FINAL-24_09_2024.pdf)
7. <https://pptf.pl/klaster-mikroelektroniki-elektroniki-i-fotoniki/>
8. <https://imif.lukasiewicz.gov.pl/>
9. <https://cezamat.pw.edu.pl/home/>
10. <https://www.expertmarketresearch.com/reports/microelectronics-market>
11. <https://www.kearney.com/industry/technology/article/back-end-semiconductor-manufacturing-attractiveness-index>
12. <https://www.chips-ju.europa.eu/>

Sensoryka i percepcja maszynowa

Czujniki/sensory (ang. Sensors)

Opis technologii

Definicja

Sensory (czujniki): są to urządzenia, które przekształcają mierzone parametry fizyczne, biologiczne lub chemiczne na sygnał wyjściowy, który może być przetwarzany przez system automatyki.

Dziedziny naukowe powiązane z czujnikami to:

- **Metrologia:** nauka zajmująca się sposobami i zasadami dokonywania i interpretacji pomiarów.
- **Sensoryka:** to dział techniki zajmujący się budową, zasadą działania i zastosowaniem przetworników pomiarowych oraz sensorów.
- **Fotonika i optoelektronika:** to dziedziny technologii zajmujące się generowaniem, wykrywaniem, przetwarzaniem i kontrolą światła oraz innych form promieniowania elektromagnetycznego. Fotonika odnosi się do technologii opartej na świetle (fotonach), natomiast optoelektronika obejmuje urządzenia i systemy (w tym czujniki), które przekształcają energię świetlną na sygnały elektryczne i odwrotnie.

W powszechnym użyciu znajduje się wiele rodzajów czujników, mierzących bardzo zróżnicowane parametry, przy użyciu zróżnicowanych metod pomiaru. Sensory mogą zostać sklasyfikowane pod względem różnych kryteriów np.

- **typ:** czujniki analogowe lub cyfrowe,
- **przeznaczenie:** Internet Rzeczy (IoT), sensory przemysłowe,
- **mierzony parametr:** temperatura, dźwięk, ciśnienie, poziom materiału, obecność przedmiotu,
- **sposób działania:** magnetyczne, indukcyjne, fotoelektryczne,
- **stopień zintegrowania:** proste, zintegrowane, inteligentne.

Podstawowe rodzaje

Ponieważ istnieje wiele różnych rodzajów czujników, poniżej zostały przedstawione **wybrane przykłady** sensorów podzielonych według różnych kryteriów.

Podstawowym podziałem czujników jest podział na modele analogowe i cyfrowe.

- **Czujniki analogowe** wytwarzają sygnał o charakterze ciągłym w postaci określonego napięcia prądu (w przedziale od 0 do 5 V – 0 to brak parametru np. dźwięku, 5 to maksymalna wersja parametru np. najgłośniejszy dźwięk). Czujniki analogowe są uważane za dokładniejsze, ale wymagają konwersji na sygnał cyfrowy (co powoduje utratę części danych) oraz są bardziej podatne na zakłócenia. Tego typu czujniki

wykorzystuje się do mierzenia np. temperatury, ciśnienia, siły, prędkości, przyspieszenia, dźwięku i natężenia światła.

- **Czujniki cyfrowe** generują sygnały nieciągłe (tzw. dyskretne), składające się z pojedynczych bitów, które ponieważ generują sygnał cyfrowy bezpośrednio nie wymagają konwersji (w przeciwieństwie do czujników analogowych).

Czujniki można klasyfikować biorąc pod uwagę mierzone parametry np.:

- **Czujniki temperatury**
- **Czujniki ciśnienia**
- **Czujniki zbliżeniowe:** bezkontaktowe wykrywanie obecności różnych przedmiotów przed obszarem działania czujnika.
- **Sygnalizatory poziomowe:** detekcja poziomu cieczy lub materiału sypkiego w zbiorniku.
- **Sygnalizatory przepływu:** detekcja przepływu cieczy (np. woda w rurach).

Kolejnym kryterium podziału czujników jest ich sposób działania m.in.:

- **Indukcyjne:** wykorzystują indukcję magnetyczną.
- **Pojemnościowe:** wykorzystują zmianę pojemności.
- **Magnetyczne:** wykorzystują zmiany w strumieniu magnetycznym.
- **Fotoelektryczne (fotokomórki):** wykorzystują wiązki światła widzialnego lub podczerwonego, której przerwanie przez obiekt powoduje przestanie sygnału do odbiornika.
- **Ultradźwiękowe:** wykorzystują fale dźwiękowe.
- **Radarowe:** wykorzystują sygnał radarowy (porównanie sygnału wychodzącego z sygnałem odbitym pozwala na obliczenie odległości na podstawie różnicy częstotliwości).
- **Dyspersja termiczna:** wykorzystują różnice temperatur – w dwóch czujnikach zamontowane są grzałki – nieogrzewana i ogrzewana. Różnica temperatur zmienia się w zależności od przepływu lub braku, ponieważ przepływający czynnik chłodzi ogrzany czujnik. Różnica ta jest przetwarzana na sygnał wyjściowy sygnalizatora.

Stopień zintegrowania również używany jest jako kryterium podziału sensorów:

- **Sensory proste:** czujniki, które przetwarzają mierzoną wielkość fizyczną na wielkość elektryczną.
- **Sensory zintegrowane:** czujniki zawierające w swojej strukturze wbudowane elementy przetwarzające (np.: wzmacniacze, filtry, kondycjonery, przetworniki A/C).
- **Sensory inteligentne:** zaawansowane czujniki wyposażone w moduły przetwarzania danych oraz zdolność do komunikacji z innymi urządzeniami, które mogą dostarczać nie tylko podstawowe informacje o parametrach środowiska (np. temperatura, wilgotność, ciśnienie), ale także analizować te dane w czasie rzeczywistym, wykrywać wzorce oraz reagować na zmieniające się warunki.

- **Sensory kwantowe:** to urządzenia wykorzystujące właściwości mechaniki kwantowej, takie jak superpozycja, splątanie kwantowe i interferencja, w celu uzyskania niezwykle precyzyjnych pomiarów fizycznych, chemicznych lub biologicznych. Zmiany w stanach kwantowych czujników, wywołane oddziaływaniem z badanym obiektem, są interpretowane i analizowane, co pozwala na uzyskanie bardzo dokładnych wyników. W przeciwieństwie do tradycyjnych sensorów, które mają ograniczoną dokładność, sensory kwantowe mogą mierzyć zjawiska na poziomie subatomowym, co czyni je wyjątkowo czułymi. Dzięki dokładności pomiarów znajdują one zastosowanie w takich dziedzinach jak medycyna, nawigacja, telekomunikacja, nauki przyrodnicze i przemysł.

Podstawowe elementy

- **Czujnik (sensor):** element bezpośrednio zamieniający wielkość fizyczną na wielkość elektryczną.
- **Przetwornik:** urządzenie zamieniające jedną formę sygnału elektrycznego na inną np. przetwornik analogowo-cyfrowy.

Przykładowe wykorzystania

- **Inteligentne budynki:** monitorowanie zużycia energii, wykrywanie ruchu, mierzenie poziomu hałasu oraz sterowanie oświetleniem.
- **Opieka zdrowotna:** urządzenia (ang. wearables) noszone na ciele do monitorowania parametrów życiowych pacjentów.
- **Przemysł:** automatyzacja i tzw. przemysłowy Internet Rzeczy (ang. Industrial Internet of Things - IIoT), monitorowanie linii produkcyjnych (np. sortowanie i kontrola jakości produktów), monitorowanie stanu maszyn (konserwacja predykcyjna), monitorowanie warunków środowiskowych w czasie rzeczywistym.
- **Rolnictwo:** monitorowanie wilgotności gleby, poziomu składników odżywczych, inwazji szkodników oraz warunków pogodowych w celu optymalizacji nawadniania.
- **Logistyka:** śledzenie parametrów transportu w celu zapewnienia bezpieczeństwa towarów.
- **Motoryzacja:** czujniki ciśnienia oleju lub opon, czujniki temperatury silnika, akceleratory (np. uruchamianie poduszek powietrznych), czujniki zbliżeniowe w systemach wspomagania parkowania.
- **Automatyka domowa:** czujniki ruchu w systemach bezpieczeństwa, czujniki temperatury i wilgotności, czujniki gazu, czujniki światła, automatyka drzwi i bram.
- **Monitorowanie środowiska:** czujniki jakości powietrza, stacje meteorologiczne (pomiar temperatury, ciśnienia, wilgotności), badanie jakości wody.
- **Handel i łańcuchy dostaw:** czujniki RFID (śledzenie produktów), czujniki np. temperatury, pozwalające na zapewnienie odpowiednich warunków przechowywania.
- **Energetyka:** czujniki optymalizujące produkcję energii, czujniki pozwalające na zarządzanie dystrybucją energii.

Powiązane technologie

- **Sztuczna inteligencja:** algorytmy AI analizują dane z czujników i systemów przetwarzania obrazów, co umożliwia dokładne rozpoznawanie wzorców i automatyzację procesów decyzyjnych.
- **Big Data:** sensory generują ogromne ilości danych, które są analizowane w aplikacjach Big Data, np. do analizy obrazu w czasie rzeczywistym.
- **Internet Rzeczy:** to system wzajemnie połączonych urządzeń, maszyn, czujników, które komunikują się ze sobą oraz wymieniają dane przez Internet bez potrzeby interwencji człowieka. Sensory są podstawowym elementem sieci IoT.
- **Robotyka:** czujniki pozwalają robotom na monitorowanie otoczenia, wykrywanie przeszkód, nawigację oraz wykrywanie pozycji, ruchu i innych zmiennych potrzebnych w wykonywaniu zadań.
- **Bliźniak cyfrowy:** czujniki IoT zbierają dane z rzeczywistego obiektu lub procesu i przesyłają je do modelu cyfrowego.
- **Automatyzacja:** czujniki wspierają automatyzację procesów produkcyjnych, szczególnie w obszarach, które wymagają precyzyjnego monitorowania i kontroli jakości.

Zaawansowanie

Różnorodne czujniki są powszechnie wykorzystywane w wielu różnych obszarach zastosowań, zarówno naukowych, przemysłowych, jak i domowych. Ponieważ istnieje wiele różnych rodzajów sensorów o różnym poziomie zaawansowania technologicznego (nawet wykorzystujące technologie kwantowe) stopień ich rozpowszechnienia i sposoby wykorzystania będą bardzo różne.

Według informacji zawartych w raporcie opublikowanym przez Marketsandmarkets.com w 2025 r. wartość rynku sensorów wyniosła 3.24 mld USD. Przewidywany jest wzrost wartości do 5.41 mld USD w 2030 r. z CAGR w latach 2025-2030 na poziomie 10,8%³⁹.

Według raportu „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” obecnie za technologię wschodzącą można uznać sensorykę i percepcję maszynową⁴⁰. Jest to grupa technologii, która obejmuje rozwój systemów pozwalających maszynom na pozyskiwanie i interpretację informacji z otoczenia w czasie rzeczywistym przy użyciu różnego rodzaju czujników (np. optycznych, akustycznych, termicznych, chemicznych lub mechanicznych). Ma to na celu zapewnienie systemom technicznym możliwości „postrzegania” środowiska fizycznego, w którym się znajdują. Rozwiązania tego typu są niezbędne w funkcjonowaniu robotów, pojazdów autonomicznych oraz inteligentnych systemów przemysłowych.

³⁹ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/current-sensor-market-26656433.html>

⁴⁰ Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji, PARP, Warszawa, 2026.

Czujniki w Polsce

Normy regulujące różne rodzaje czujników publikowane są przez [Polski Komitet Normalizacyjny](#).

Za kwestie metrologiczne w Polsce opowiada [Główny Urząd Miar](#). GUM obecnie posiada obecnie jeden z najnowocześniejszych ośrodków metrologicznych na obszarze Europy Środkowo-Wschodniej. Otwarty we wrześniu 2024 roku Świętokrzyski Kampus Laboratoryjny Głównego Urzędu Miar położony przy ul. Wrzosowej w Kielcach składa się z ośmiu budynków, w tym laboratoriów: akustyki i drgań, czasu i częstotliwości, długości, masy, termometrii oraz metrologii interdyscyplinarnej. Obecnie kontynuowane są prace mające na celu otwarcie kolejnych laboratoriów – elektryczności oraz promieniowania.

Według raportu „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” obszar sensoryki i percepcji maszynowej w Polsce charakteryzuje się dość wysoką aktywnością publikacyjną, ale zidentyfikowano jedynie pojedyncze patenty w tej dziedzinie. Choć badanie nie zidentyfikowało startupów i scaleupów według przyjętej metodologii, na polskim rynku istnieją rozpoznawalne firmy prowadzące wieloletnią działalność w tym obszarze np. VIGO Photonics, InPhoTech, FIBRAIN, Synektik, Infermedica czy RADMOR.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i regulacje

1. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:8000:-210:ed-1:v1:en>
2. <https://www.pkn.pl/>

Dodatkowe materiały

1. <https://www.nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/definitions>
2. <https://cryo-space.pwr.edu.pl/wp-content/uploads/2023/05/automatyka-przemyslowa-wyklad-04.pdf>
3. <https://botland.com.pl/blog/czujnik-co-to-jest-i-do-czego-sluzyl/>
4. <https://botland.com.pl/blog/czujniki-i-przetworniki-pomiarowe/>
5. <https://strefainzyniera.pl/arttykul/1037/czujniki-analogowe-i-cyfrowe>
6. https://dbc.wroc.pl/Content/7205/PDF/czabanowski_sensory.pdf
7. <http://www.cirm.am.szczecin.pl/download/A1%20Metrologia%20-%20pojecia%20podstawowe.pdf>
8. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/current-sensor-market-26656433.html>

Technologie naprowadzające, nawigacyjne i lokalizacyjne (ang. guidance, navigation and localization technologies)

Opis technologii

Definicja

Technologie naprowadzania: są to różnorodne rozwiązania technologiczne, które wyznaczają, korygują oraz kontrolują trajektorię ruchu obiektów m.in. pojazdów, statków, samolotów, pocisków, rakiet i satelitów.

Technologie nawigacyjne: pozwalają na określenie aktualnej pozycji i orientacji obiektów oraz określenie optymalnej trasy z punktu startowego do punktu końcowego na podstawie danych pochodzących z różnorodnych sensorów i przyrządów nawigacyjnych m.in. kompasów, odbiorników GPS, szukaczy gwiazd, wysokościomierzy i systemów LORAN.

Technologie lokalizacyjne: narzędzia i systemy pozwalające na określenie w czasie rzeczywistym konkretnej lokalizacji np. osoby lub urządzenia.

Systemy naprowadzania, nawigacji i sterowania/kontroli (ang. Guidance, Navigation and Control Systems – GNC): kompleksowe systemy wykorzystywane do kontroli pozycji, ścieżki/trasy i ruchów danego obiektu. Naprowadzanie obejmuje aktualną pozycję pojazdu i trajektorię lotu do wyznaczonego celu, a także pożądane zmiany prędkości, obrotu i przyspieszenia niezbędne do podążania tą trajektorią. Nawigacja obejmuje pozycję i prędkość pojazdu (jego wektor stanu) oraz jego położenie (pozycję kątową w przestrzeni). Sterowanie obejmuje stosowanie elementów sterujących niezbędnych do realizacji poleceń naprowadzania przy jednoczesnym utrzymaniu stabilności platformy i płynnego ruchu do celu.

Rodzaje systemów naprowadzania

- **Samonaprowadzanie aktywne/aktywne naprowadzanie radarowe (ang. Active Radar Homing – ARH):** to metoda naprowadzania pocisku, w której pocisk wyposażony jest w nadajnik-odbiornik radarowy oraz układ elektroniczny niezbędny do samodzielnego wykrywania i śledzenia celu.
- **Samonaprowadzanie półaktywne:** polega na ciągłym odbieraniu fal elektromagnetycznych odbitych od celu, lecz wysyłanych przez nadajnik znajdujący się poza pociskiem. Do samonaprowadzania półaktywnego można używać nadajnika wysyłającego promieniowanie radiowe, widzialne, promieniowanie podczerwone lub fale akustyczne.
- **Samonaprowadzanie pasywne:** metoda samonaprowadzania pocisków, w której układ kierowania nie emituje własnego sygnału, lecz odbiera promieniowanie lub fale generowane przez cel. Stosuje się je w pociskach naprowadzanych na źródła promieniowania podczerwonego, świetlnego, radiowego lub akustycznego. Odbiornik

tych emisji znajduje się na pokładzie pocisku, wykorzystując naturalną sygnaturę celu do jego lokalizacji i śledzenia.

- **Naprowadzanie laserowe:** metoda kierowania obiektem (np. pociskiem, robotem itp.) do położenia docelowego przy pomocy wiązki laserowej.
- **Naprowadzanie po wiązce/naprowadzanie w wiązce prowadzącej (ang. beam-riding, line-of-sight beam riding, LOSBR):** to technika naprowadzania pocisku kierowanego na cel za pomocą wiązki radarowej albo laserowej. Nazwa odnosi się do sposobu lotu pocisku, który porusza się „wzdłuż” wiązki naprowadzającej skierowanej na cel.
- **Naprowadzanie na podczerwień:** wykorzystuje promieniowanie podczerwone emitowane przez obiekt w celu jego namierzenia. Specjalny detektor umieszczony w głowicy rakiety lokalizuje cel, a układy elektroniczne wprowadzają odpowiednie komendy do korekcji toru lotu pocisku.

Rodzaje nawigacji

- **Astronawigacja:** metoda nawigacji korzystająca z pomiarów wysokości astronomicznej⁴¹ ciał niebieskich, wykorzystująca takie instrumenty jak m.in. [szpat islandzki](#) (tzw. kamień słoneczny), [laska Jakuba](#), [astrolabium](#), [seksrans](#).
- **Terrestryczna:** rodzaj nawigacji morskiej oparty na obserwacji znaków nawigacyjnych i innych obiektów charakterystycznych znajdujących się wzdłuż wybrzeża.
- **Pilotowa:** rodzaj nawigacji wodnej z uwzględnieniem lokalnych znaków nawigacyjnych znajdujących się na danym akwenie wodnym i pobliskich terenach, stosowana m.in. w otoczeniu portów i prowadzących do nich drogach wodnych.
- **Zliczeniowa:** ustalanie przybliżonej pozycji obiektu (np. statku lub samolotu) poprzez obliczenie drogi przebytej od ostatniej pozycji obserwowanej⁴².
- **Sonar (ang. Sound Navigation and Ranging):** urządzenie wykorzystujące fale dźwiękowe różnej długości (krótkie, średnie lub długie) w celu nawigacji, komunikacji, detekcji, określania pozycji, śledzenia oraz klasyfikowania obiektów (ruchomych i nieruchomych) zanurzonych lub znajdujących się na powierzchni cieczy lub w powietrzu. Najczęściej używane w przypadku obiektów znajdujących się w wodzie.
- **LIDAR (ang. Light Detection and Ranging):** technologia teledetekcji pozwalająca na pomiar odległości poprzez oświetlanie celu światłem laserowym oraz pomiar jego odbicia za pomocą czujnika. Różnice wynikające z tego działania wykorzystywane są tworzenia trójwymiarowego modelu badanych obiektów, co pozwala na ocenę odległości od przedmiotu, prędkości czy też jego wyglądu lub gabarytów⁴³.

⁴¹ Wysokość astronomiczna – kąt pomiędzy płaszczyzną horyzontu astronomicznego (tj. okręgiem wielkim na sferze niebieskiej, którego płaszczyzna jest prostopadła do osi pionu) a obserwowanym obiektem.

⁴² Pozycja określona z ziemi, morza lub powietrza względem punktu o niezmienniej pozycji. Może być określona wzrokowo (np. przelot nad określonym obiektem stałym) lub za pomocą np. radaru.

⁴³ <https://www.politykabezpieczenstwa.pl/pl/a/czym-jest-lidar-i-do-czego-sluzy>

- **Nawigacja inercyjna/inercjalna/bezwładnościowa (ang. Inertial Navigation System – INS):** metoda nawigacji, w której do określania pozycji używane są przyspieszeniomierze i żyroskopy, czyli elementy pomiarowe wykorzystujące zasady dynamiki Newtona.
- **Radiowa:** [metody nawigacji](#) wykorzystujące fale radiowe przesyłane pomiędzy systemami nadajników radiowych – radiolatarni (w lotnictwie) lub radiopławów (w komunikacji morskiej). Do metod nawigacji radiowej zalicza się m.in. systemy LORAN (europejski system LORAN-C został wyłączony z generalnego użytku w 2015 r.; obecnie stosowany jest w meteorologii), radiolatarnie bezkierunkowe (ang. non-directional beacon – NDB), Instrument Landing System – ILS (wykorzystywany w lotnictwie cywilnym w celu precyzyjnego wspomagania lądowania samolotów w warunkach o ograniczonej widzialności pasa) i inne.
- **Satelitarna:** systemy radionawigacji wykorzystujące fale radiowe przesyłane przez sztuczne satelity w celu określania położenia punktów i poruszających się odbiorników wraz z parametrami ich ruchu na powierzchni Ziemi. Wyróżnia się następujące rodzaje tego typu nawigacji:
 - **[Global Navigation Satellite Systems \(GNSS\)](#):** systemy nawigacji satelitarnej działające na skalę globalną. Obecnie działają cztery systemy tego typu: [GPS](#) (amerykański), [GLONASS](#) (rosyjski), [Galileo](#) (europejski), [BeiDou](#) (chiński).
 - **[Regional Navigation Satellite Systems](#):** systemy nawigacji satelitarnej obejmujące określony obszar geograficzny. Obecnie funkcjonują dwa systemy tego typu: [Quasi-Zenith Satellite System QZSS](#) (japoński) oraz [Indian Regional Navigation Satellite System IRNSS/NavIC](#) (indyjski).
 - **[Satellite-based Augmentation Systems \(SBAS\)](#):** systemy poprawiające dokładność i niezawodność systemów GNSS poprzez korygowanie błędów pomiarowych. Należą do nich m.in. [EGNOS](#) (europejski), [WAAS](#) (amerykański), [GAGAN](#) (indyjski) lub [MSAS](#) (japoński).

Radiolokacja

Radiolokacja: wykorzystuje właściwości propagacyjne (tj. zjawisko rozchodzenia się i zjawisko odbicia od przeszkód) fal radiowych w celu określania położenia, prędkości i innych charakterystyk obiektu oraz uzyskiwania informacji dotyczących tych parametrów.

Radar: urządzenie pozwalające na radiolokację obiektów powietrznych, nawodnych i lądowych (w tym chmur i obiektów terenowych) oraz zjawisk fizycznych przy pomocy fal radiowych. Radar pozwala na określenie kierunku, odległości i rozmiarów obiektu, a w przypadku radaru dopplerowskiego również prędkości. Tzw. georadary można również wykorzystywać do penetracji gruntu, tj. tworzenia przekrojów geologicznych gruntów i skał, badania struktur budowli, wykrywania podziemnych przeszkód i pustych przestrzeni, a także wykrywania instalacji podziemnych oraz stanowisk archeologicznych.

Przykładowe wykorzystanie

- **Systemy naprowadzania w wojskowości** np. w broni raketowej, systemach przeciwlotniczych, broni precyzyjnego rażenia.
- **Transport i logistyka:** ogólnodostępne systemy nawigacji satelitarnej typu GNSS (np. GPS) wykorzystywane w różnych rodzajach transportu (drogowym, lotniczym, kolejowym i morskim) do np. wyznaczania optymalnych tras poruszania się pojazdów.
- **Geodezja:** wykorzystanie nawigacji GNSS np. przy pomiarach dużych lub trudnodostępnych (z ograniczoną widocznością linii horyzontu) obszarów.
- **Rolnictwo:** wykorzystanie nawigacji GNSS (głównie GPS) do np. mapowania pól, precyzyjnego prowadzenia maszyn rolniczych, precyzyjnego sadzenia oraz zarządzania uprawami, nawadnianiem i żywym inwentarzem (lokalizacja i śledzenie ruchu zwierząt hodowlanych).
- **Ochrona mienia:** wykorzystanie lokalizatorów GPS do np. lokalizacji skradzionych przedmiotów.
- **Archeologia:** Wykorzystanie GNSS i georadarów do lokalizacji i dokumentowania stanowisk archeologicznych.
- **Systemy autonomiczne i bezzałogowe:** różnego rodzaju systemy nawigacji, lokalizacji i naprowadzania są wykorzystywane do określania położenia, planowania tras oraz bezpiecznego poruszania się np. robotów, bezzałogowych pojazdów czy też dronów.

Systemy naprowadzania i nawigacyjne w Polsce

Do systemów naprowadzania i nawigacji produkowanych w Polsce zaliczają się:

Zespoły naprowadzania produkowane przez firmę [CRW TELESYSTEM-MESKO](#), w tym dla przenośnego przeciwlotniczego zestawu raketowego GROM/PIORUN, Zespół Celowania i Naprowadzania dla PPK PIRAT CLU-P oraz bloki elektroniki głowicy samonaprowadzającej GSN.

Do systemów nawigacji oferowanych przez polskie przedsiębiorstwa zaliczają się również takie rozwiązania cywilne, jak m.in.

- **[Yanosik](#):** bezpłatna aplikacja dla kierowców, służąca do nawigacji oraz ostrzegająca przed zdarzeniami drogowymi, fotoradarami i pomiarami prędkości, kontrolach policji i innych utrudnieniach.
- **[NAVI Polska](#):** oferuje różnorodne rozwiązania nawigacji rolniczej, wykorzystywanej w ramach rolnictwa precyzyjnego do np. precyzyjnego prowadzenia maszyn rolniczych, poprawy dokładności prac polowych, ograniczenia strat materiałowych, zapewnienia ciągłości pracy w niekorzystnych warunkach polowych, poprawy jakości i skrócenia czasu pracy operatora maszyn rolniczych.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://e-elektryczna.pl/technika-i-technologie/od-nawigowania-klasycznego-przez-nawigacje-radiowa-do-satelitarnej-gps-i-muwns/>

2. <https://www.gmv.com/pl-pl/media/blog/przestrzen-kosmiczna/sterowanie-satelita-za-pomoca-technologii-gnc>
3. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Main_Page
4. <https://www.gov.pl/web/5g/technologie-lokalizacyjne---dzieki-czemu-dziala-nawigacja-w-twoim-aucie>
5. <https://dsiac.dtic.mil/technical-inquiries/notable/introduction-to-guidance-navigation-and-control-gnc/>
6. http://irm.am.szczecin.pl/images/instrukcje/PUN/wyklady/nawigacja_inercyjna.pdf
7. <https://www.politykabezpieczenstwa.pl/pl/a/czym-jest-lidar-i-do-czego-sluzyl>
8. <https://vademecumbezpieczenstwainformacyjnego.uken.krakow.pl/2020/03/10/ils>

Sieci i technologie łączności

5G, 6G i łączność bezprzewodowa (ang. Wireless networks)

Opis technologii

Definicje

Sieci bezprzewodowe (ang. *wireless networks*): jako medium transmisyjne wykorzystują fale radiowe (elektromagnetyczne) lub fale podczerwone. Ich użycie nie wymaga okablowania, co pozwala na obniżenie kosztów i utworzenie sieci w miejscach, które z różnych powodów nie mają dostępu do sieci kablowej. Pozwala to również na korzystanie z sieci użytkownikom mobilnym.

Fale radiowe i podczerwone są częścią tzw. spektrum fal elektromagnetycznych (widma fal), czyli przedstawienia fal w zależności od ich częstotliwości⁴⁴ lub długości⁴⁵. Dłuższym falom odpowiadają mniejsze częstotliwości, a krótszym falom odpowiadają wyższe częstotliwości. Każda z sieci transmisji danych działa w określonym paśmie częstotliwości (zakresie fal) radiowych.

Przesyłanie danych za pomocą fal radiowych polega na modulacji (zmianie) sygnału prądu przemiennego, czyli tzw. nośnej sygnału. W sieciach bezprzewodowych wykorzystuje się trzy rodzaje modulacji:

- **DSSS (ang. Direct Sequence Spread Spectrum):** w trakcie transmisji strumienie danych są rozdzielane z wykorzystaniem specjalnych bitów (tzw. bity szumów), a odbiornik musi dysponować układem deszyfrującym. Informacje rozbijane są na „podbity”, co pozwala na ich transmisję przy użyciu dużo szerszego pasma przenoszenia danych niż w przypadku normalnej transmisji.
- **FHSS (ang. Frequency Hopping Spread Spectrum):** strumienie danych są przełączane z jednej częstotliwości na drugą (a każda częstotliwość to oddzielny kanał komunikacyjny), pozostając na każdej z nich nie dłużej niż 100 ms.
- **OFDM (ang. Orthogonal Frequency Division Multiplexing):** została tak zoptymalizowana, aby interfejs bezprzewodowy mógł transmitować dane w środowiskach pełnych zakłóceń, takich jak zatłoczone obszary miejskie.

Rodzaje sieci bezprzewodowych wg zasięgu działania

- **Sieci osobiste PAN (ang. Personal Area Network):** działają na odległość do 10 metrów, np. Bluetooth.

⁴⁴ Częstotliwość: wielkość fizyczna określająca liczbę cykli zjawiska okresowego występujących w jednostce czasu. W układzie SI jednostką częstotliwości jest herc [Hz]. Częstotliwość 1 herca odpowiada występowaniu jednego zdarzenia (cyklu) w ciągu 1 sekundy.

⁴⁵ Długość fali: najmniejsza odległość między dwoma punktami o tej samej fazie drgań (czyli między dwoma powtarzającymi się fragmentami fali). Dwa punkty fali są w tej samej fazie, jeśli wychylenie w obu punktach jest takie samo i oba znajdują się na etapie wzrastania (lub zmniejszania się). Jeżeli w jednym punkcie wychylenie zwiększa się, a w drugim maleje, punkty te znajdują się w fazach przeciwnych.

- **Sieci lokalne WLAN (ang. Wireless Local Area Network):** działają na odległość do 100 metrów na otwartej przestrzeni, np. Wi-Fi.
- **Sieci rozległe WWAN (ang. Wireless Wide Area Network):** działają na odległość do 5 kilometrów, używane głównie w telefonii komórkowej np. GSM.
- **Sieci LPWA (ang. Low Power, Wide Area):** sieci bezprzewodowe o bardzo niskim zużyciu energii, przesyłające dane na dużych obszarach i w trudnych warunkach m.in. na obszarach narażonych na przeszkody zakłócające transmisję (np. miasta) lub tłumiących przepływ fal radiowych (np. podziemia). Wykorzystywane w obiektach podziemnych np. kopalniach, parkingach, piwnicach itp. oraz w rozwiązaniach Internetu Rzeczy m.in. inteligentne budynki (ang. smart buildings), inteligentne liczniki wody, gazu i in. (ang. smart metering), zarządzanie odpadami, różnego rodzaju czujniki i in.

Sieci wykorzystujące fale radiowe

Wi-Fi: łączność bezprzewodowa w dwóch zakresach częstotliwości – 2,4 GHz i 5 GHz. Dokładna częstotliwość stosowana w określonej sieci bezprzewodowej zależy od wykorzystywanego kanału transmisyjnego. W Polsce wykorzystywane jest 13 kanałów transmisyjnych.

W przypadku sieci Wi-Fi funkcjonują tzw. standardy Wi-Fi, czyli protokoły określające sposób i parametry połączenia urządzeń z lokalną siecią bezprzewodową, w tym m.in. prędkość transmisji, zasięg, wydajność sieci i stabilność połączenia. Zostało określone 9 standardów Wi-Fi, które w skrócie prezentują się następująco:

Tab. 1. Standardy sieci Wi-Fi⁴⁶

Nazwa standardu Wi-Fi	Rok wprowadzenia	Wykorzystywane częstotliwości Wi-Fi	Maksymalna prędkość transmisji
802.11	1997	2.4 GHz	2 Mb/s
802.11b (Wi-Fi 1)	1999	2.4 GHz	11 Mb/s
802.11a (Wi-Fi 2)	1999	5 GHz	54 Mb/s
802.11g (Wi-Fi 3)	2003	2.4 GHz	54 Mb/s
802.11n (Wi-Fi 4)	2009	2.4 GHz, 5 GHz	600 Mb/s
802.11ac (Wi-Fi 5)	2013	5 GHz	6933 Mb/s
802.11ax (Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E)	2021	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (Wi-Fi 6E)	9608 Mb/s

⁴⁶ <https://www.netia.pl/pl/blog/standardy-wi-fi-802-11-a-b-g-n-ac-ax>

802.11be (Wi-Fi 7)	2021	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (Wi-Fi 6E)	46120 Mb/s
802.11bn (Wi-Fi 8)	2028	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz	46120 Mb/s

Bluetooth: standard połączeń radiowych o niewielkim zasięgu, które wykorzystują bezkierunkowe łącze radiowe o zasięgu ograniczonym do 10 m. Technologia ta jest inicjatywą grupy producentów urządzeń elektronicznych: Ericsson, IBM, Intel, Nokia i Toshiba. Standard Bluetooth powstał w 1994 r. w Szwecji. Bluetooth jest powszechnie używany w urządzeniach mobilnych, takich jak telefony komórkowe, smartfony, laptopy, tablety, urządzenia peryferyjne (klawiatury, myszki, monitory, drukarki, głośniki, słuchawki i in.) oraz piloty, telewizory i radia.

WiMAX (ang. Worldwide Interoperability for Microwave Access): jest to bezprzewodowa metoda szerokopasmowej transmisji danych na dużych obszarach geograficznych.

RFID (ang. Radio-Frequency Identification): system zdalnej identyfikacji obiektów za pomocą fal radiowych. Jego podstawą są etykiety (określane również jako metki lub tagi) – niewielkie nośniki informacji które można przymocować na dowolnej powierzchni. Czytniki RFID odczytują dane z setek etykiet równocześnie, nawet z odległości kilkudziesięciu metrów. Tagi dostarczają wcześniej zdefiniowane informacje, m.in. lokalizację przedmiotu, czas przechowywania czy też etap produkcji. System nie wymaga źródła zasilania ani baterii – chipy są zasilane dzięki technologii radiowej. Wykorzystywany np. w handlu (identyfikacja i inwentaryzacja produktów), transporcie, logistyce i magazynowaniu, zarządzaniu opakowaniami zwrotnymi, przemyśle i produkcji, budownictwie (kontrola sprzętu i materiałów budowlanych), czy też identyfikacji osób (karty dostępowe).

Sieci komórkowe

Sieć komórkowa: składa się ze współpracujących ze sobą elementów, które za pomocą fal radiowych zapewniają łączność pomiędzy różnymi urządzeniami. Jej działanie opiera się na podziale danego obszaru geograficznego na komórki, za których obsługę odpowiadają poszczególne stacje bazowe. Łączność pomiędzy stacją bazową a urządzeniem abonenckim (np. smartfonem) jest dwukierunkowa: stacje bazowe nadają i odbierają sygnały od urządzeń, a urządzenia odbierają i nadają sygnały do stacji bazowej.

Do elementów sieci komórkowej należą takie urządzenia jak m.in.

- **Stacja bazowa:** pełni rolę nadajnika i odbiornika sygnałów radiowych, który może obsługiwać określoną liczbę urządzeń abonenckich znajdujących się w jej zasięgu. Stacje bazowe na pewnym obszarze geograficznym tworzą sieć wzajemnych połączeń, czyli tzw. sieć komórkową. Działanie urządzenia w sieci komórkowej (np. smartfonu) polega na wysłaniu sygnału z urządzenia do najbliższej stacji bazowej. Dana stacja odbiera i przetwarza ten sygnał, a następnie (przy pomocy tzw. sieci szkieletowej) przekazuje go do stacji bazowej obsługującej urządzenie, z którym chcemy się połączyć.

- **Antena:** element stacji bazowej, który pełni rolę odbiornika i nadajnika sygnałów radiowych, tj. zamienia sygnał docierający z nadajnika na falę elektromagnetyczną a odebraną falę elektromagnetyczną – na sygnał, który jest przekazywany do odbiornika.
- **Urządzenia radiowe:** są to urządzenia odpowiedzialne za przetwarzanie i przesyłanie sygnałów radiowych między urządzeniami mobilnymi a siecią telekomunikacyjną.
- **Kontroler stacji bazowych:** pełni rolę centralnego punktu zarządzania stacjami bazowymi w danym obszarze. Jest odpowiedzialny za kontrolę nad przepływem danych, alokację zasobów, monitorowanie jakości połączeń i zarządzanie ruchem w sieci.
- **Centrala telekomunikacyjna:** jest to główny punkt kontrolny sieci komórkowej. Zarządza ona wszystkimi połączeniami i przesyła informacje między różnymi elementami sieci. Centrala telekomunikacyjna obsługuje również funkcje takie jak autoryzacja użytkowników, rozliczenia i zarządzanie danymi abonentów.
- **Łącza transmisyjne:** jest to infrastruktura, która umożliwia przesyłanie danych między różnymi elementami sieci komórkowej. Mogą to być światłowody, kable miedziane, fale radiowe lub satelitarne połączenia. Łącza transmisyjne zapewniają szybką i niezawodną transmisję danych w sieci.

Do identyfikacji abonentów w sieci komórkowej służą karty modułu identyfikacji abonenta **SIM** (ang. Subscriber Identity Module). Przyjmują one formę fizycznej, plastikowej karty mikroprocesorowej, którą należy umieścić w urządzeniu. Jest ona niezbędna do korzystania z m.in. telefonów komórkowych, smartfonów i innych urządzeń mobilnych. W zależności od wielkości wyróżnia się karty nano, micro i mini. Karty SIM można przenosić pomiędzy różnymi urządzeniami.

Obecnie coraz częściej wykorzystywane jest rozwiązanie **eSIM**, czyli chip wbudowany na stałe w urządzenie mobilne, który nie może być fizycznie przenoszony pomiędzy urządzeniami. eSIM aktywowany jest przy pomocy aplikacji lub kodu QR.

Generacje sieci komórkowej

W celu skutecznego przesyłania danych, sieci komórkowe wykorzystują określone standardy transmisji danych, do których należą⁴⁷:

1G: pierwsza generacja analogowej telefonii komórkowej, wprowadzona w latach 80. XX wieku. Pozwala tylko na przesyłanie głosu – nie ma możliwości wysyłania wiadomości SMS, MMS, używania Internetu ani roamingu międzynarodowego. Do wad 1G należą m.in.: słaba jakość dźwięku oraz niski poziom bezpieczeństwa. Ten standard nie jest już obsługiwany – ostatnia sieć 1G została wyłączona w 2017 r. w Rosji.

2G GSM (ang. Global System for Mobile Communications): po raz pierwszy wprowadzona do użytku w 1991 r. w Finlandii. Jest to pierwszy standard sieci komórkowej wykorzystujący

⁴⁷ <https://www.netia.pl/pl/blog/rodzaje-sieci-komorkowych>

cyfrowe sygnały radiowe, które są szyfrowane (co zwiększa bezpieczeństwo rozmów w porównaniu do 1G). GSM pozwala na zarówno rozmowy głosowe, jak i przesyłanie SMS, MMS oraz połączenie z Internetem. Do wad 2G należą m.in. niska prędkość pobierania (maks. 48 Kb/s). W części krajów sieć ta została wyłączona, a w innych krajach planowane jest jej stopniowe wyłączenie. Ponieważ standard 2G używany jest w łączności Internetu Rzeczy i jako sieć zapasowa (w przypadku braku zasięgu lub awarii sieci LTE możliwe jest wykorzystanie 2G do zachowania ciągłości komunikacji telefonicznej) decyzja ta jest przedmiotem dyskusji.

3G UMTS (ang. Universal Mobile Telecommunications System): wprowadzona do użytku w 2001 r. W standardzie 3G możliwe jest: prowadzenie rozmów głosowych, wysyłanie SMS i MMS, mobilny dostęp do Internetu, połączenia wideo i korzystanie z telewizji internetowej. Jednakże nadal prędkość Internetu jest niewielka (maks. 14 Mb/s), a także występują duże opóźnienia w transmisji danych (tzw. PING⁴⁸).

4G LTE (ang. Long Term Evolution): standard wprowadzony w 2008 r. Osiąga lepsze parametry zarówno w prędkości Internetu mobilnego, jak i w wartościach PING, które pozwalają na używanie LTE do nie tylko przeglądania stron www, ale również grania w gry sieciowe, oglądania filmów w jakości HD oraz nauki i pracy zdalnej.

5G NR (ang. New Radio): najnowszy standard będący obecnie w użytku. Może osiągać parametry porównywalne z łączem światłowodowym pod względem prędkości i stabilności. Sygnał jest odporny na takie czynniki jak: czynniki atmosferyczne, niekorzystne ukształtowanie terenu czy bariery architektoniczne. Sieć 5G może być wykorzystywane do m.in. zdalnej pracy i nauki, streamingu audio i wideo, przesyłania dużych plików, wideokonferencji itp.

6G: planowany standard sieci komórkowej. Ma odpowiadać na wyzwania związane z rozwojem istniejących i pojawianiem się nowych technologii m.in. rozszerzona rzeczywistość (AR), wirtualna rzeczywistość (VR), autonomiczne pojazdy, medycyna teleinformatyczna i Internet Rzeczy (IoT). Nowy standard ma spowodować zmiany w architekturze sieciowej, m.in.

- wprowadzić wykorzystanie komunikacji satelitarnej (globalny zasięg sieci 6G, transmisja danych na duże odległości, minimalizacja opóźnień);
- wykorzystanie nowych technologii w celu zwiększenia prędkości transmisji danych i zmniejszenia opóźnień (np. wykorzystanie fal milimetrowych w zakresie 100-300 GHz, które z powodu krótkiego zasięgu będzie wymagać rozbudowy infrastruktury sieciowej);

⁴⁸ PING: używany jest do mierzenia opóźnień w transmisjach internetowych. Jest to parametr mierzący czas, jaki upłynie pomiędzy wykonaniem określonego działania na jednym urządzeniu (serwerze, komputerze itp.) a dostarczeniem informacji do innego urządzenia i otrzymaniem od niego zwrotnej odpowiedzi. PING określa się w milisekundach.

- wykorzystanie AI do optymalizacji zarządzania siecią, dynamicznej alokacji zasobów i zwiększenia efektywności wykorzystania zasobów widmowych⁴⁹;
- wprowadzenie nowych rozwiązań cyberbezpieczeństwa.

Sieci wykorzystujące podczerwień

IrDA (ang. Infrared Data Association): do przesyłania danych wykorzystywana jest silnie skupiona wiązka światła w paśmie podczerwieni. Do zalet tej technologii należą mały pobór mocy oraz prosta i tania implementacja. Obecnie z powodu ograniczeń technicznych (np. niska przepustowość przesyłu danych lub konieczność bezpośredniej widoczności nadajnika i odbiornika) jest zastępowana przez inne technologie łączności. Przykłady obecnego wykorzystania IrDA to m.in. piloty do zdalnego sterowania np. telewizorem oraz wybrane urządzenia medyczne.

Zaawansowanie

Poziom zaawansowania zależy od rodzaju technologii i standardu łączności, który podlega ocenie. Niektóre z nich są przestarzałe i zostały wycofane z użytku (np. standard 1G), niektóre są używane w ograniczonym zakresie lub do konkretnych zastosowań (np. 2G lub LPWA), a niektóre dopiero będą wprowadzane do użycia (standard 6G lub Wi-Fi 8). Należy jednak zauważyć, że generalnie sieci bezprzewodowe są niezbędnym elementem współczesnej łączności, o które opierają się tak powszechnie wykorzystywane rozwiązania jak telefonia komórkowa czy bezprzewodowy dostęp do Internetu.

Według najnowszych danych w 2025 r. na świecie odnotowano od 5.78 miliarda (wg GSMA Intelligence) do 6.72 miliarda (wg Ericsson) unikalnych użytkowników urządzeń mobilnych – jest to ponad 70% światowej populacji⁵⁰. Z tego 4.82 miliarda użytkowników korzysta z danych komórkowych. Również w październiku 2025 r. wykorzystanie Internetu osiągnęło poziom 6,04 miliarda użytkowników, co stanowi 73,2% całej populacji.

W raporcie „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” zostały wyróżnione cztery główne obszary technologiczne potencjalnego rozwoju w zakresie łączności⁵¹. Należą do nich:

- **Architektura i zarządzanie sieciami:** obszar ten dotyczy rozwoju otwartych, elastycznych i programowalnych architektur telekomunikacyjnych. Powstawanie i rozwój otwartych i interoperacyjnych ekosystemów technologicznych ma umożliwić głębokie zmiany na rynku ICT poprzez np. wejście na rynek nowych uczestników oraz redefinicję relacji pomiędzy takimi podmiotami jak operatorzy, dostawcy infrastruktury i integratorzy usług. Rozproszone i adaptacyjna infrastruktura łączności

⁴⁹ Zasoby widmowe odnoszą się do pasm częstotliwości widma radiowego, które są wykorzystywane w łączności bezprzewodowej.

⁵⁰ <https://datareportal.com/reports/digital-2026-global-overview-report>

⁵¹ Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji, PARP, Warszawa, 2026.

ma również umożliwić zwiększenie elastyczności i odporności operacyjnej sieci telekomunikacyjnych.

- **Sieci bezprzewodowe nowej generacji:** obszar ten obejmuje rozwój technologii łączności bezprzewodowych m.in. 5G i kolejnych generacji (tzw. futureG) oraz kolejnych standardów Wi-Fi. Technologie te są obecnie uznawane za jedne z najważniejszych elementów współczesnej gospodarki cyfrowej – stają się platformą dla nowych usług, modeli biznesowych i ekosystemów cyfrowych.
- **Specjalistyczne systemy komunikacji:** obszar ten obejmuje projektowanie rozwiązań dla zastosowań wymagających szczególnej niezawodności, precyzji i zasięgu. Systemy komunikacyjne tego typu pozwalają na integrację komunikacji w czasie rzeczywistym z otoczeniem fizycznym i cyfrowym, co prowadzi do reorganizacji systemów transportu, miejskich, logistycznych i krytycznych.
- **Technologie radiowe i widmo:** obszar ten obejmuje rozwiązania związane z zarządzaniem spektrum, programowalnymi środowiskami bezprzewodowymi, radiem kognitywnym oraz technologiami powierzchni inteligentnych (powierzchnie pozwalające na sterowanie propagacją sygnału radiowego). Technologie tego typu mają pozwolić na skokowy wzrost wydajności sieci, poprawę efektywności wykorzystania widma, a także rozwój nowych funkcjonalności komunikacyjnych i lokalizacyjnych.

Technologie te pokazują przejście od tradycyjnego pojmowania sieci jako scentralizowanych i sprzętowo zdefiniowanych do środowisk otwartych, programowalnych, rozproszonych i zintegrowanych z analityką danych, sztuczną inteligencją i automatyką. Wspólną cechą wyróżnionych technologii jest zwiększanie przepustowości, elastyczności i interoperacyjności sieci, a także wzrost ich znaczenia jako infrastruktury krytycznej państwa. Rozwój technologii z obszaru łączności ma prowadzić m.in. do otwierania i decentralizacji rynku, zmian w modelach biznesowych operatorów i dostawców usług, a także do tworzenia nowych ekosystemów łączących w sobie elementy łączności, sztucznej inteligencji oraz automatyzacji.

Sieci bezprzewodowe w Polsce

W Polsce dostęp do różnego rodzaju sieci łączności bezprzewodowej jest powszechny.

W 2025 r. 96,2% wszystkich gospodarstw domowych w Polsce (zamieszkałych przez przynajmniej jedną osobę w wieku 16-74 lata) posiada dostęp do Internetu. Natomiast w tym samym roku 94,9% ogółu gospodarstw domowych miało w domu szerokopasmowy dostęp do Internetu. W 2025 r. najczęściej korzystano z szerokopasmowych łączności mobilnych – dostęp do nich posiadało 78,2% gospodarstw domowych⁵².

W 2024 r. w Polsce funkcjonowało 154 przedsiębiorców telekomunikacyjnych, z czego 4 z nich – P4 (działa pod marką Play), Orange Polska, T-Mobile, Polkomtel – posiadają własną infrastrukturę telekomunikacyjną.

⁵² <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne-w-polsce-w-2025-r-,1,19.html>

W 2024 r. liczba aktywnych kart SIM wyniosła 53,2 mln, z czego prawie $\frac{3}{4}$ z nich (74,6%) użytkowanych było w formie abonamentowej (tzw. post-paid), a 25,4% były to karty przedpłacone (tzw. pre-paid).

Według danych UKE w 2024 r. sieć 5G pokrywała swoim zasięgiem 72% terytorium Polski, a dostęp do niej miało 92% Polaków. Natomiast sieć LTE (4G) objęła zasięgiem 99% terytorium państwa⁵³.

W Polsce przyznawanie częstotliwości dla sieci 5G odbywa się poprzez aukcję prowadzoną przez Urząd Komunikacji Elektronicznej (UKE). Pierwsza z aukcji została rozstrzygnięta w 2023 r. i dotyczyła zakresu 3400-3800 MHz. W aukcji wystartowało czterech operatorów (Polkomtel, P4 – sieć Play, Orange, T-Mobile), a każdy z nich otrzymał po jednym bloku o szerokości 100 MHz.

Druga z aukcji zakończyła się w marcu 2025 r. Obejmowała sześć bloków w paśmie 700 MHz i jedno w paśmie 800 MHz. W ramach aukcji pasma wygrali operatorzy: P4, T-Mobile, Orange oraz Polkomtel.

Rozdzielanie pasm częstotliwości pozwala operatorom na rozbudowę infrastruktury połączeń mobilnych, a dla użytkowników oznacza łatwiejszy dostęp do sieci i jej większy zasięg na terenie całego kraju.

Według oceny zamieszczonej w raporcie „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” w Polsce rozwój technologii z obszaru sieci i łączności są rozwijane w zróżnicowany sposób. Obejmują one wdrożenia infrastruktury, projekty B+R oraz udział w inicjatywach na poziomie europejskim. Natomiast podmioty krajowe w ograniczonym stopniu biorą udział w tworzeniu kluczowych technologii i standardów. Według ustaleń raportu dominującą rolą Polski jest adopcja, integracja oraz testowanie rozwiązań globalnych.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://uke.gov.pl/>
2. <https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-ryнку-telekomunikacyjnego-w-2024-roku,590.html>
3. https://zeszytynaukowe.wwsi.edu.pl/zeszyty/zeszyt5/Wybrane_Technologie_Bezprzewodowej_Transmisji_Danych.pdf
4. <https://www.netia.pl/pl/blog/standardy-wi-fi-802-11-a-b-g-n-ac-ax>
5. <https://www.netia.pl/pl/blog/rodzaje-sieci-komorkowych>
6. <https://nafalinauki.pl/irda/>
7. <https://biznes.plus.pl/iot-m2m/be-smart/narrowband>
8. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/shared-use-spectrum>
9. <https://www.gov.pl/web/5g/czym-bedzie-lub-czym-moze-byc-6g-sprawdz>

⁵³ <https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-ryнку-telekomunikacyjnego-w-2024-roku,590.html>

10. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/757633/EPRS_BRI\(2024\)757633_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/757633/EPRS_BRI(2024)757633_EN.pdf)
11. <https://datareportal.com/reports/digital-2026-global-overview-report>
12. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/5g-observatory-2025>
13. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/aukcja-pasm-700-i-800-mhz-zakonczone--nowe-czestotliwosci-dla-operatorow>

Infrastruktura podwodna (ang. Submarine infrastructure)

Opis technologii

Definicja

Infrastruktura podwodna: są to różnego rodzaju elementy instalacji (m.in. światłowody, kable telekomunikacyjne, kable energetyczne, rurociągi itp.) znajdujące się na dnie morskim. Infrastruktura tego typu pozwala na zaopatrywanie państw w różnego rodzaju zasoby np. energetyczne, telekomunikacyjne czy paliwowe.

W zależności od głębokości na której się znajdują, podmorskie kable mogą albo leżeć bezpośrednio na dnie akwenu (na głębokości ponad 2 km) lub być zakopane w celu ochrony przed uszkodzeniem (kable w wodach płytszych niż 2 km). Niektóre z kabli mogą być swobodnie zawieszone w wodzie. Długość kabli może być bardzo różna. Niektóre z nich mają kilkaset kilometrów długości (np. 131-kilometrowy kabel CeltixConnect pomiędzy Irlandią a Wielką Brytanią), a niektóre osiągają długość tysięcy kilometrów (np. Asia America Gateway – 20 tys. km).

Ze względu na to, jak ważna dla funkcjonowania państw jest infrastruktura podwodna, powszechnie klasyfikowana jest ona jako infrastruktura krytyczna. Ze względu na obecną sytuację geopolityczną szczególną uwagę zwraca się na bezpieczeństwo i ochronę infrastruktury podwodnej przed celowymi atakami.

Umieszczenie kabli pod wodą powoduje, że są one szczególnie narażone na uszkodzenia. Mogą być one spowodowane przez czynniki naturalne np. sztormy, erupcje podwodnych wulkanów, trzęsienia ziemi, osuwanie terenu, prądy oceaniczne i in. Do czynników antropogenicznych (spowodowanych działalnością człowieka) można zaliczyć działania przypadkowe (np. rybołówstwo, eksploracja dna morskiego oraz prace podwodne związane z pogłębianiem lub układaniem innych elementów infrastruktury), jak też działania celowe – sabotaż, terroryzm i działania wojenne. Do działań celowych mogą zostać wykorzystane zarówno autonomiczne pojazdy podwodne, jak i zwykłe statki np. poprzez przerwanie/uszkodzenie kabla przez kotwicę takiej jednostki.

Do wyzwań związanych z podwodną infrastrukturą zalicza się: wysokie koszty instalacji, podatność na uszkodzenia, trudności związane z konserwacją i naprawami, narażenie na celowe ataki, obawy środowiskowe.

Do zalet podwodnych kabli zalicza się: wysoka przepustowość, niska latencja (niskie opóźnienia), niezawodność, ekonomiczność wykorzystania, łączność na długich dystansach.

Podstawowe rodzaje

- **Światłowody i kable telekomunikacyjne:** służą do łączności i przesyłu danych pomiędzy kontynentami, wyspami lub różnymi punktami lądowymi.
- **Kable energetyczne:** specjalistyczne kable wykorzystywane do przesyłania energii elektrycznej, biegnące po dnie mórz i oceanów pomiędzy kontynentami, wyspami lub

różnymi punktami lądowymi. Umożliwiają przesyłanie energii na duże odległości oraz łączenie różnych systemów energetycznych np. morskich farm wiatrowych z siecią lądową. Dodatkowo w tego typu kablach mogą zostać umieszczone światłowody przeznaczone do monitoringu stanu kabla.

- **Rurociągi:** służą głównie do przesyłania paliw (m.in. ropy naftowej i gazu ziemnego) z platform wydobywczych do znajdujących się na lądzie zakładów w celu przetworzenia i dystrybucji. Mogą być również wykorzystywane do transportu wody wykorzystywanej w procesie wydobywania ropy naftowej. Rurociągi mogą być także używane jako tzw. podwodne przewody pępowinowe transportujące m.in. płyny sterujące, energię elektryczną i sygnały komunikacyjne.

Zaawansowanie

Pierwsze podwodne kable telekomunikacyjne (telegraficzne) były wykorzystywane już w drugiej połowie XIX wieku. Natomiast współcześnie są one niezbędnym elementem światowej infrastruktury. Obecnie infrastruktura podwodna jest bardzo rozwinięta – w 2025 r. na dnie morskim znajdowało się prawie 600 kabli (zarówno aktywnych, jak i w trakcie montażu), których całkowita długość wyniosła prawie 1,5 miliona kilometrów. Szacuje się, że 99% całkowitego przepływu światowych danych odbywa się przy pomocy podwodnych kabli światłowodowych. Natomiast w przypadku podwodnych rurociągów w 2023 r. ich całkowita długość wyniosła ponad 32 000 kilometrów.

Mapa podwodnych kabli na terenie Europy dostępna jest na stronie: <https://submarine-cable-map-2025.telegeography.com/>

Infrastruktura podwodna w Polsce

Polska wykorzystuje podwodny kabel energetyczny wysokiego napięcia prądu stałego (HVDC) SwePol Link do wzajemnego przesyłu prądu do/ze Szwecji, w przypadku gdy w jednym z krajów występuje niedobór energii lub ceny energii są niższe z powodu nadprodukcji z OZE. Linia HVDC o mocy 600 MW i napięciu 450 kV zlokalizowana jest pomiędzy miejscowością Wierzbicino w pobliżu Słupska a Karlshamm w Szwecji. Jej długość wynosi 254 km.

W perspektywie kilku lat w Polskiej Wyłącznej Strefie Ekonomicznej⁵⁴ mają pojawić się kolejne kable podmorskie służące do przesyłu prądu przemiennego wysokiego napięcia HVAC (ang. High Voltage Alternating Current) związanych z rozwojem Morskiej Energetyki Wiatrowej MEW. Projektem tego typu jest farma morska Baltica 2 – wspólna inwestycja Ørsted i PGE. W lutym 2026 r. został zakończony pierwszy etap prac związanych z instalacją kabli podmorskich. Docelowo ma zostać przygotowane 150 km trasy dla kabli wewnętrznych (łączyjących turbiny z morskimi stacjami elektroenergetycznymi) oraz 260 km trasa dla kabli eksportowych.

⁵⁴ Akwen na Bałtyku przylegający do polskich wód terytorialnych, na którym prawo do połowu ryb i wydobywania surowców mają wyłącznie polskie jednostki.

Natomiast ORLEN Neptun (podmiot odpowiadający za rozwój morskiej energetyki wiatrowej w grupie ORLEN) w 2025 r. uzyskał pozwolenie na układanie i utrzymywanie kabli na obszarach morskich wód wewnętrznych i morza terytorialnego w ramach projektu budowy morskiej farmy wiatrowej Baltic East.

Projekt Baltic Pipe jest to strategiczny projekt infrastrukturalny, którego celem było stworzenie nowego korytarza dostaw gazu na rynku europejskim. Pozwala on na bezpośredni przesył gazu z norweskich złóż do Polski i Danii oraz do odbiorców w sąsiednich krajach Europy Środkowo-Wschodniej. Rurociąg pozwala na przesył dwukierunkowy, czyli można nim także dostarczać gaz z Polski do Danii. Szacowana łączna długość gazociągów to 900 km, a rurociąg podmorski osiąga przepustowość 10 mld m³ gazu. W skład Baltic Pipe wchodzi 5 głównych komponentów, z czego na dnie Bałtyku znajduje się podmorski gazociąg pomiędzy duńskim a polskim systemem przesyłowym gazu. Transport gazu został uruchomiony 1.10.2022 r.

W związku z trwającą inwazją Rosji na Ukrainę od rozpoczęcia konfliktu coraz częściej pojawiają się informacje o incydentach i potencjalnych akcjach sabotażu związanych z uszkodzeniami infrastruktury podwodnej przez jednostki powiązane z Rosją.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. <https://www.gov.pl/web/rcb/narodowy-program-ochrony-infrastruktury-krytycznej>
2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/joint-communication-strengthen-security-and-resilience-submarine-cables>

Dodatkowe informacje

1. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-explains/subsea-cables-how-vulnerable-are-they-and-can-we-protect-them_en
2. <https://zbiam.pl/zagrozenia-dla-infrastruktury-krytycznej-baltyku/>
3. <https://www.pism.pl/publikacje/bezpieczenstwo-infrastruktury-krytycznej-w-regionie-morza-baltyckiego>
4. <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2023/march/seafloor-cables-and-pipelines-are-they-secure>
5. <https://www.submarinecablemap.com/>
6. <https://submarine-cable-map-2025.telegeography.com/>
7. <https://www.energetyka.plus/kable-podmorskie-energetyczne-charakterystyka-realizacje-i-ochrona/>
8. <https://www.gaz-system.pl/pl/system-przesylowy/wsparcie-ue/inwestycje-zrealizowane-ze-srodkow-ue/baltic-pipe.html>
9. <https://www.ensecce.org/publications/why-is-critical-underwater-infrastructure-the-target/>
10. <https://windward.ai/glossary/what-is-critical-undersea-infrastructure/>

11. <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2023/may/information-warfare-depths-analysis-global-undersea-cable-networks>
12. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC142001>
13. <https://www.gospodarkamorska.pl/infrastruktura-podwodna-baltyku-w-stanie-zagrozenia-dotyczy-to-takze-polskiej-89888>
14. <https://pgebaltica.pl/strona-glowna>
15. <https://baltica.energy/>
16. <https://polska-zbrojna.pl/home/articleshow/45466?t=Sabotaz-na-dnie-Baltyku>
17. <https://neptun.orklen.pl/pl/dla-mediow/aktualnosci/2025/baltic-east-z-pozwoleniem-na-ukladanie-i-utrzymywanie-kabli-na-obszarach-morskich-wod-wewnetrznych-i-morza-terytorialnego>
18. <https://www.gospodarkamorska.pl/bezbronne-kable-15-mln-km-kabli-na-dnie-oceanow-potrzebuje-ochrony-i-obrony-86908>
19. <https://energy-steel.com/pl/submarine-pipeline-an-in-depth-exploration/>
20. <https://euro-sd.com/2026/02/articles/exclusive/49538/protecting-underwater-infrastructure/>

Internet Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT)

Opis technologii

Definicja

Internet Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT): to system wzajemnie połączonych urządzeń, maszyn, czujników, które komunikują się ze sobą oraz wymieniają dane przez Internet. IoT pozwala na zbieranie, przetwarzanie i analizę danych w czasie rzeczywistym, co umożliwia zdalne monitorowanie, automatyzację oraz podejmowanie decyzji na podstawie danych. Urządzenia tego typu nazywa się urządzeniami inteligentnymi (ang. smart devices).

W kontekście Przemysłu 4.0, IoT przyczynia się do poprawy efektywności, kontroli i bezpieczeństwa procesów przemysłowych, automatyzacji linii produkcyjnych oraz rozwoju inteligentnych systemów zarządzania zasobami.

Przemysłowy Internet Rzeczy (ang. Industrial Internet of Things – IIoT): jest to szczególny rodzaj Internetu Rzeczy wykorzystywany w zastosowaniach przemysłowych. Podobnie jak IoT składa się z połączonych urządzeń, maszyn i czujników. Dane pochodzące z inteligentnych czujników znajdujących się w maszynach produkcyjnych, systemach energetycznych i innych elementach infrastruktury pozwalają na poprawę wielu aspektów działalności przedsiębiorstwa w tym zwiększenie wydajności i produktywności, a także poprawę bezpieczeństwa pracowników. Dane pochodzące z systemów IIoT pozwalają również na lepszą komunikację pomiędzy np. maszynami produkcyjnymi oraz na optymalizację ich działania. Dzięki nim można również monitorować i optymalizować zużycie zasobów np. wody i energii.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** IoT wspiera automatyzację, monitorując i sterując maszynami oraz procesami w czasie rzeczywistym, co redukuje potrzebę interwencji człowieka.
- **Big Data:** IoT generuje ogromne ilości danych, które są następnie analizowane w ramach Big Data, co pozwala na identyfikację wzorców i optymalizację procesów.
- **Chmura obliczeniowa:** IoT korzysta z chmury do przechowywania i przetwarzania danych, co zapewnia dostęp do informacji i możliwości analitycznych z dowolnego miejsca.
- **Cyberbezpieczeństwo:** IoT wymaga zaawansowanych środków bezpieczeństwa, aby chronić urządzenia i dane przed nieautoryzowanym dostępem oraz cyberatakami.
- **Sztuczna inteligencja:** AI analizuje dane z urządzeń IoT, co pozwala na automatyzację procesów decyzyjnych oraz identyfikację anomalii w czasie rzeczywistym.

Podstawowe elementy

- **Urządzenia IoT (czujniki i akтуatory):** czujniki zbierają dane o otoczeniu, takie jak temperatura, wilgotność, ciśnienie, a akтуatory odpowiadają za wykonywanie działań, np. włączanie światła lub regulację temperatury.
- **Platforma IoT:** centralna platforma zarządzania, która umożliwia zbieranie, przetwarzanie i analizę danych z urządzeń IoT oraz zarządzanie ich konfiguracją i funkcjonowaniem. Platformy takie jak AWS IoT, Microsoft Azure IoT czy Google Cloud IoT oferują zaawansowane narzędzia do analizy i wizualizacji danych.
- **Sieci komunikacyjne:** infrastruktura umożliwiająca połączenie urządzeń IoT z internetem lub siecią lokalną, w tym technologie takie jak Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, LoRa oraz 5G, które dostarczają odpowiednią przepustowość i zasięg w zależności od zastosowania.
- **Edge computing:** technologia, która umożliwia przetwarzanie danych na urządzeniach IoT lub na krawędzi sieci, co zmniejsza opóźnienia i obciążenie sieci poprzez wstępną analizę danych przed przesłaniem ich do chmury.
- **Interfejs API:** interfejsy umożliwiające integrację i komunikację między urządzeniami IoT a aplikacjami oraz platformami do zarządzania. API pozwala na zdalne monitorowanie i sterowanie urządzeniami z poziomu aplikacji.
- **Systemy bezpieczeństwa IoT:** środki ochrony, takie jak szyfrowanie, zarządzanie dostępem i uwierzytelnianie wieloskładnikowe, które zapewniają ochronę przed nieautoryzowanym dostępem i manipulacją danymi.

Mechanizm działania

- **Zbieranie danych:** czujniki IoT zbierają dane środowiskowe lub operacyjne, takie jak temperatura, poziom wilgotności, zużycie energii, położenie geograficzne, które są następnie przesyłane do platformy IoT.
- **Transmisja danych:** dane z czujników są przesyłane do centralnej platformy IoT poprzez sieci komunikacyjne, takie jak Wi-Fi, Bluetooth, sieci komórkowe (np. 5G), co umożliwia dostęp do informacji w czasie rzeczywistym.
- **Przetwarzanie i analiza:** dane są przetwarzane na platformach IoT lub przy wykorzystaniu edge computing, aby wstępnie analizować dane na miejscu, co pozwala na szybsze podejmowanie decyzji i minimalizację opóźnień.
- **Decyzje i automatyzacja:** na podstawie przetworzonych danych i ustalonych algorytmów (często z wykorzystaniem AI), urządzenia IoT podejmują decyzje automatyczne, np. uruchamiają chłodzenie, włączają alarm lub przesyłają alerty do operatora.

- **Przechowywanie i analiza historyczna:** dane są przechowywane w chmurze, co umożliwia ich analizę długoterminową, wyciąganie wniosków i optymalizację przyszłych działań na podstawie analizy trendów.
- **Monitorowanie i konserwacja predykcyjna:** na podstawie zebranych danych i analizy IoT pozwala na przewidywanie potencjalnych problemów (np. awarii sprzętu) i podjęcie działań konserwacyjnych przed ich wystąpieniem, co zwiększa niezawodność i wydajność systemów.
- **Bezpieczeństwo i zarządzanie dostępem:** systemy IoT wymagają zaawansowanych zabezpieczeń, takich jak szyfrowanie i kontrola dostępu, aby chronić dane przed atakami i zapewnić ich integralność.

Przykłady wykorzystania

- **Inteligentne fabryki:** Zintegrowane urządzenia IoT monitorujące stan maszyn, efektywność procesów oraz zużycie energii, co wspiera konserwację predykcyjną oraz automatyzację produkcji.
- **Inteligentne miasta:** Systemy monitorujące ruch drogowy, jakość powietrza, zużycie energii oraz inne parametry miejskie, co umożliwia optymalizację infrastruktury i zwiększenie komfortu mieszkańców.
- **Zarządzanie łańcuchem dostaw:** Monitorowanie i śledzenie przesyłek, temperatury, wilgotności oraz lokalizacji w czasie rzeczywistym, co zapewnia kontrolę nad jakością produktów i terminowością dostaw.
- **Inteligentne budynki:** Zintegrowane systemy zarządzania oświetleniem, klimatyzacją i bezpieczeństwem, które automatycznie dostosowują parametry środowiskowe w celu oszczędzania energii i zwiększenia komfortu.
- **Produkcja:** np. monitoring linii produkcyjnych, pomiary wydajności i produktywności, śledzenie produktów.
- **Motoryzacja:** np. zastosowania produkcyjne, diagnostyczne, informacyjne w pojazdach.
- **Transport i logistyka:** np. zmiany tras pojazdów w oparciu o panujące warunki (pogodowe, drogowe itp.), monitorowanie lokalizacji i parametrów pojazdów.
- **Handel detaliczny:** np. zarządzanie zapasami, poprawa doświadczeń zakupowych klientów, optymalizacja łańcucha dostaw, zmniejszenie kosztów operacyjnych.
- **Sektor publiczny:** np. powiadamianie użytkowników o awariach i przerwach w dostawie wody, prądu czy usług kanalizacyjnych; zbieranie danych dotyczących awarii, optymalne rozmieszczanie zasobów.

- **Opieka zdrowotna:** np. użycie medycznych wearables (urządzenia noszone przez pacjenta, monitorujące jego stan zdrowia i przesyłające dane do placówki medycznej).
- **Wszystkie branże:** poprawa bezpieczeństwa pracowników działających w środowiskach niebezpiecznych (np. kopalnie, pola naftowe i gazowe, zakłady chemiczne i energetyczne) – powiadamianie o wypadkach, awariach itp., śledzenie położenia pracowników, wykorzystanie urządzeń typu wearables do monitorowania zdrowia pracowników oraz warunków środowiskowych.
- **Rozwiązania inteligentnych domów:** IoT pozwala na integrowanie urządzeń domowych (np. inteligentnych urządzeń AGD, smart TV, głośników, czujników temperatury, inteligentnych systemów oświetlenia itp.) w jedną sieć, która pozwala na automatyzację ich działania. W skład systemów IoT dla smart domów wchodzi również inteligentne zamki, systemy monitoringu czy czujniki ruchu, które pozwalają na zwiększenie bezpieczeństwa mieszkańców.
- **Urządzenia ubieralne (ang. wearables):** są to urządzenia elektroniczne noszone na ciele użytkownika (tj. akcesoria oraz ubrania zawierające technologie elektroniczne), które są częścią sieci połączonych obiektów, czujników i oprogramowania. Do najpopularniejszych urządzeń tego typu należą inteligentne zegarki (ang. smartwatch) oraz opaski (ang. smartbands) służące do np. rejestrowania parametrów zdrowotnych i aktywności fizycznej.

Zaawansowanie

Prognozuje się, że światowy rynek Internetu rzeczy (IoT) wzrośnie z 547,06 mld USD w 2025 r. do 865,20 mld USD do 2030 r., przy średnim rocznym tempie wzrostu (CAGR) na poziomie 9,6% w okresie prognozy. Rynek IoT rozwija się w szybkim tempie, ponieważ organizacje wdrażają czujniki i podłączone urządzenia w różnych obszarach działalności w celu cyfryzacji zasobów i przepływów pracy. Użytkownicy końcowi wymagają skalowalnego zarządzania urządzeniami, bezpiecznej łączności typu end-to-end, przetwarzania brzegowego o niskim opóźnieniu oraz zintegrowanej analityki, aby przekształcić dane telemetryczne w działania w czasie rzeczywistym. Gracze oferują ujednolicone platformy IoT, które łączą zarządzanie cyklem życia urządzeń, aktualizacje OTA, zabezpieczenia urządzeń typu zero-trust, koordynację między brzegiem a chmurą oraz analizy i automatyzację oparte na sztucznej inteligencji. Te możliwości otwierają drogę do konserwacji predykcyjnej, wydajności operacyjnej, poprawy bezpieczeństwa i doświadczeń klientów oraz nowych modeli przychodów opartych na usługach⁵⁵.

⁵⁵ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/internet-of-things-market-573.html>

Według danych Eurostat w 2024 r. aż 70% osób w przedziale wiekowym 16-70 lat używało urządzeń Internetu Rzeczy, z czego najpopularniejszym rodzajem tego typu urządzeń były smart TV – korzystało z nich 58% badanych Europejczyków⁵⁶.

Unia Europejska opracowała [Internet of Things Policy](#), czyli dokument zawierający zestaw działań pozwalających na wspieranie i przyspieszenie wdrażania takich technologii jak IoT i edge computing.

Internet Rzeczy w Polsce

Według danych GUS w 2023 r. wśród przedsiębiorstw przemysłowych korzystających z rozwiązań IoT (maszyn produkcyjnych lub innych urządzeń/czujników bezpośrednio wykorzystywanych w działalności operacyjnej) 45,5% wykorzystuje rozwiązania przesyłające dane do serwisu, 39,3% przesyłające dane do innych maszyn, a 30,6% przesyłające dane do ERP. Firmy wykorzystują rozwiązania IoT, które pozwalają na automatyczne zbieranie informacji (23,4%), zdalną identyfikację wyrobów (12,2%), w interfejsach „człowiek-maszyna” (8,9%) oraz do przesyłania danych po opuszczeniu fabryki (5,5%)⁵⁷.

Wśród przedsiębiorstw przemysłowych korzystających z IoT rozwiązania tego typu najczęściej były wykorzystywane w celu integracji procesów (36%), wydajności produkcji (34,5%) oraz bezpieczeństwa IT (21,4%).

Do najczęściej odnotowanych korzyści związanych w wykorzystaniem rozwiązań IoT w 2023 r. należały: skrócenie czasu produkcji (43,5%), zwiększenie produktywności (42,4%) i poprawa jakości produktów (40%).

Najczęściej wskazywaną przyczyną niewykorzystywania rozwiązań Internetu Rzeczy był brak potrzeby (74,5%).

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Use of Internet of Things by individuals](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Use_of_Internet_of_Things_by_individuals)
2. [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Internet of Things \(IoT\)](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Internet_of_Things_(IoT))
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/internet-things-policy>
4. <https://www.techsterowniki.pl/blog/co-to-jest-iot-i-jaka-role-pelni-w-systemie-smart-home>
5. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/internet-of-things-market-573.html>

⁵⁶ [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Use of Internet of Things by individuals](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Use_of_Internet_of_Things_by_individuals)

⁵⁷ <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/wykorzystanie-zaawansowanych-technologii-w-przemysle-w-2023-roku,9,1.html>

6. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/wykorzystanie-zaawansowanych-technologii-w-przemysle-w-2023-roku,9,1.html>
7. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/internet-rzeczy>

Łączność (ang. Connectivity)

Opis technologii

Definicje

Łączność: w ujęciu ogólnym obejmuje transmisję (przesyłanie) informacji przy pomocy różnych metod np. poczta, sieci telekomunikacyjne, radio, telewizja, Internet.

Według definicji stosowanej przez Unię Europejską w programie „Cyfrowa Dekada”, łączność obejmuje różnego rodzaju sieci cyfrowe (mobilne, stałe oraz Internet), w tym łącza kablowe i satelitarne. Do KPI Cyfrowej Dekady związanych z łącznością należą:

- **Konektywność gigabitowa:** wskaźnik mierzony jest jako odsetek gospodarstw domowych objętych sieciami stacjonarnymi o bardzo dużej przepływności. Obecnie to tych technologii należą światłowód do lokalu i sieć kablowa w standardzie DOCSIS⁵⁸
- **Zasięg 5G:** wskaźnik mierzony jako odsetek obszarów zaludnionych objętych co najmniej jedną siecią 5G niezależnie od wykorzystywanego pasma częstotliwości.

Sieci telekomunikacyjne: są to systemy transmisyjne oraz urządzenia komutacyjne lub przekierowujące, a także inne zasoby, które umożliwiają nadawanie, odbiór lub transmisję sygnałów za pomocą przewodów, fal radiowych, optycznych lub innych środków wykorzystujących energię elektromagnetyczną, niezależnie od ich rodzaju⁵⁹.

Sieci telekomunikacyjne mogą być dzielone wg różnych kryteriów m.in. przeznaczenie sieci (np. telefoniczna), dostępność sieci (np. publiczne, o ograniczonej dostępności – wojskowe itp.), zasięg terytorialny (np. lokalne LAN, rozległe WAN).

Infrastruktura telekomunikacyjna: fizyczne elementy sieci telekomunikacyjnej wykorzystywane do zapewnienia telekomunikacji, w szczególności urządzenia telekomunikacyjne, linie kablowe, a także powiązane zasoby, z wyjątkiem powiązanych usług, budynków i wejść do budynków.

Sieć publiczna: sieć telekomunikacyjna wykorzystywana głównie do świadczenia publicznie dostępnych usług telekomunikacyjnych⁶⁰.

Sieci szkieletowe: sieci telekomunikacyjne, przez które przepływa największa ilość ruchu telekomunikacyjnego (ilość informacji). Z reguły oparta na liniach światłowodowych dużej przepustowości ze względu na duże zapotrzebowanie na pasmo transmisyjne. Sieci tego typu łączą główne węzły sieci telekomunikacyjnej.

⁵⁸ DOCSIS (ang. Data Over Cable Service Interface Specification) – standard transmisji danych w istniejących hybrydowych sieciach kablowych HFC (ang. Hybrid fiber-coaxial – hybrydowa sieć wykorzystująca medium światłowodowe (fibre) i różnego rodzaju koncentryczne kable sygnałowe (coaxial cables). Najczęściej wykorzystywany do udostępniania abonentom sieci telewizji kablowej dostępu do Internetu.

<https://pl.wikipedia.org/wiki/DOCSIS>

⁵⁹ <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/957,pojecie.html>

⁶⁰ <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/957,pojecie.html>

Sieć dosyłowa: dostarcza sygnał optyczny do punktu dystrybucyjnego, który obsługuje duży obszar (np. dzielnicę/osiedle). W sieci dosyłowej może występować więcej niż jeden punkt dystrybucyjny.

Sieć dystrybucyjna: służy do dostarczenia sygnału optycznego od punktu dystrybucyjnego do konkretnego budynku. Stanowi warstwę pośrednią pomiędzy siecią szkieletową a siecią dostępową.

Sieci dostępowe: infrastruktura, której zadaniem jest doprowadzenie sygnału do sieci domowych abonentów. Stanowi najniższą warstwę w sieci telekomunikacyjnej, a jej połączenia sięgają bezpośrednio do lokalizacji użytkownika końcowego (tzw. ostatnia mila).

Sieć instalacyjna: dostarcza sygnał optyczny do konkretnego lokalu (gniazdka optycznego lub bezpośrednio urządzenia końcowego).

Odporność sieci: jest to zdolność podmiotu do łagodzenia szkód (takich jak uszkodzenia systemów, procesów i reputacji), utrzymania ciągłości działania, szybkiego wykrywania zagrożeń oraz sprawnego przywracania usług po awariach lub zakłóceniach w przypadku naruszenia systemów, infrastruktury lub danych. Odporność sieci dotyczy zarówno zagrożeń zewnętrznych, jak i wewnętrznych (na przykład błędy ludzkie lub sabotaż).

Obszar wykluczony informacyjnie: jest to obszar geograficzny na którym, z różnych przyczyn (np. ekonomicznych), nie są świadczone usługi telekomunikacyjne przez żadnego operatora lub na obszarze tym funkcjonuje jeden operator i prowadzi on praktyki monopolistyczne, lub też usługi są dostępne w ograniczonym zakresie albo są oferowane niewielkiej grupie mieszkańców.

Zabezpieczenia sieci: to inaczej wszelkie działania mające na celu ochronę sprawnego działania i integralności sieci oraz danych, obejmujące zarówno rozwiązania sprzętowe, jak i programistyczne. Skuteczne zabezpieczenia sieci umożliwiają zarządzanie dostępem do sieci. Ich zadaniem jest również przeciwdziałanie różnym zagrożeniom i udaremnienie im uzyskania dostępu do sieci oraz rozprzestrzeniania się w niej⁶¹.

Sieci szerokopasmowe: „rodzaj połączeń internetowych charakteryzujących się dużą prędkością przepływu informacji mierzoną w kb/s (kilobitach na sekundę), Mb/s (megabitach na sekundę) lub w Gb/s (gigabitach na sekundę). Ze względu na szybki postęp techniczny w tej dziedzinie telekomunikacji określenie granicznej przepływności (przepustowości łączy cyfrowych), od której dane połączenie uznajemy za szerokopasmowe jest narażone na dezaktualizację wkrótce po przyjęciu definicji, dlatego we wspólnotowych badaniach wykorzystania ICT połączenia szerokopasmowe definiuje się na podstawie rodzaju łączy internetowych. Zgodnie z taką definicją dostęp szerokopasmowy umożliwiają technologie z rodziny DSL (ADSL, SDSL itp.), sieci telewizji kablowej (modem kablowy), telefony komórkowe z obsługą przynajmniej 3G (w tym 4G oraz 5G) oraz inne, np. łączy satelitarne, stałe połączenia bezprzewodowe (sieć radiowa). Połączenia szerokopasmowe umożliwiają

⁶¹ https://www.cisco.com/c/dam/global/pl_pl/solutions/small-business/pdf/SMB_NetworkSecurityChecklist.pdf

przekazywanie wysokiej jakości obrazów, filmów, oglądanie telewizji lub granie w gry internetowe, telefonowanie przez Internet z możliwością oglądania rozmówcy oraz pozwalają na korzystanie z różnorodnych zaawansowanych usług internetowych”⁶².

Sieci bezprzewodowe (ang. wireless networks)⁶³: jako medium transmisyjne wykorzystują fale radiowe (elektromagnetyczne) lub fale podczerwone. Ich użycie nie wymaga okablowania, co pozwala na obniżenie kosztów i utworzenie sieci w miejscach, które z różnych powodów nie mają dostępu do sieci kablowej. Pozwala to również na korzystanie z sieci użytkownikom mobilnym.

Sieci kablowe: do transmisji wykorzystuje różne rodzaje okablowania telekomunikacyjnego, przesyłającego różne rodzaje fal:

- linie transmisyjne – sygnały elektryczne,
- fale elektromagnetyczne – falowody (np. telewizja, radiolokacja i radionawigacja),
- światłowody – fale świetlne (np. Internet).

Internet stacjonarny: to stałe łącze domowe, którego główną cechą jest nielimitowany dostęp do sieci. Można wyróżnić jego różne rodzaje, takie jak np. światłowody, Internet kablowy w sieci LAN, telefoniczne łącze przewodowe DSL lub ADSL, połączenie poprzez satelitę czy wykorzystujące fale radiowe.

Internet mobilny: to łącze bezprzewodowe udostępniane przez operatorów sieci komórkowych. Pozwala na korzystanie z Internetu w każdym miejscu, które znajduje się w zasięgu danej sieci. Transmisja odbywa się w ramach transferu danych.

Zaawansowanie

Według najnowszych danych w 2025 r. na świecie odnotowano od 5.78 miliarda (wg GSMA Intelligence) do 6.72 miliarda (wg Ericsson) unikalnych użytkowników urządzeń mobilnych – jest to ponad 70% światowej populacji⁶⁴. Z tego 4.82 miliarda użytkowników korzysta z danych komórkowych. Również w październiku 2025 r. wykorzystanie Internetu osiągnęło poziom 6,04 miliarda użytkowników, co stanowi 73,2% całej populacji.

W raporcie „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” zostały wyróżnione cztery główne obszary technologiczne potencjalnego rozwoju w zakresie łączności⁶⁵. Należą do nich:

- **Architektura i zarządzanie sieciami**: obszar ten dotyczy rozwoju otwartych, elastycznych i programowalnych architektur telekomunikacyjnych. Powstawanie i rozwój otwartych i interoperacyjnych ekosystemów technologicznych ma umożliwić głębokie zmiany na rynku ICT poprzez np. wejście na rynek nowych uczestników oraz

⁶² Społeczeństwo informacyjne w Polsce, GUS, Warszawa, Szczecin, 2025, str. 128.

⁶³ Patrz również rozdział „5G, 6G i sieci bezprzewodowe”.

⁶⁴ <https://datareportal.com/reports/digital-2026-global-overview-report>

⁶⁵ Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji, PARP, Warszawa, 2026.

redefinicję relacji pomiędzy takimi podmiotami jak operatorzy, dostawcy infrastruktury i integratorzy usług. Rozproszone i adaptacyjna infrastruktura łączności ma również umożliwić zwiększenie elastyczności i odporności operacyjnej sieci telekomunikacyjnych.

- **Sieci bezprzewodowe nowej generacji:** obszar ten obejmuje rozwój technologii łączności bezprzewodowych m.in. 5G i kolejnych generacji (tzw. futureG) oraz kolejnych standardów Wi-Fi. Technologie te są obecnie uznawane za jedne z najważniejszych elementów współczesnej gospodarki cyfrowej – stają się platformą dla nowych usług, modeli biznesowych i ekosystemów cyfrowych.
- **Specjalistyczne systemy komunikacji:** obszar ten obejmuje projektowanie rozwiązań dla zastosowań wymagających szczególnej niezawodności, precyzji i zasięgu. Systemy komunikacyjne tego typu pozwalają na integrację komunikacji w czasie rzeczywistym z otoczeniem fizycznym i cyfrowym, co prowadzi do reorganizacji systemów transportu, miejskich, logistycznych i krytycznych.
- **Technologie radiowe i widmo:** obszar ten obejmuje rozwiązania związane z zarządzaniem spektrum, programowalnymi środowiskami bezprzewodowymi, radiem kognitywnym oraz technologiami powierzchni inteligentnych (powierzchnie pozwalające na sterowanie propagacją sygnału radiowego). Technologie tego typu mają pozwolić na skokowy wzrost wydajności sieci, poprawę efektywności wykorzystania widma, a także rozwój nowych funkcjonalności komunikacyjnych i lokalizacyjnych.

Technologie te pokazują przejście od tradycyjnego pojmowania sieci jako scentralizowanych i sprzętowo zdefiniowanych do środowisk otwartych, programowalnych, rozproszonych i zintegrowanych z analityką danych, sztuczną inteligencją i automatyką. Wspólną cechą wyróżnionych technologii jest zwiększanie przepustowości, elastyczności i interoperacyjności sieci, a także wzrost ich znaczenia jako infrastruktury krytycznej państwa. Rozwój technologii z obszaru łączności ma prowadzić m.in. do otwierania i decentralizacji rynku, zmian w modelach biznesowych operatorów i dostawców usług, a także do tworzenia nowych ekosystemów łączących w sobie elementy łączności, sztucznej inteligencji oraz automatyzacji.

Do unijnych aktów prawnych i strategii w obszarze łączności należą m.in. [Digital Networks Act](#) czy też [EU Electronic Communications Code](#).

Łączność w Polsce

Według oceny zamieszczonej w raporcie „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” w Polsce rozwój technologii z obszaru sieci i łączności są rozwijane w zróżnicowany sposób. Obejmują one wdrożenia infrastruktury, projekty B+R oraz udział w inicjatywach na poziomie europejskim. Natomiast podmioty krajowe w ograniczonym stopniu biorą udział w tworzeniu kluczowych technologii i standardów. Według ustaleń raportu dominującą rolą Polski jest adopcja, integracja oraz testowanie rozwiązań globalnych.

Według najnowszych danych rządowych (maj 2026 r.) najwięcej użytkowników korzysta z Internetu światłowodowego – 78,6%, z Internetu kablowego 12%, a Internetu radiowego 9,4%⁶⁶. Przekłada się to na 6 799 307 punktów adresowych w zasięgu Internetu światłowodowego, 3 556 355 punktów adresowych w zasięgu Internetu radiowego i 2 590 474 punktów adresowych w zasięgu Internetu kablowego.

W 2024 r. w Polsce funkcjonowało 154 przedsiębiorców telekomunikacyjnych, z czego 4 z nich – P4 (działa pod marką Play), Orange Polska, T-Mobile, Polkomtel – posiadają własną infrastrukturę telekomunikacyjną⁶⁷.

Według danych UKE w 2024 r. sieć 5G pokrywała swoim zasięgiem 72% terytorium Polski, a dostęp do niej miało 92% Polaków. Natomiast sieć LTE (4G) objęła zasięgiem 99% terytorium państwa.

Według danych GUS w 2024 r. ogólne przychody z działalności telekomunikacyjnej wyniosły 44 415,5 mln PLN, z czego najwięcej przychodów przyniosły telefonia ruchoma (16 534,3 mln PLN) oraz usługi wiązane (14 027,9 mln PLN)⁶⁸.

W 2024 r. funkcjonowało 1 995,1 tys. łącz abonenckich w telefonii stacjonarnej, z czego 1 196,8 tys. były to łącza konsumenckie, a 798,3 tys. były to łącza dla biznesu. Przeważająca większość z nich znajdowała się w woj. Mazowieckim – 408,1 tys. łącz. Liczba ogółu abonentów telefonii stacjonarnej wyniosła w 2024 r. 1 724,4 tys. abonentów, z czego 1 334,7 tys. byli to konsumenci, natomiast 389,7 tys. to biznes. Najwięcej abonentów (446,6 tys.) tego typu telefonii odnotowano również w Mazowieckim.

W przypadku telefonii mobilnej w 2024 r. liczba aktywnych kart SIM wyniosła 53,2 mln. Zdecydowana większość z nich (39,7 mln – 74,6%) to karty typu post-paid (abonament opłacany po zakończeniu cyklu rozliczeniowego), a 25,4% były to karty przedpłacone (tzw. pre-paid).

W 2024 r. transmisja danych osiągnęła wolumen rzędu 11 243,0 PB (petabajtów). Był to znaczny wzrost względem 2023 r. kiedy to wartość ta wyniosła 9 486,3 PB. Zdecydowana większość transmisji (11 087,3 PB) dotyczyła transmisji krajowych. Również w 2024 r. polscy abonenci wysłali 38 651,9 mln SMS i 2 415,2 mln MMS.

W 2024 r. najwięcej użytkowników Internetu (80 506,6 tys.) korzystało z technologii mobilnych, natomiast najmniej z bezprzewodowych technologii stacjonarnych (565,4 tys.). Z przewodowych technologii stacjonarnych korzystało 9 143,2 tys. użytkowników.

Popularnym sposobem zakupu usług telekomunikacyjnych są tzw. usługi wiązane, tj. zakup dostępu do różnych usług w ramach jednego pakietu. W 2024 r. najpopularniejszy był pakiet telefonia mobilna + Internet mobilny – zakupiło go 46,8% abonentów.

⁶⁶ <https://internet.gov.pl/stats/>

⁶⁷ Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w 2024 roku, UKE, Warszawa, 2025.

<https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-rynku-telekomunikacyjnego-w-2024-roku,590.html>

⁶⁸ Telekomunikacja 2024, GUS, Szczecin, 2025. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/transport-i-lacznosc/lacznosc/telekomunikacja-w-2024-r-,2,9.html>

Dokładne informacje dot. rynku telekomunikacji i łączności w Polsce można znaleźć w corocznym opracowaniu UKE „Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego”. Urząd Komunikacji Elektronicznej jest to organ regulacyjny i kontrolny w zakresie działalności telekomunikacyjnej, pocztowej oraz gospodarki zasobami częstotliwości. Sprawuje również nadzór i kontrolę nad rynkiem w zakresie „wyrobów emitujących lub podatnych na emisję pola elektromagnetycznego (...) wprowadzonych do obrotu handlowego w RP” (są to np. urządzenia radiowe)⁶⁹.

Natomiast za kształtowanie polityki państwa w obszarze łączności odpowiada Ministerstwo Cyfryzacji, w skład którego wchodzi [Departament Telekomunikacji](#). Według informacji zawartych na stronie ministerstwa, jednym z działań, za które odpowiada Departament Telekomunikacji jest realizacja Narodowego Planu Szerokopasmowego. NSP jest to przyjęty w 2014 r. i zaktualizowany w 2020 r. dokument strategiczny, którego celem jest określenie działań i środków pozwalających na zapewnienie powszechnego szerokopasmowego dostępu do Internetu⁷⁰.

Prace w zakresie B+R telekomunikacji i technik informacyjnych prowadzone są także przez [Instytut Łączności](#). Do zadań instytutu należy prowadzenie prac w zakresie m.in. rozwoju sieci telekomunikacyjnej państwa, normalizacji i standaryzacji systemów oraz urządzeń telekomunikacyjnych. Instytut zapewnia także wsparcie naukowe, badawcze i techniczne instytucjom państwowym oraz współpracuje z innymi organizacjami i instytucjami badawczymi.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/digital-networks-act>
2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/eu-electronic-communications-code>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/backbone-connectivity>
4. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/connectivity>
5. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/5g-observatory-2025>
6. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/narodowy-plan-szerokopasmowy>
7. <https://www.uke.gov.pl/akt/raport-o-stanie-rynku-telekomunikacyjnego-w-2024-roku,590.html>
8. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20240001221>

Dodatkowe informacje

9. <https://umwd.dolnyslask.pl/dss/o-projekcie/slowniczek/>
10. <https://esezam.okno.pw.edu.pl/mod/book/tool/print/index.php?id=75#ch1611>
11. https://www.cisco.com/c/dam/global/pl_pl/solutions/small-business/pdf/SMB_NetworkSecurityChecklist.pdf

⁶⁹ <https://uke.gov.pl/o-nas/>

⁷⁰ <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/narodowy-plan-szerokopasmowy>

12. <https://www.gov.pl/web/5g/rola-laczności-w-zapewnieniu-ciągłości-działania-usług-publicznych>
13. <https://zpe.gov.pl/a/struktura-sieci-szerokopasmowej/DUzR4s2qQ>

Technologie bezpieczeństwa

Cyberbezpieczeństwo (ang. Cybersecurity)

Opis technologii

Definicja

Cyberbezpieczeństwo: to zbiór praktyk, procesów oraz technologii mających na celu ochronę systemów komputerowych, sieci, danych i urządzeń przed nieautoryzowanym dostępem, atakami, uszkodzeniami oraz kradzieżą. W kontekście Przemysłu 4.0, cyberbezpieczeństwo odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu bezpiecznego funkcjonowania infrastruktury cyfrowej oraz ochrony wrażliwych danych przed zagrożeniami wewnętrznymi i zewnętrznymi. Ze względu na rosnącą liczbę połączonych urządzeń IoT, zautomatyzowanych systemów i rozproszonych środowisk chmurowych, cyberbezpieczeństwo stało się nieodzownym elementem strategii organizacji.

Audyt zabezpieczeń: proces oceny stanu bezpieczeństwa infrastruktury IT, aplikacji, danych oraz operacji w organizacji w celu identyfikacji potencjalnych luk i słabości. Audyt obejmuje analizę konfiguracji systemów, przegląd polityk bezpieczeństwa, testy penetracyjne, analizę logów oraz ocenę zgodności z obowiązującymi standardami i regulacjami. Celem audytu jest zrozumienie stanu bezpieczeństwa organizacji, wskazanie obszarów wymagających poprawy oraz opracowanie zaleceń w zakresie wdrażania odpowiednich środków ochrony.

Podstawowe rodzaje

- **Bezpieczeństwo sieci:** zabezpieczenie sieci komputerowych przed zagrożeniami takimi jak ataki typu DDoS, ransomware, phishing czy nieautoryzowane próby dostępu.
- **Bezpieczeństwo aplikacji:** ochrona aplikacji i oprogramowania przed podatnościami, które mogą zostać wykorzystane do przejęcia kontroli nad systemem.
- **Bezpieczeństwo informacji:** ochrona danych wrażliwych i poufnych, zarówno w stanie spoczynku (przechowywane), jak i w trakcie przesyłania, poprzez metody szyfrowania i zarządzanie dostępem.
- **Bezpieczeństwo operacyjne:** procesy i środki zapobiegawcze zapewniające ciągłość operacji oraz minimalizujące ryzyko ataków na systemy krytyczne i infrastrukturę przemysłową.
- **Zarządzanie tożsamością i dostępem (IAM):** kontrola dostępu użytkowników do zasobów cyfrowych, co obejmuje uwierzytelnianie wieloskładnikowe oraz zarządzanie rolami i uprawnieniami.

Główne role

- **Ochrona wszystkich kategorii danych:** m.in. danych wrażliwych, informacji umożliwiających identyfikację osób, chronionych informacji zdrowotnych, informacji osobistych, własności intelektualnej oraz branżowych systemów informacyjnych przed kradzieżą i uszkodzeniem.
- **Ochrona powszechnie używanych systemów:** komputerowych, sieci oraz wymiany danych.
- **Ochrona innych usług i urządzeń:** w tym usług chmurowych, urządzeń przenośnych (np. smartfonów) oraz rozwiązań Internetu Rzeczy.

Powiązane technologie

- **Sztuczna inteligencja:** AI wspiera cyberbezpieczeństwo poprzez wykrywanie wzorców i anomalii w ruchu sieciowym oraz identyfikację potencjalnych zagrożeń w czasie rzeczywistym.
- **Chmura obliczeniowa:** cyberbezpieczeństwo w chmurze obejmuje zabezpieczenia takie jak szyfrowanie danych, zarządzanie tożsamością oraz monitorowanie dostępu, co chroni zasoby przechowywane w środowiskach chmurowych.
- **Big Data:** bezpieczne przetwarzanie i przechowywanie danych Big Data wymaga metod ochrony, które zapobiegają nieautoryzowanemu dostępowi oraz zapewniają integralność danych.
- **Internet Rzeczy:** IoT wymaga zaawansowanych środków bezpieczeństwa, aby chronić urządzenia połączone z siecią i zapobiegać atakom, które mogą prowadzić do przejęcia kontroli nad systemami przemysłowymi.
- **Automatyzacja:** automatyzacja wspiera cyberbezpieczeństwo poprzez szybkie reagowanie na zagrożenia oraz wdrażanie środków zaradczych, co minimalizuje ryzyko uszkodzenia systemu.

Podstawowe elementy

- **Firewall (Zapora sieciowa):** urządzenie lub oprogramowanie, które monitoruje i kontroluje ruch sieciowy w celu ochrony przed nieautoryzowanymi próbami dostępu.
- **Systemy wykrywania włamań (IDS) i zapobiegania włamaniom (IPS):** IDS monitorują sieć w poszukiwaniu nieprawidłowości i sygnalizują potencjalne ataki, natomiast IPS automatycznie blokują podejrzane działania.
- **Szyfrowanie danych:** technologia zabezpieczająca dane poprzez ich zaszyfrowanie, co sprawia, że są one nieczytelne bez posiadania odpowiedniego klucza deszyfrującego.
- **Uwierzelnianie wieloskładnikowe (MFA):** proces wymagający od użytkowników potwierdzenia tożsamości poprzez różne metody, takie jak hasło, token, czy skan biometryczny, co zwiększa bezpieczeństwo dostępu do zasobów.

- **Oprogramowanie antywirusowe i antymalware:** programy chroniące urządzenia przed wirusami, malware i innymi złośliwymi oprogramowaniami, które mogą uszkodzić system lub przejąć kontrolę nad danymi.
- **Zarządzanie tożsamością i dostępem (IAM):** systemy pozwalające na kontrolowanie, kto ma dostęp do jakich zasobów w sieci, przy użyciu mechanizmów takich jak role, uprawnienia i protokoły dostępu.
- **Backup i odzyskiwanie danych:** systemy przechowujące kopie zapasowe danych oraz umożliwiające ich szybkie przywrócenie w przypadku awarii lub ataku ransomware.
- **Monitorowanie bezpieczeństwa:** ciągłe monitorowanie sieci i urządzeń w celu wykrywania podejrzanych działań i szybkiej reakcji na zagrożenia. Systemy SIEM (Security Information and Event Management) gromadzą i analizują dane z różnych źródeł, co pozwala na identyfikację potencjalnych zagrożeń.
- **Audyt i zgodność:** regularne przeglądy i audyty, które zapewniają zgodność z regulacjami i normami branżowymi (np. RODO, ISO 27001) oraz identyfikują luki w zabezpieczeniach.

Mechanizm działania

- **Identyfikacja zasobów i zagrożeń:** organizacja identyfikuje kluczowe zasoby, które wymagają ochrony, oraz potencjalne zagrożenia, które mogą wpłynąć na bezpieczeństwo tych zasobów.
- **Zapobieganie zagrożeniom:** wdrożenie środków ochronnych, takich jak firewalle, szyfrowanie, uwierzytelnianie wieloskładnikowe, które ograniczają ryzyko nieautoryzowanego dostępu i ataków.
- **Monitorowanie i wykrywanie:** systemy monitorowania (np. IDS, SIEM) śledzą ruch sieciowy, analizują działania użytkowników oraz wykrywają anomalie i potencjalne ataki w czasie rzeczywistym.
- **Reagowanie na incydenty:** w przypadku wykrycia incydentu, zespół ds. cyberbezpieczeństwa wdraża środki zaradcze, takie jak izolowanie zainfekowanych systemów, usunięcie złośliwego oprogramowania oraz przywrócenie danych z kopii zapasowych.
- **Odzyskiwanie danych:** po incydencie organizacja wdraża procesy odzyskiwania danych oraz przywracania pełnej funkcjonalności systemu, minimalizując przerwy w działalności.
- **Przegląd i doskonalenie:** organizacja przeprowadza audyty i analizy w celu oceny skuteczności strategii cyberbezpieczeństwa, identyfikuje nowe zagrożenia oraz wprowadza usprawnienia, aby minimalizować ryzyko przyszłych incydentów.

- **Szkolenie i edukacja:** organizacje prowadzą szkolenia dla pracowników, aby zwiększyć świadomość zagrożeń i nauczyć najlepszych praktyk związanych z bezpieczeństwem danych, co zmniejsza ryzyko błędów ludzkich.

Rodzaje zagrożeń⁷¹

- **Atak odmowy usługi (ang. Distributed Denial of Service – DDoS):** polega na przeciążeniu serwera, sieci lub usługi internetowej poprzez zalewanie ich dużą liczbą zapytań, co powoduje przerwy w dostępności systemów i usług.
- **Złośliwe oprogramowanie (ang. malware):** każdy rodzaj programu opracowanego przez cyberprzestępców, którego celem jest wyrządzenie szkody, np. wykradzenie lub zniszczenie danych, uzyskanie nieautoryzowanego dostępu do systemów lub zakłócanie ich działania.
- **Ransomware:** rodzaj złośliwego oprogramowania, którego celem jest zainfekowanie systemu ICT programem szyfrującym, blokującym dostęp do danych lub systemów. Odzyskanie dostępu wymaga zapłaty okupu (ang. ransom).
- **Phishing:** atak wykorzystujący inżynierię społeczną w celu wyłudzenia poufnych danych, np. haseł, loginów, danych bankowych. Najczęściej polega na podszywaniu się pod zaufane instytucje i wywoływaniu impulsywnych reakcji użytkowników.
- **Socjotechnika (inżynieria społeczna):** manipulacja psychologiczna prowadząca do nakłonienia ofiary do niebezpiecznych działań.
- **Ataki na infrastrukturę OT (ang. Operational Technology – OT):** zagrożenia, takie jak ransomware, malware lub DDoS, wymierzone w systemy sterowania przemysłowego.
- **Atak na łańcuchy dostaw (ang. Supply chain attacks):** pośrednie ataki skierowane na słabiej zabezpieczonych partnerów, umożliwiające dalszą infiltrację organizacji wchodzących w skład łańcucha dostaw.

Przykładowe wykorzystania

- **Bezpieczeństwo algorytmów w sztucznej inteligencji:** koncentruje się na ochronie systemów opartych na uczeniu maszynowym i algorytmach AI przed niepożądanymi manipulacjami, atakami, złośliwym wykorzystaniem oraz fałszowaniem danych. Zagrożenia dotyczą zarówno uczenia modeli (ataki na dane treningowe), jak i ich wykorzystania w środowisku produkcyjnym (ataki na dane wejściowe, takie jak tzw. adversarial attacks). W związku z coraz szerszym zastosowaniem AI w krytycznych obszarach, takich jak finanse, opieka zdrowotna oraz bezpieczeństwo publiczne, ochrona integralności, wiarygodności i niezawodności algorytmów AI jest niezbędna, aby zapewnić bezpieczne i etyczne ich użycie.

⁷¹ <https://www.parp.gov.pl/component/publications/publication/budowanie-odpornosci-przedsiębiorstw-w-kontekście-bezpieczeństwa-cyfrowego-w-klastrach>

- **Bezpieczeństwo danych:** obejmuje zestaw praktyk, technologii i strategii, które mają na celu ochronę danych przed nieautoryzowanym dostępem, modyfikacją, utratą lub zniszczeniem. Ochrona danych obejmuje ich przechowywanie, przetwarzanie, przesyłanie oraz archiwizację zarówno w środowiskach fizycznych, jak i cyfrowych. Bezpieczeństwo danych obejmuje takie technologie jak szyfrowanie, kontrola dostępu, systemy wykrywania włamań, zarządzanie tożsamością oraz mechanizmy zapewniające zgodność z regulacjami prawnymi, takimi jak RODO (GDPR) czy HIPAA.
- **Bezpieczne usługi chmurowe:** obejmują zestaw rozwiązań, praktyk oraz technologii, które mają na celu zapewnienie ochrony danych i aplikacji działających w środowiskach chmurowych. Ochrona ta dotyczy zarówno publicznych, prywatnych, jak i hybrydowych środowisk chmurowych i obejmuje bezpieczeństwo przechowywania, transmisji oraz przetwarzania danych. Kluczowe elementy bezpiecznych usług chmurowych to: szyfrowanie, zarządzanie tożsamością, ochrona przed atakami DDoS, zabezpieczenia aplikacji chmurowych oraz monitorowanie aktywności. Bezpieczne usługi chmurowe mają na celu ochronę przed nieautoryzowanym dostępem, zagrożeniami wewnętrznymi oraz naruszeniami integralności i poufności danych.
- **Cyberbezpieczeństwo infrastruktury krytycznej:** obejmuje strategię, technologie oraz działania mające na celu ochronę systemów i zasobów uznawanych za kluczowe dla funkcjonowania społeczeństwa i gospodarki. Do infrastruktury krytycznej zalicza się sieci energetyczne, systemy telekomunikacyjne, transportowe, wodociągowe oraz inne zasoby, których naruszenie mogłoby prowadzić do poważnych konsekwencji dla zdrowia, bezpieczeństwa lub stabilności gospodarczej. Cyberbezpieczeństwo w tym kontekście obejmuje wykrywanie, zapobieganie i reagowanie na cyberataki, a także zabezpieczanie systemów SCADA i ICS (Industrial Control Systems).
- **Cyberbezpieczeństwo przyrządów i systemów nano- i mikroelektronicznych:** obejmuje ochronę zaawansowanych układów elektronicznych, takich jak procesory, mikroczipy, układy scalone oraz urządzenia MEMS i NEMS, przed atakami cybernetycznymi i fizycznymi. W szczególności dotyczy zabezpieczeń przed przejęciem kontroli nad urządzeniami, wprowadzeniem złośliwego oprogramowania, fałszowaniem sygnałów czy wykorzystaniem luk w oprogramowaniu układów sterujących. Ze względu na rosnącą miniaturyzację urządzeń, cyberbezpieczeństwo mikroelektroniki wymaga nowych strategii ochrony, takich jak uwierzytelnianie sprzętowe, techniki zapobiegania atakom typu side-channel oraz bezpieczne projektowanie układów scalonych (hardware security).
- **Rozwiązania kryptografii i cyberbezpieczeństwa w blockchain:** obejmują zestaw technologii, protokołów i praktyk mających na celu ochronę danych, transakcji oraz tożsamości w systemach opartych na technologii blockchain. Ochrona ta polega na wykorzystaniu kryptograficznych metod szyfrowania, uwierzytelniania, a także technik zapewniających integralność i niezmiennąść danych. Ze względu na zdecentralizowany charakter blockchain, szczególną uwagę przykładają się do

bezpieczeństwa konsensusu, ochrony kluczy kryptograficznych, zarządzania tożsamością oraz ochrony przed atakami typu Sybil, 51% czy przejęciem węzłów sieci.

- **Rozwiązania zabezpieczające infrastrukturę fizyczną:** obejmują technologie, systemy i procedury stosowane w celu ochrony fizycznych zasobów IT, takich jak centra danych, serwerownie oraz inne krytyczne obiekty. Ochrona fizyczna infrastruktury obejmuje systemy kontroli dostępu, monitoring wideo, zabezpieczenia przed pożarami i klęskami żywiołowymi, a także fizyczne mechanizmy ochrony przed włamaniami i sabotażem. Jest to kluczowy element zabezpieczania danych oraz zapewniania ciągłości operacyjnej w przypadku ataków lub katastrof naturalnych.
- **Uwierzytelnienie (podpisy elektroniczne, rozwiązania biometryczne, uwierzytelnienie wieloskładnikowe itp.):** to proces weryfikacji tożsamości użytkownika w celu zapewnienia, że tylko autoryzowane osoby mogą uzyskać dostęp do chronionych zasobów. Stosowane metody obejmują uwierzytelnienie jednoskładnikowe (np. hasło), wieloskładnikowe (np. hasło oraz jednorazowy kod SMS) oraz zaawansowane techniki biometryczne, takie jak skanowanie odcisku palca, rozpoznawanie twarzy czy analiza głosu. Podpisy elektroniczne są formą uwierzytelnienia cyfrowego, które umożliwiają potwierdzenie tożsamości podpisującego oraz nienaruszalność dokumentu. Celem uwierzytelnienia jest zapewnienie, że tylko upoważnione osoby mogą wykonywać określone operacje i uzyskiwać dostęp do chronionych danych.
- **Zabezpieczenia aplikacji:** to zestaw procesów, technologii i praktyk mających na celu ochronę aplikacji przed zagrożeniami i atakami, które mogą wpłynąć na ich integralność, dostępność lub poufność. Zabezpieczenia aplikacji obejmują testy penetracyjne, kontrolę dostępu, ochronę kodu źródłowego, zarządzanie podatnościami, analizę behawioralną oraz wykrywanie zagrożeń. Celem jest ochrona aplikacji przed zagrożeniami takimi jak ataki SQL injection, cross-site scripting (XSS), ataki na sesje użytkowników oraz manipulacje danymi.
- **Zabezpieczenia IoT (Internet of Things):** to zestaw praktyk, technologii oraz procedur mających na celu ochronę urządzeń połączonych z Internetem, takich jak czujniki, inteligentne urządzenia domowe, systemy monitorowania oraz przemysłowe systemy IoT. Ochrona IoT obejmuje zabezpieczenie komunikacji, autoryzację dostępu, kontrolę integralności oprogramowania oraz szyfrowanie danych. Ze względu na różnorodność urządzeń oraz ich specyfikę technologiczną, zabezpieczenia IoT muszą być dostosowane do specyficznych zagrożeń, takich jak ataki typu DDoS, przejęcie kontroli nad urządzeniem, fałszowanie danych, a także infekcje złośliwym oprogramowaniem.
- **Zabezpieczenia sieci:** to zestaw narzędzi, technologii i praktyk mających na celu ochronę integralności, dostępności i poufności danych przesyłanych przez sieci komputerowe. Zabezpieczenia te obejmują mechanizmy zapobiegające nieautoryzowanemu dostępowi, monitorujące ruch sieciowy, wykrywające ataki oraz blokujące szkodliwe oprogramowanie i zagrożenia, takie jak ataki DDoS, złośliwe oprogramowanie oraz nieautoryzowane próby dostępu. Wdrażane zabezpieczenia

mogą obejmować zapory sieciowe, systemy wykrywania i zapobiegania włamaniom (IDS/IPS), segmentację sieci oraz szyfrowanie danych przesyłanych w sieci.

- **Zabezpieczenie infrastruktury chmurowej:** obejmuje ochronę fizycznej i wirtualnej infrastruktury wspierającej środowiska chmurowe, takie jak centra danych, serwery, magazyny danych oraz sieci. W przeciwieństwie do zabezpieczeń aplikacji chmurowych, zabezpieczenie infrastruktury skupia się na ochronie podstawowej architektury technicznej, na której działają wszystkie usługi chmurowe. Obejmuje to monitorowanie dostępu fizycznego do centrów danych, ochronę przed zagrożeniami środowiskowymi, a także zabezpieczenia przed cyberatakami skierowanymi na wirtualne maszyny, sieci w chmurze oraz systemy przechowywania danych.
- **Zarządzanie i doradztwo w zakresie cyberbezpieczeństwa:** to zestaw działań wspierających organizację w projektowaniu, wdrażaniu i zarządzaniu strategiami ochrony zasobów cyfrowych. Celem doradztwa jest zapewnienie odpowiednich procedur, polityk oraz technologii mających na celu minimalizację ryzyka związanego z cyberatakami, wyciekami danych oraz innymi zagrożeniami IT. Usługi doradcze obejmują analizę ryzyka, tworzenie planów ciągłości działania, wdrażanie standardów zgodności oraz edukację pracowników. W ramach zarządzania cyberbezpieczeństwem przedsiębiorstwa opracowują strategie ochrony, monitorują zagrożenia oraz prowadzą działania prewencyjne, aby zapewnić odporność na cyberzagrożenia.
- **Inne rozwiązania z zakresu cyberbezpieczeństwa:** obejmują technologie, narzędzia i metody, które nie mieszczą się w standardowych kategoriach, ale mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia kompleksowej ochrony zasobów cyfrowych. Do tej grupy należą zaawansowane techniki ochrony przed zagrożeniami zero-day, systemy deception (oszukiwania intruzów), technologie honeypot (pułapki), analityka zagrożeń, zabezpieczenia fizyczne, systemy ochrony reputacji online oraz narzędzia wspierające ochronę w mediach społecznościowych. Rozwiązania te mogą być uzupełnieniem tradycyjnych metod cyberbezpieczeństwa i są stosowane w celu zwiększenia odporności systemów IT na złożone ataki oraz nowe rodzaje zagrożeń.

Zaawansowanie

Zarówno różnorodne rozwiązania, jak i szkolenia w zakresie cyberbezpieczeństwa są powszechnie dostępne na rynku. Wyjątek stanowią zaawansowane technologie kwantowe np. kryptografia kwantowa.

Według raportu Marketsandmarkets globalny rynek cyberbezpieczeństwa osiągnął w 2025 r. wartość 227.59 mld USD. Do 2030 r. wartość ta ma wzrosnąć do 351.92 mld USD, przy CAGR na poziomie 9,1%⁷².

Na poziomie unijnym cyberbezpieczeństwo jest regulowane przez szereg aktów prawnych, strategii i planów działania⁷³. Najważniejszym z nich jest dyrektywa [NIS2](#), która ustanawia

⁷² <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/cyber-security-market-505.html>

⁷³ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/cybersecurity>

jednolite ramy prawne w celu zapewnienia cyberbezpieczeństwa w 18 sektorach uznanych za krytyczne⁷⁴.

Cyberbezpieczeństwo w Polsce

„Obecnie różnego rodzaju zabezpieczenia cyberbezpieczeństwa są powszechnie wykorzystywane w polskich przedsiębiorstwach. Choć może się wydawać, że ryzyko związane z cyberzagrożeniami nie dotyczy danej organizacji, skala incydentów zarejestrowanych przez CERT Polska (w 2024 r. zarejestrowano 600 990 zgłoszeń, z czego 103 449 zostało uznanych i obsłużonych jako incydenty cyberbezpieczeństwa) pokazuje, że w obecnych warunkach wdrażanie rozwiązań i prowadzenie działań edukacyjnych w obszarze cyberbezpieczeństwa jest niezbędnym elementem prowadzenia działalności gospodarczej. Ich brak może prowadzić do poważnych konsekwencji, w tym strat finansowych i wizerunkowych wynikających z przerwania ciągłości działania lub produkcji, utraty wiarygodności w łańcuchach dostaw, utraty przewagi konkurencyjnej oraz potencjalnych kar finansowych za naruszenie przepisów prawa, np. RODO.

Wśród danych GUS dotyczących wykorzystywanych przez firmy środków cyberbezpieczeństwa widać ich duże zróżnicowanie, a także ogólną tendencję wzrostową w ich wykorzystaniu. Odsetek firm wykorzystujących co najmniej jeden z wymienionych środków cyberbezpieczeństwa wahał się od 87,2% w 2019 r. do 95,3% w 2021 r. Dla porównania w Unii Europejskiej średni odsetek przedsiębiorstw wynosił 92,4% w 2019 r., 91,8% w 2022 r. i 92,8% w 2024 r.

Widoczna jest również coraz większa popularność stosowania co najmniej dwóch metod uwierzytelniania – odsetek polskich firm w tym przypadku przekracza 40%.

Najbardziej popularnym środkiem bezpieczeństwa jest identyfikacja i uwierzytelnianie silnym hasłem – w 2025 r. metodę tę stosowało 81% badanych firm. Natomiast najrzadziej stosowane jest uwierzytelnianie metodami biometrycznymi. Jednak również w tym przypadku można zauważyć stopniowy wzrost ich wykorzystania – odsetek firm korzystających z metod biometrycznych wzrósł z 7,1% w 2019 r. do 18,6% w 2025 r.

Dużą popularnością cieszy się także szyfrowanie danych, dokumentów i wiadomości e-mail (stosowane w prawie połowie firm) oraz wykonywanie kopii zapasowych (stosowane w ponad 60% przedsiębiorstw).

W latach 2019-2025 zdecydowana większość przedsiębiorstw (w 2025 r. 92% małych, 97,5% średnich i 99,8% dużych firm) stosowała co najmniej jeden środek cyberbezpieczeństwa. Choć ponownie to w małych przedsiębiorstwach można zaobserwować najniższy odsetek firm korzystających ze środków cyberbezpieczeństwa, to w większości przypadków (poza 2019 r.) pozostawał on na poziomie przekraczającym 90% podmiotów. Wyniki te są bardzo zbliżone do średnich UE dla danych klas wielkości, a w wybranych przypadkach nawet je przekraczają.

⁷⁴ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/nis2-directive>

W przypadku przedsiębiorstw stosujących praktyki mające na celu podnoszenie świadomości pracowników w kwestiach związanych z bezpieczeństwem ICT widoczny jest trend wzrostowy w odsetku firm prowadzących tego typu działania. Według danych GUS najczęściej stosowane jest podpisywanie klauzul lub zobowiązań, np. przy zawieraniu umowy o pracę.

W 2024 r. 57% polskich firm prowadziło działania mające na celu podniesienie świadomości pracowników w obszarze cyberbezpieczeństwa. Ich największy odsetek odnotowano w grupie dużych firm – takie działania prowadziło aż 95,7% przedsiębiorstw tej wielkości. Wśród średnich firm odsetek ten wyniósł 76,2%, a wśród małych 51,8%. Są to wielkości zbliżone do średnich UE w tym samym roku.”⁷⁵

Do najważniejszych przepisów prawnych w obszarze cyberbezpieczeństwa obowiązujących w polskim prawie należą:

- [Ustawa o Krajowym Systemie Cyberbezpieczeństwa \(UKSC\)](#)
- [Dyrektywa NIS2](#)

Listę pozostałych aktów prawnych można znaleźć na stronie administracji publicznej:

<https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/akty-prawne>

Na poziomie krajowym funkcjonują obecnie trzy Zespoły Reagowania na Incydenty Bezpieczeństwa Komputerowego (ang. Computer Security Incident Response Team – CSIRT)⁷⁶. Są to: [CERT Polska](#), [CSIRT GOV](#) oraz [CSIRT MON](#). W Polsce funkcjonuje również szereg zespołów sektorowych (np. [CSIRT Cyfra](#) czy CSIRT KNF).

Informacje dotyczące sposobu zgłaszania incydentów cyberbezpieczeństwa można znaleźć na stronie administracji publicznej: <https://www.gov.pl/web/baza-wiedzy/zglaszanie-incydentow>.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. https://eur-lex.europa.eu/NIS2_streszczenie
2. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/akty-prawne>
3. <https://www.biznes.gov.pl/pl/NIS2>
4. <https://isap.sejm.gov.pl/UKSC>
5. <https://www.gov.pl/web/baza-wiedzy/narodowe-standardy-cyber>
6. https://www.europarl.europa.eu/Akt_o_cybersolidarnosci_streszczenie
7. https://eur-lex.europa.eu/Unijny_akt_o_cyberbezpieczenstwie_streszczenie
8. https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/Akt_w_sprawie_cyberodporności_streszczenie

⁷⁵ Fragment ten pochodzi z raportu „Wybrane technologie cyfrowe i stopień ich wykorzystania w przedsiębiorstwach w latach 2019-2025”, PARP, 2026.

<https://www.parp.gov.pl/component/publications/publication/wybrane-technologie-cyfrowe-i-stopien-ich-wykorzystania-w-przedsiębiorstwach-w-latach-2019-2025>

⁷⁶ <https://kompetencjcyfrowe.gov.pl/aktualnosci/wpis/csirt-cyfra-nowy-zespol-do-walki-z-cyberzagrozeniami>

9. https://www.europarl.europa.eu/Cybersecurity_Act_review

Dodatkowe źródła

1. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/cyberbezpieczenstwo>
2. https://www.parp.gov.pl/bezpieczenstwo_cyfrowe_w_klastrach
3. <https://cert.pl/>
4. <https://www.nask.pl/>
5. <https://csirt.gov.pl/cer>
6. <https://www.enisa.europa.eu/>
7. <https://www.consilium.europa.eu/pl/topics/cybersecurity/>
8. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/cybersecurity>

Technologie cyfrowe i przetwarzanie danych

Bliźniak cyfrowy (ang. Digital Twin)

Opis technologii

Definicja

Bliźniak cyfrowy: to wirtualny model fizycznego obiektu, systemu lub procesu, który jest synchronizowany z rzeczywistością w czasie rzeczywistym. W kontekście Przemysłu 4.0, bliźniaki cyfrowe są wykorzystywane do monitorowania, symulacji i optymalizacji działania urządzeń, linii produkcyjnych oraz całych fabryk. Tworzenie cyfrowych bliźniaków pozwala firmom na zwiększenie efektywności, redukcję kosztów i minimalizację ryzyka awarii poprzez analizę i testowanie wirtualnych modeli przed wprowadzeniem zmian w rzeczywistości.

W tworzeniu cyfrowych bliźniaków mogą zostać wykorzystane rozwiązania sztucznej inteligencji. Generatywna sztuczna inteligencja potrafi przewidywać przyszłe reakcje systemów na podstawie danych historycznych oraz danych zbieranych w czasie rzeczywistym. Ta zdolność pozwala zespołom podejmować bardziej świadome decyzje operacyjne i inwestycyjne. Technologie AI mogą również pomóc systemom cyfrowych bliźniaków w optymalnym skalowaniu i przydzielaniu zasobów bez udziału człowieka.

Zamiast automatyzować tylko rutynowe, powtarzalne zadania, modele AI mogą wykorzystywać cyfrowe bliźniaki do podejmowania długoterminowych, wieloetapowych decyzji. Mogą na przykład przewidywać, w jaki sposób awaria komponentu może wywołać efekt domina w sieci, wpływając na sąsiednie zasoby i systemy; powiadamiać odpowiednie zespoły za każdym razem, gdy komponent wymaga konserwacji; rekomendować ulepszenia sieci, aby zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia awarii; a w niektórych przypadkach samodzielnie wdrażać zmiany operacyjne.

Infrastruktura do tworzenia bliźniaka cyfrowego: obejmuje zasoby techniczne i systemy niezbędne do budowy wirtualnych replik rzeczywistych obiektów, procesów lub systemów. Składa się z wysokowydajnych komputerów, czujników IoT, systemów komunikacyjnych, platform analitycznych oraz specjalistycznego oprogramowania do symulacji i modelowania. Tego typu infrastruktura pozwala na gromadzenie danych w czasie rzeczywistym, analizę i odwzorowanie dynamicznie zmieniających się warunków pracy obiektu. Infrastruktura do tworzenia bliźniaka cyfrowego działa poprzez zbieranie danych z rzeczywistych obiektów przy użyciu czujników IoT oraz innych urządzeń pomiarowych. Dane są następnie przesyłane do centralnych systemów analitycznych, które przetwarzają je w czasie rzeczywistym i tworzą dynamiczny, wirtualny model obiektu. Model ten jest aktualizowany w miarę zmieniających się warunków, co pozwala na odwzorowanie rzeczywistego stanu obiektu, przewidywanie jego zachowań oraz optymalizację procesów. Infrastruktura bliźniaka cyfrowego umożliwia firmom tworzenie dokładnych replik swoich procesów produkcyjnych, co pozwala na optymalizację działania, przewidywanie awarii oraz efektywne zarządzanie zasobami. Dzięki

temu firmy mogą zminimalizować koszty operacyjne, poprawić wydajność oraz wprowadzać innowacje bez ryzyka zakłócenia rzeczywistych operacji.

Podstawowe rodzaje

- **Bliźniak produktu:** model cyfrowy fizycznego produktu, który jest używany do analizy jego działania, monitorowania wydajności i optymalizacji.
- **Bliźniak procesu:** cyfrowy model procesów operacyjnych lub produkcyjnych, który pozwala na symulację, monitorowanie i optymalizację procesów w czasie rzeczywistym.
- **Bliźniak systemu:** wirtualny odpowiednik złożonych systemów, takich jak linie produkcyjne czy sieci energetyczne, umożliwiające monitorowanie i testowanie interakcji między poszczególnymi elementami systemu.
- **Cyfrowe sobowtóry:** wirtualny odpowiednik osoby tworzony przy użyciu rozwiązań sztucznej inteligencji i cyfrowego bliźniaka. Mogą być wykorzystywane w sferach prywatnych, zawodowych i badaniach naukowych (np. cyfrowe kopie celebrytów i influencerów wykorzystywane do promocji produktów na mediach społecznościowych).

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** bliźniak cyfrowy współpracuje z systemami automatyzacji, co pozwala na automatyczne dostosowywanie parametrów operacyjnych w celu optymalizacji procesów.
- **Big Data:** analiza ogromnych ilości danych z bliźniaka cyfrowego pozwala na dokładne modelowanie i prognozowanie wydajności oraz identyfikację potencjalnych problemów.
- **Chmura obliczeniowa:** chmura umożliwia przechowywanie i przetwarzanie danych z bliźniaka cyfrowego na dużą skalę, zapewniając elastyczność i dostępność.
- **Internet Rzeczy:** urządzenia IoT dostarczają dane z rzeczywistego środowiska do bliźniaka cyfrowego, co umożliwia dokładne odwzorowanie stanu obiektu lub procesu w czasie rzeczywistym.
- **Sztuczna inteligencja:** algorytmy AI analizują dane z bliźniaka cyfrowego w celu przewidywania awarii, optymalizacji parametrów działania oraz podejmowania decyzji.

Podstawowe elementy

- **Model 3D:** wirtualna reprezentacja obiektu fizycznego, która odwzorowuje jego geometrię i zachowanie.
- **Czujniki IoT:** urządzenia zbierające dane z rzeczywistego obiektu lub procesu i przesyłające je do modelu cyfrowego.

- **Platforma do analizy danych:** oprogramowanie przetwarzające dane zebrane z czujników i umożliwiające analizę oraz monitorowanie w czasie rzeczywistym.
- **Symulacje i algorytmy predykcyjne:** narzędzia do przewidywania wyników oraz testowania różnych scenariuszy bez ingerencji w rzeczywiste zasoby.
- **Interfejs użytkownika:** środowisko wizualne, które umożliwia użytkownikom monitorowanie i zarządzanie bliźniakiem cyfrowym.

Mechanizm działania

- **Tworzenie modelu cyfrowego:** na podstawie rzeczywistego obiektu lub procesu tworzony jest model cyfrowy, który odwzorowuje geometrię, właściwości fizyczne i operacyjne.
- **Zbieranie danych:** czujniki IoT zainstalowane na obiekcie zbierają dane o jego stanie i operacjach, takie jak temperatura, ciśnienie, zużycie energii, drgania i inne parametry.
- **Przetwarzanie i analiza danych:** dane zebrane przez czujniki są przetwarzane przez algorytmy w celu monitorowania wydajności, identyfikacji nieprawidłowości oraz przewidywania awarii.
- **Symulacja i optymalizacja:** bliźniak cyfrowy umożliwia przeprowadzanie symulacji różnych scenariuszy, takich jak zmiany warunków pracy, parametry operacyjne czy reakcje na potencjalne problemy, co pozwala na optymalizację działania.
- **Monitorowanie w czasie rzeczywistym:** dzięki danym z czujników, bliźniak cyfrowy jest stale aktualizowany, co pozwala na bieżące monitorowanie stanu obiektu lub procesu oraz szybkie reagowanie na zmiany.
- **Aktualizacja i doskonalenie modelu:** na podstawie analizy wyników oraz nowych danych model cyfrowy jest regularnie aktualizowany i doskonalony, co zapewnia dokładność i spójność z rzeczywistością.
- **Podejmowanie decyzji i automatyzacja:** na podstawie analizy i symulacji z bliźniaka cyfrowego można podejmować decyzje dotyczące optymalizacji procesu, konserwacji predykcyjnej oraz modyfikacji parametrów operacyjnych w sposób automatyczny.

Przykładowe wykorzystania

- **Building Information Modelling (BIM):** to cyfrowe odwzorowanie cech fizycznych i funkcjonalnych budynków, pozwalające na kompleksowe projektowanie, budowę oraz zarządzanie infrastrukturą budowlaną. BIM integruje informacje z różnych dziedzin projektowania, budowy i eksploatacji w jednym, spójnym modelu, co pozwala na symulację, analizę oraz optymalizację całego cyklu życia obiektu — od koncepcji po rozbiórkę. Systemy BIM wykorzystują modele 3D jako centralny element cyfrowego odwzorowania budynku. Każdy element budynku, od fundamentów po instalacje elektryczne, jest reprezentowany jako część składowa modelu, który może być

wzbogacony o informacje dotyczące materiałów, kosztów, harmonogramów oraz eksploatacji. Narzędzia BIM umożliwiają integrację danych z różnych źródeł oraz automatyczną aktualizację modeli w miarę zmian w projekcie lub rzeczywistych warunkach na placu budowy. Technologia BIM wprowadza nowy standard w projektowaniu i zarządzaniu budynkami. Dzięki niej możliwe jest precyzyjne planowanie, efektywne zarządzanie zasobami oraz ograniczenie ryzyka kosztów związanych z błędami konstrukcyjnymi. BIM wspiera cały cykl życia obiektu, co pozwala na lepszą kontrolę inwestycji oraz osiągnięcie oszczędności podczas jego eksploatacji.

- **Cyfrowe bliźniaki miast (ang. Smart Cities):** jest to cyfrowa reprezentacja przestrzeni miejskiej, która powstaje poprzez połączenie danych geodezyjnych, systemów GIS, BIM i modeli 3D oraz informacji aktualizowanych w czasie rzeczywistym. Dzięki temu powstaje odwzorowanie miasta jako spójnego, dynamicznego systemu, zawierającego w sobie geometrię, zaznaczenie obiektów, relacje przestrzenne oraz aktualne sygnały pochodzące bezpośrednio z modelowanego terenu. Bliźniaki cyfrowe miast mogą być wykorzystywane do wspierania decyzji dotyczących kwestii rozwoju urbanistycznego, np.
 - **Optymalizacja planowania terenów miejskich:** poprzez symulację różnych scenariuszy rozwoju infrastruktury, transportu, obszarów zielonych i innych.
 - **Poprawa i optymalizacji efektywności energetycznej:** analiza i symulacja zużycia energii przez budynki i infrastrukturę miejską oraz identyfikacja obszarów o szczególnie dużym zużyciu energii.
 - **Monitorowanie i ochrona środowiska:** obserwacja i analiza danych dot. stanu środowiska np. śledzenie emisji zanieczyszczeń powietrza.
 - **Zarządzanie infrastrukturą miejską:** analiza aktualnego stanu infrastruktury i identyfikacja obszarów wymagających naprawy lub modernizacji.
 - **Partycypacja społeczna:** udostępnienie narzędzi bliźniaka cyfrowego może umożliwić lokalnym społecznościom udział w planowaniu i podejmowaniu decyzji, dzięki czemu obszary miejskie mogą być dostosowywane do potrzeb ich mieszkańców.
 - **Zwiększenie bezpieczeństwa:** np. poprzez symulację różnych sytuacji kryzysowych i strategii reagowania lub monitorowanie i analizę występujących sytuacji zagrożenia w czasie rzeczywistym.
- **Pozyskiwanie geoinformacji oraz zastosowanie systemów informacji geograficznej (GIS):** polega na gromadzeniu, przetwarzaniu i analizie danych przestrzennych dotyczących rzeczywistych obiektów i ich otoczenia. GIS jest używany w procesie tworzenia bliźniaka cyfrowego do dokładnego odwzorowania obiektów w kontekście przestrzennym, co pozwala na pełne zrozumienie ich interakcji z otoczeniem oraz na symulację różnorodnych scenariuszy w zależności od zmiennych środowiskowych. Systemy GIS łączą dane przestrzenne, takie jak współrzędne geograficzne, z informacjami o rzeczywistych obiektach w celu utworzenia cyfrowych map i modeli

3D. Dane te mogą pochodzić z satelitów, dronów, czujników LIDAR oraz systemów GPS. W kontekście bliźniaka cyfrowego, GIS jest używany do tworzenia dokładnych, trójwymiarowych modeli odwzorowujących interakcje między różnymi obiektami i ich otoczeniem. W procesie aktualizacji bliźniaka cyfrowego dane GIS są na bieżąco integrowane, aby odzwierciedlać zmiany w środowisku. Pozyskiwanie geoinformacji oraz ich wykorzystanie w tworzeniu bliźniaka cyfrowego ma istotne znaczenie dla sektora budownictwa, planowania przestrzennego oraz ochrony środowiska. Dane przestrzenne pozwalają na precyzyjne planowanie infrastruktury, analizę ryzyka środowiskowego oraz optymalizację zarządzania zasobami naturalnymi. W sektorze logistycznym i transportowym GIS umożliwia optymalizację tras oraz zarządzanie przepływem pojazdów.

- **Projektowanie replik cyfrowych:** obejmuje tworzenie cyfrowych odpowiedników rzeczywistych obiektów, procesów lub systemów. Repliki te są tworzone przy użyciu specjalistycznego oprogramowania i danych zebranych z czujników oraz systemów monitorowania, co pozwala na dokładne odwzorowanie struktury, dynamiki i zachowań rzeczywistego obiektu. Repliki cyfrowe służą do symulacji, analizy i optymalizacji procesów oraz oceny wydajności i stanu technicznego obiektów. Proces projektowania replik cyfrowych rozpoczyna się od zebrania danych o rzeczywistym obiekcie, takich jak wymiary, materiały, dynamika ruchu oraz inne właściwości. Dane te są następnie przetwarzane w oprogramowaniu symulacyjnym, aby utworzyć cyfrową kopię. Model jest aktualizowany na podstawie danych z czujników, co pozwala na symulację zachowań obiektu w różnych warunkach operacyjnych i analizę jego wydajności. Projektowanie replik cyfrowych pozwala na optymalizację projektów inżynierskich oraz efektywniejsze zarządzanie cyklem życia produktów. Firmy mogą przewidzieć awarie, symulować różne scenariusze oraz usprawniać procesy produkcyjne. Dzięki temu zyskują większą elastyczność, ograniczają koszty operacyjne oraz minimalizują ryzyko awarii lub błędów konstrukcyjnych.
- **Wykorzystanie bliźniaka cyfrowego w projektowaniu:** polega na zastosowaniu cyfrowych modeli i symulacji do opracowywania szczegółowych specyfikacji technicznych dla rzeczywistych obiektów, procesów lub systemów. Umożliwia to dokładne odwzorowanie fizycznych cech projektowanych elementów, analizę ich interakcji oraz optymalizację konstrukcji przed wdrożeniem do produkcji. Bliźniaki cyfrowe są używane do tworzenia specyfikacji materiałów, wymiarów, schematów działania oraz interfejsów komunikacyjnych. W procesie projektowania bliźniak cyfrowy jest wykorzystywany do tworzenia wirtualnego modelu projektowanego obiektu. Model jest następnie poddawany symulacjom w różnych warunkach operacyjnych, co umożliwia wykrycie potencjalnych problemów, optymalizację konstrukcji oraz przygotowanie szczegółowej dokumentacji technicznej. Użycie bliźniaka cyfrowego w projektowaniu pozwala na szybsze wprowadzanie zmian, testowanie nowych rozwiązań i minimalizację ryzyka błędów konstrukcyjnych. Wykorzystanie bliźniaków cyfrowych w projektowaniu pozwala na szybkie i precyzyjne

tworzenie specyfikacji technicznych, co przyspiesza proces rozwoju produktów oraz zmniejsza ryzyko błędów konstrukcyjnych. Firmy mogą dzięki temu wprowadzać innowacje szybciej, z mniejszym ryzykiem oraz optymalizować procesy produkcyjne, co przekłada się na lepszą konkurencyjność na rynku.

- **Zastosowanie bliźniaka cyfrowego w kartografii:** polega na tworzeniu szczegółowych, cyfrowych odwzorowań rzeczywistego środowiska w celu tworzenia i aktualizacji map oraz modeli przestrzennych. Bliźniak cyfrowy w kartografii integruje dane z różnych źródeł, takich jak zdjęcia satelitarne, dane lidarowe oraz obrazy z dronów, co pozwala na dynamiczne odwzorowanie terenu w czasie rzeczywistym. Umożliwia to prowadzenie analiz przestrzennych, monitorowanie zmian w środowisku oraz precyzyjne planowanie przestrzenne. Bliźniaki cyfrowe w kartografii są tworzone poprzez zbieranie danych przestrzennych z różnych źródeł, takich jak satelity, drony, LIDAR oraz naziemne systemy pomiarowe. Dane te są następnie przetwarzane w systemach GIS, co pozwala na budowanie szczegółowych, trójwymiarowych modeli terenu i obiektów. Modele te mogą być wykorzystywane do prowadzenia analiz przestrzennych, tworzenia map tematycznych oraz monitorowania zmian środowiskowych. Dzięki zastosowaniu bliźniaka cyfrowego możliwe jest również symulowanie przyszłych zmian na podstawie aktualnych danych. Bliźniak cyfrowy w kartografii wspiera planowanie przestrzenne, ochronę środowiska oraz rozwój infrastruktury. Umożliwia lepsze zarządzanie zasobami naturalnymi, precyzyjne planowanie urbanistyczne oraz prowadzenie dokładnych analiz środowiskowych. Jest kluczowy w procesach zarządzania kryzysowego, logistyce oraz w analizach rynkowych opartych na danych przestrzennych.
- **Inne rozwiązania z zakresu bliźniaka cyfrowego:** obejmują zaawansowane technologie, systemy oraz koncepcje, które nie mieszczą się w tradycyjnych zastosowaniach bliźniaków cyfrowych, ale są kluczowe dla ich dalszego rozwoju. Mogą obejmować symulacje procesów społecznych, zarządzanie infrastrukturą krytyczną, cyfrowe modele predykcyjne dla całych miast (Smart Cities), a także integrację bliźniaków cyfrowych z technologiami przyszłości, takimi jak przetwarzanie kwantowe czy zastosowanie bioczułników do monitorowania procesów biologicznych. Inne rozwiązania z zakresu bliźniaka cyfrowego bazują na integracji wielu źródeł danych oraz zastosowaniu zaawansowanych modeli symulacyjnych. W zależności od zastosowania, modele te mogą uwzględniać zmienne środowiskowe, dane demograficzne, parametry biologiczne czy przepływy energetyczne. W procesie tworzenia wykorzystywane są technologie takie jak AI, Big Data oraz IoT, które umożliwiają tworzenie dynamicznych, złożonych symulacji. Dzięki tym technologiom możliwe jest dokładne modelowanie skomplikowanych zależności, przewidywanie problemów oraz optymalizacja działania dużych systemów. Jest to kluczowe dla efektywnego zarządzania zasobami, ochrony środowiska oraz zapewnienia bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej.

- **Cyfrowe sobowtóry:** czyli cyfrowe bliźniaki tworzone przy użyciu rozwiązań sztucznej inteligencji, zdolne do odzwierciedlania ludzkich zachowań i procesów poznawczych. Mogą one znaleźć zastosowanie zarówno w sferze prywatnej (np. w celu zachowania dziedzictwa kulturowego lub budowania zaangażowania odbiorców), jak i zawodowej (np. w szkoleniu pracowników lub automatyzacji powtarzalnych zadań), a cyfrowe kopie znanych osób wykorzystywane są również w celach marketingowych i reklamowych. Cyfrowe sobowtóry mogą być również przydatne w kontekście badań naukowych. Na przykład naukowcy mogą przeprowadzać eksperymenty z syntetycznymi użytkownikami, aby symulować, w jaki sposób prawdziwi ludzie mogliby reagować na nowe produkty i funkcje. Przedsiębiorstwa mogą następnie agregować te wyniki, aby prognozować trendy na poziomie populacji.

Zaawansowanie

Według raportu Fortune Business Insights wartość światowego rynku cyfrowych bliźniaków w 2025 r. osiągnęła poziom ok. 24 miliardów dolarów, w 2026 r. ma wzrosnąć do 33 miliardów, a w perspektywie do 2034 r. zbliżyć się do 350 miliardów dolarów.

Technologia ta jest na wysokim poziomie dojrzałości i jest coraz powszechniej wykorzystywana w różnych obszarach np. produkcji, urbanistyce, budownictwie, inżynierii, motoryzacji i innych. Jako zalety wdrażania rozwiązań cyfrowego bliźniaka można wymienić oszczędności finansowe, lepsze zarządzanie cyklem życia produktów, poprawę efektywności operacyjnej lub optymalizację zużycia zasobów (np. energii).

Jako przeszkody we wdrażaniu rozwiązań bliźniaka cyfrowego można wymienić m.in. integrację z istniejącymi systemami IT, zapewnienie bezpieczeństwa danych czy koszty wdrożenia.

Cyfrowy bliźniak w Polsce

Do przykładowych wykorzystania cyfrowego bliźniaka na polskim rynku można zaliczyć różnorodne projekty.

Międzynarodowy projekt [DigiTwins4PEDs](#), w którym z ramienia Polski biorą udział Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, miasto Wrocław, firma infoSolutions oraz NCBR (dofinansowanie projektu). Celem projektu jest wykorzystanie Miejskich Cyfrowych Bliźniaków do modelowania aspektów energetycznych miasta w celu zapewnienia elastyczności energetycznej i tworzenia scenariuszy dzielnic o dodatnim bilansie energetycznym (ang. Positive Energy District – PED⁷⁷). Powstała w ramach projektu platforma dla mieszkańców i interesariuszy ma pozwolić na wymianę informacji, współpracę,

⁷⁷ Positive Energy District (dzielnic o dodatnim bilansie energetycznym) są to obszary miejskie charakteryzujące się zerowym rocznym importem energii netto i zerową emisją CO₂ netto, dążące do osiągnięcia nadwyżki produkcji energii odnawialnej oraz zintegrowane z miejskim i regionalnym systemem energetycznym. Patrz: <https://jpi-urbaneurope.eu/ped/>

współtworzenie i wizualizację scenariuszy tworzenia PED. Celem projektu jest również rozwój wiedzy, najlepszych praktyk i doświadczeń związanych z planowaniem i realizacją PED.

W ramach inicjatywy [Poznań City Lab](#) powstała innowacyjna przestrzeń wirtualna, prezentująca zaawansowane rozwiązania technologiczne rozwijane w Poznaniu. Kluczowym elementem projektu jest oparty na technologii cyfrowego bliźniaka model architektury Holu Wschodniego Grupy MTP. Rozwiązanie to ma służyć jako wirtualne laboratorium, będące bezpieczną, kontrolowaną przestrzenią do symulowania, testowania i prezentowania rozwiązań sztucznej inteligencji, nowoczesnej infrastruktury cyfrowej oraz infrastruktury miejskiej i przemysłowej.

Firma [Energia-Operator](#) opracowuje cyfrowy model sieci i infrastruktury dystrybucyjnej wykorzystujący mechanizmy AI. Model będzie odwzorowywał właściwości, stan i zachowanie poszczególnych rzeczywistych obiektów, uwzględniając ich otoczenie oraz wzajemne oddziaływanie. Będzie on obejmował takie elementy infrastruktury jak m.in. duże stacje, linie wysokiego napięcia, pojedyncze przyłącza oraz liczniki. Powstający cyfrowy bliźniak ma ułatwić sterowanie dynamicznym systemem dystrybucyjnym oraz elastyczne zarządzanie majątkiem sieciowym. Pozwoli także na lepsze prognozowanie ilości energii produkowanej przez OZE, obciążeń sieci czy zapotrzebowania na energię.

[Projekt Zintegrowane Usługi Prognoz Środowiskowych dla Bezpiecznych Operacji w Obszarze Morza Bałtyckiego](#) (ang. Marine and Environmental Research Modeling and Analysis for Intelligent Decisions – MERMAID) ma na celu stworzenie platformy operacyjnego prognozowania stanu Morza Bałtyckiego. W skład powstającego zintegrowanego systemu (działającego na infrastrukturze HPC) wejdą sprzężone modele atmosfery, oceanu, falowania, zlodzenia i innych procesów zachodzących na wybrzeżu południowego Bałtyku. Będzie on zapewniał zwiększoną rozdzielczość względem istniejących rozwiązań, co pozwoli na odwzorowanie zjawisk lokalnych np. ekstremalnych fal, wezbrań sztormowych czy dynamicznych procesów przybrzeżnych. Cyfrowy bliźniak Bałtyku pozwoli na m.in. prognozy falowania, prądów morskich, zlodzenia, przemieszczania się zanieczyszczeń oraz wskaźników ekosystemu. Będą one dostępne w formie API i wizualizacji, gotowych do integracji i wykorzystania przez systemy portów, energetyki offshore i administracji. Wykorzystanie cyfrowego bliźniaka Morza Bałtyckiego przyczyni się do zwiększenia bezpieczeństwa na morzu, efektywności operacji portowych i morskiej energetyki wiatrowej oraz będzie wspierać działania prośrodowiskowe (ochrona środowiska i adaptacja do zmian klimatycznych).

[Cyfrowy Bliźniak URE](#) to inicjatywa Uniwersytetu Warszawskiego, Urzędu Regulacji Energetyki i Ministerstwa Cyfryzacji który ma na celu wykorzystanie narzędzia opartego o AI do usprawnienia procesu taryfowania ciepła. Cyfrowy bliźniak ma również pełnić funkcję środowiska symulacyjnego do testowania różnych scenariuszy, analizy danych i uczenia się na przykładach. Projekt obejmuje trzy obszary działania:

- urzędowy – wsparcie urzędników w analizie materiałów otrzymanych od przedsiębiorstw i dokumentowanie postępowania,
- rynkowy – uporządkowanie procesu taryfowego dla przedsiębiorstw ciepłowniczych,
- edukacyjny – działanie jako model dydaktyczny dla studentów prawa i administracji, pozwalający na ćwiczenie w realistycznych symulacjach postępowań.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin>
2. <https://www.ibm.com/think/news/ai-simulations-standford-research>
3. <https://identitymanagementinstitute.org/digital-doppelgangers-and-ai-personas/>
4. <https://theconversation.com/digital-doppelgangers-are-helping-scientists-tackle-everyday-problems-and-showing-what-makes-us-human-247574>
5. <https://przemysl-40.pl/index.php/2025/03/02/cyfrowe-blizniaki-aktualne-dane-i-prognozy-branzowe/>
6. <https://www.fortunebusinessinsights.com/digital-twin-market-106246>
7. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>
8. <https://digitwins4peds.eu/>
9. <https://www.pcass.pl/poznancitylab-cyfrowy-blizniak-i-technologie-przyszlosci-w-sercu-wielkopolski/>
10. <https://energa-operator.pl/aktualnosci/854874/powstaje-cyfrowy-blizniak-sieci-energa-operator-ruszyl-projekt-digital-twin>
11. <https://icm.edu.pl/blog/2026/03/03/mermaid-cyfrowy-blizniak-morza-baltyckiego/>
12. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/nowy-etap-cyfryzacji-urzedu-regulacji-energetyki-i-jej-wplyw-na-proces-taryfowy-w-cieplownictwie>
13. <https://www.opgk.rzeszow.pl/blog/cyfrowe-blizniaki-miast-digital-twins---jak-lacza-geodezje-gis-i-dane-czasu-rzeczywistego>
14. <https://pfr.pl/arttykul/cyfrowe-blizniaki-miast-jak-je-wykorzystywac>

Chmura obliczeniowa (ang. Cloud computing)

Opis technologii

Definicja

Chmura obliczeniowa: to model dostarczania usług komputerowych przez Internet, obejmujący przechowywanie danych, moc obliczeniową, oprogramowanie oraz zasoby sieciowe. W chmurze zasoby są dostępne na żądanie, co umożliwia firmom skalowanie infrastruktury i płacenie jedynie za faktyczne wykorzystanie zasobów. W kontekście Przemysłu 4.0, chmura obliczeniowa wspiera transformację cyfrową, oferując elastyczność, skalowalność i wydajność niezbędne do przetwarzania dużych ilości danych i wspierania zaawansowanych analiz, automatyzacji oraz Internetu Rzeczy (IoT).

Model udostępniania usług dzieli się na następujące typy:

- **Infrastruktura jako usługa (ang. Infrastructure as a Service – IaaS):** podstawowa kategoria usług Cloud Computing. W przypadku IaaS użytkownik wynajmuje infrastrukturę IT (serwery i maszyny wirtualne, pamięć masową, sieci, systemy operacyjne) od dostawcy chmury na zasadzie *pay-as-you-go* (opłata za rzeczywiste wykorzystanie usługi).
- **Platforma jako usługa (ang. Platform as a Service – PaaS):** środowisko na żądanie, służące do tworzenia, testowania, dostarczania i zarządzania aplikacjami. PaaS ma na celu ułatwienie programistom szybkiego tworzenia aplikacji internetowych lub mobilnych, bez martwienia się o konfigurację lub zarządzanie podstawową infrastrukturą serwerów, pamięci masowej, sieci i baz danych potrzebnych do rozwoju.
- **Obliczenia bez serwerów (ang. Serverless computing):** pokrywająca się z PaaS kategoria skupiająca się na budowaniu funkcjonalności aplikacji bez poświęcania czasu na zarządzanie serwerami i infrastrukturą wymaganą do tego celu. Dostawca chmury zajmuje się konfiguracją, planowaniem pojemności i zarządzaniem serwerami za użytkownika. Architektury bezserwerowe są wysoce skalowalne i sterowane zdarzeniami – wykorzystują zasoby tylko w przypadku wystąpienia określonej funkcji lub wyzwalacza.
- **Oprogramowanie jako usługa (ang. Software as a Service – SaaS):** metoda dostarczania oprogramowania przez Internet, na żądanie i zazwyczaj na zasadzie subskrypcji. Dostawcy usług w chmurze hostują i zarządzają aplikacją oraz infrastrukturą bazową, a także zajmują się czynnościami konserwacyjnymi, takimi jak aktualizacje oprogramowania i poprawki bezpieczeństwa. Użytkownicy łączą się z aplikacją przez Internet.

Centrum danych: to obiekt służący do przechowywania infrastruktury informatycznej, (m.in. serwerów, urządzeń przechowywania danych czy infrastruktury sieciowej), a także

dystrybucji cyfrowych danych. Centra danych stanowią infrastrukturę o znaczeniu krytycznym dla przechowywania i przetwarzania informacji oraz wspierają globalny system finansowy, usługi w chmurze, uczenie maszynowe i sztuczną inteligencję.

Centra danych różnią się pod względem wielkości, wymagań energetycznych i ogólnej struktury. Generalnie jednak są one obiektami wymagającymi zużycia wielu zasobów, zarówno w procesie budowy i wyposażenia, jak i późniejszej eksploatacji. Działanie centrów danych wymaga zwłaszcza dużego zużycia energii elektrycznej, co może stanowić znaczne obciążenie dla sieci przesyłowych oraz elektrowni.

Można wyróżnić cztery popularne kategorie tego typu obiektów:

- lokalne centra danych przedsiębiorstw, z których korzystają głównie pracownicy i klienci firmy,
- obiekty kolokacyjne, w których wiele firm wynajmuje przestrzeń we wspólnym centrum danych,
- hiperskalowe centra danych należące do bardzo dużych firm świadczących usługi w chmurze,
- brzegowe centra danych zlokalizowane blisko użytkowników końcowych.

Podstawowe rodzaje

- **Chmura publiczna:** Zasoby obliczeniowe są dostarczane przez zewnętrznego dostawcę (np. Amazon Web Services, Microsoft Azure) i są współdzielone przez wielu użytkowników, co obniża koszty.
- **Chmura prywatna:** Chmura przeznaczona wyłącznie dla jednej organizacji, która zarządza własnymi zasobami lub korzysta z zasobów zarządzanych przez dostawcę. Zapewnia większą kontrolę i bezpieczeństwo.
- **Chmura hybrydowa:** Połączenie chmury publicznej i prywatnej, umożliwiające organizacjom elastyczne korzystanie z obu typów w zależności od potrzeb, np. przenoszenie części obciążeń do chmury publicznej w czasie wzmożonego zapotrzebowania.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** Chmura umożliwia automatyzację procesów biznesowych, takich jak zarządzanie zapasami, prognozowanie popytu i monitorowanie wydajności.
- **Big Data:** Chmura umożliwia przechowywanie i przetwarzanie dużych zbiorów danych, co ułatwia ich analizę oraz dostęp do zaawansowanych narzędzi analitycznych.
- **Bliźniak cyfrowy:** Chmura przechowuje i przetwarza dane dla cyfrowych bliźniaków, umożliwiając symulacje i monitorowanie rzeczywistych procesów w czasie rzeczywistym.

- **Internet Rzeczy:** Chmura wspiera zbieranie, analizę i przechowywanie danych z urządzeń IoT, umożliwiając zdalne monitorowanie i kontrolę urządzeń.
- **Sztuczna inteligencja:** Chmura oferuje narzędzia do tworzenia i uruchamiania modeli AI na dużą skalę, co pozwala na analizę danych w czasie rzeczywistym i automatyzację procesów.

Podstawowe elementy

- **Serwery wirtualne (VM):** Serwery uruchamiane w chmurze umożliwiające użytkownikom elastyczne skalowanie mocy obliczeniowej w zależności od potrzeb. Serwery wirtualne są podstawą do uruchamiania aplikacji i przetwarzania danych.
- **Pamięć masowa w chmurze:** Przestrzeń dyskowa dostępna przez Internet, przechowująca dane, dokumenty, kopie zapasowe i inne zasoby. Chmura oferuje różne poziomy przechowywania, takie jak pamięć obiektowa (np. Amazon S3), pamięć blokowa oraz plikowa.
- **Bazy danych w chmurze:** Bazy danych dostępne jako usługi, które można skalować na żądanie i które obsługują różne typy danych, w tym relacyjne (np. MySQL, PostgreSQL) i NoSQL (np. MongoDB, DynamoDB).
- **Platformy kontenerowe i orkiestracja:** Narzędzia, takie jak Docker i Kubernetes, które umożliwiają uruchamianie aplikacji w kontenerach, co zwiększa elastyczność i ułatwia zarządzanie aplikacjami w chmurze.
- **Platformy do analizy danych:** Usługi analityczne w chmurze, takie jak Google BigQuery, Azure Synapse Analytics, pozwalają na zaawansowaną analizę danych, przetwarzanie Big Data oraz integrację z narzędziami AI.
- **Bezpieczeństwo i zgodność:** Mechanizmy zapewniające bezpieczeństwo, takie jak firewalle, szyfrowanie, zarządzanie tożsamością i dostępem (IAM), które chronią dane i spełniają wymogi regulacyjne.
- **Interfejsy API (Application Programming Interfaces):** API to interfejsy pozwalające aplikacjom komunikować się z zasobami chmury i wykorzystywać je do budowy aplikacji oraz integracji usług.
- **Sieci wirtualne:** Wirtualne sieci umożliwiające organizacjom tworzenie bezpiecznych połączeń w ramach infrastruktury chmurowej, co ułatwia dostęp do zasobów zdalnych i kontrolę ruchu sieciowego.
- **Infrastruktura jako kod (IaC – Infrastructure as Code):** Metoda zarządzania i konfigurowania zasobów chmurowych za pomocą kodu (np. Terraform, AWS CloudFormation), co ułatwia automatyzację i wersjonowanie infrastruktury.

Mechanizm działania

- **Żądanie zasobów:** Użytkownicy lub aplikacje zgłaszają zapotrzebowanie na zasoby, takie jak moc obliczeniowa, pamięć masowa czy bazy danych, które są automatycznie przydzielane przez dostawcę chmury.
- **Skalowanie zasobów:** Chmura umożliwia elastyczne skalowanie zasobów w górę lub w dół w zależności od aktualnego zapotrzebowania. To pozwala firmom na optymalizację kosztów, ponieważ płacą tylko za faktyczne wykorzystanie zasobów.
- **Dostęp przez Internet:** Użytkownicy mają dostęp do zasobów chmurowych przez Internet, co umożliwia zdalne zarządzanie i monitorowanie usług oraz współpracę w czasie rzeczywistym.
- **Zarządzanie i monitorowanie:** Narzędzia w chmurze pozwalają na zarządzanie zasobami, monitorowanie ich wydajności oraz analizę danych dotyczących zużycia. To zapewnia kontrolę nad zasobami i możliwość optymalizacji operacji.
- **Przetwarzanie i przechowywanie danych:** Chmura umożliwia przetwarzanie dużych ilości danych oraz ich przechowywanie w różnych lokalizacjach, co zwiększa niezawodność i dostępność informacji.
- **Bezpieczeństwo i ochrona danych:** Chmura oferuje mechanizmy zabezpieczające, takie jak szyfrowanie, uwierzytelnianie wieloskładnikowe oraz systemy zarządzania tożsamością, które chronią dane przed nieautoryzowanym dostępem.
- **Automatyzacja i optymalizacja:** Chmura umożliwia automatyzację procesów biznesowych i IT, takich jak backupy, przywracanie po awarii oraz aktualizacje systemów, co zwiększa efektywność i redukuje ryzyko błędów.
- **Konsolidacja i rozliczanie:** W chmurze obliczeniowej dostępne są systemy do monitorowania zużycia zasobów i rozliczania kosztów, co pozwala organizacjom na kontrolowanie wydatków i dostosowanie usług do budżetu.

Przykładowe wykorzystania

- **Przechowywanie danych online:** przechowywanie ogromnych ilości danych biznesowych lokalnie wymaga coraz więcej miejsca i zwiększa koszty. Chmura oferuje przechowywanie i uzyskanie dostępu do danych z wielu urządzeń przy zastosowaniu prostych interfejsów. Zaletami są duża szybkość, skalowalność (automatyczne dostosowanie się do zmiennej liczby użytkowników) i zintegrowane zabezpieczenia.
- **Backup i odzyskiwanie:** bezpieczne przechowywanie oraz możliwość tworzenia kopii zapasowych danych i zasobów w chmurze.
- **Analiza Big Data:** duża ilość danych sprawia, że nie można ich przechowywać przy użyciu tradycyjnych systemów zarządzania danymi. Przedsiębiorstwa mogą przechowywać i analizować Big Data dzięki praktycznie nieograniczonej pojemności pamięci masowej chmury.

- **Testowanie i rozwój:** dzięki chmurze obliczeniowej firmy otrzymują skalowalne i elastyczne usługi w chmurze, które mogą wykorzystać do rozwoju, testowania i wdrażania produktów, bez angażowania swoich zasobów.
- **Aplikacje antywirusowe:** oprogramowanie antywirusowe przechowywane w chmurze, które monitoruje sieci organizacji w celu ochrony przed wirusami i złośliwym oprogramowaniem.
- **Aplikacje e-commerce:** pozwalają użytkownikom i e-biznesom szybko reagować na pojawiające się możliwości. Oferują nowe podejście do pracy przy minimalnym nakładzie czasu i wysiłku organizacyjnego (zarządzanie danymi klientów, produktami i innymi systemami operacyjnymi).
- **Cloud Computing w edukacji:** dostarczenie nowego atrakcyjnego środowiska do nauki, nauczania oraz eksperymentowania poprzez e-learning, programy nauczania online (na odległość) i portale informacyjne.

Zaawansowanie

Według raportu MarketsandMarkets w 2025 r. rynek technologii chmurowych osiągnął wartość na poziomie 1125.9 miliardów USD, a według przewidywań wartość ta ma wzrosnąć do 2281.1 miliarda USD w 2030 r. Według najnowszych danych Eurostatu w 2025 r. 52,74% przedsiębiorstw w Unii Europejskiej wykorzystywało płatne usługi chmurowe⁷⁸. Jest to wzrost o 7,42 p.p. względem 2023 r.

Unijnym aktem prawnym dotyczącym wykorzystania technologii chmurowych jest [EU Cloud and AI Development Act](#). Jest to część AI Continent Action Plan, a jego celem jest wzmocnienie ekosystemu usług chmurowych na terenie Unii Europejskiej oraz zwiększenie finansowania i rozwój infrastruktury w tym obszarze.

Chmura obliczeniowa w Polsce

„W przypadku zakupu usług chmurowych przez przedsiębiorstwa można zaobserwować stałą tendencję wzrostową wśród firm wszystkich klas wielkości. W analizowanym okresie odsetek firm kupujących tego typu usługi wzrósł z 17,5% w 2019 r. do 55,3% w 2025 r. – jest to wzrost o 37,8 p.p. w okresie sześciu lat. Minimalny spadek rok do roku widoczny jest dopiero w 2025 r., jednak w większości przypadków ma on charakter dziesiętnych punktu procentowego – największą zmianę odnotowano w przypadku dużych firm (2,28 p.p.).

W badanym przedziale czasowym wyróżnia się okres 2021-2023, kiedy to odnotowano najwyższy, skokowy wzrost odsetka ogółu firm kupujących usługi chmurowe. Wzrost ten wyniósł aż 29,97 p.p. w okresie dwóch lat – z 28,7% w 2021 r. do 55,67% w 2023 r.

⁷⁸ Dane dla firm zatrudniających ponad 10 osób.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/isoc_cicce_use/default/table?lang=en&category=isoc.isoc_e.i.soc_eb

Znaczny wzrost widoczny jest także w latach 2019-2020 (dla ogółu firm z 17,5% do 24,42%). Można przypuszczać, że na taki wynik wpłynęła pandemia COVID-19, która zmusiła wiele firm do przejścia na pracę zdalną lub hybrydową, co wiązało się z koniecznością wdrożenia narzędzi i technologii wspierających te modele pracy.

W przypadku klas wielkości najwyższy odsetek firm kupujących usługi chmurowe można zaobserwować wśród dużych podmiotów. W latach 2019-2025 corocznie przekraczał on 50% firm. Systematyczny wzrost widoczny jest także wśród małych i średnich przedsiębiorstw. Dla małych podmiotów wyniósł on 36,7 p.p. w okresie sześciu lat (z 14,1% w 2019 r. do 50,8% w 2025 r.). Natomiast w przypadku firm średnich wzrost w tym samym okresie wyniósł 45,1 p.p. (z 27,9% do 73%).

Dla firm wszystkich klas wielkości najwyższy wzrost odsetka podmiotów kupujących usługi chmurowe można zaobserwować w latach 2021-2023. Wahał się on w granicach od 18,67 p.p. dla dużych firm, do 29,96 p.p. dla podmiotów średniej wielkości. Warto również zauważyć, że w wyniku tego wzrostu zarówno w 2023, jak i 2025 r. wszystkie klasy wielkości polskich przedsiębiorstw przekroczyły granicę 50% firm korzystających z usług chmurowych.

Skokowy wzrost odsetka firm kupujących usługi chmurowe w latach 2021-2023 spowodował również, że Polska znacząco przekroczyła średnią unijną w tym obszarze. W 2023 r. polskie firmy we wszystkich klasach wielkości przewyższyły średnią UE o co najmniej 9 p.p.”⁷⁹

Sposoby wykorzystania chmury obliczeniowej

„Również w przypadku zakupu usług chmury obliczeniowej do określonych celów użytkowych można zaobserwować tendencje wzrostowe. W 2023 r. większość sposobów wykorzystania chmury (z wyjątkiem rozwiązań bazodanowych) osiągnęła najwyższy poziom użycia w badanym okresie.

Co istotne, znaczny wzrost zanotowano nie tylko wśród podstawowych zastosowań, np. poczta e-mail, oprogramowanie biurowe czy przechowywanie plików, lecz także w odniesieniu do bardziej zaawansowanych zastosowań, takich jak środowiska deweloperskie do testowania lub wdrażania aplikacji i specjalistyczne systemy informatyczne (np. ERP, CRM).

Trend wzrostowy widoczny jest również wśród przedsiębiorstw unijnych korzystających z rozwiązań chmurowych do konkretnych zastosowań – poziom ich wykorzystania stopniowo zwiększa się z roku na rok.

Porównując wyniki polskich i unijnych przedsiębiorstw, można zaobserwować istotne różnice w zakresie wykorzystania chmury obliczeniowej do wybranych zastosowań. Firmy unijne rzadziej korzystają z rozwiązań chmurowych w obszarze środowisk deweloperskich do testowania lub wdrożenia aplikacji – w 2023 r. odsetek ten wyniósł 11,9%, podczas gdy

⁷⁹ Fragment ten pochodzi z raportu „Wybrane technologie cyfrowe i stopień ich wykorzystania w przedsiębiorstwach w latach 2019-2025”, PARP, 2026.
<https://www.parp.gov.pl/component/publications/publication/wybrane-technologie-cyfrowe-i-stopien-ich-wykorzystania-w-przedsiębiorstwach-w-latach-2019-2025>

w Polsce 34,6%. Odmienna sytuacja występuje w przypadku baz danych – w 2023 r. odsetek przedsiębiorstw unijnych wykorzystujących chmurę w tym celu wyniósł 19,5%, natomiast wśród polskich firm zaledwie 8%. W przypadku podstawowych zastosowań, takich jak poczta elektroniczna oraz oprogramowanie biurowe, poziom wykorzystania chmury w Polsce i w Unii Europejskiej pozostaje zbliżony.”⁸⁰

W Polsce prowadzone są działania związane z rozwojem ekosystemu centrów danych. Na początku 2026 r. zostały ogłoszone inwestycje m.in. pod Bełchatowem, w Bielsku-Białej oraz Warszawie. W Polsce działa również [Polish Data Centre Association](#).

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cloud-computing>
2. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/cloud-computing-market-234.html>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/cloud-and-ai-development-act>
4. <https://www.eu-cloud-ai-act.com/>
5. <https://pldca.pl/>
6. <https://pldca.pl/data-center-ecosystem-guide-2025/>

⁸⁰ Tamże.

Duże zbiory danych (ang. Big Data)

Opis technologii

Definicja

Big Data: odnosi się do przetwarzania i analizy bardzo dużych, złożonych zbiorów danych, które nie mogą być przetwarzane przy użyciu tradycyjnych narzędzi i metod. W kontekście Przemysłu 4.0, Big Data jest kluczowym elementem transformacji cyfrowej, umożliwiając firmom analizowanie ogromnych ilości danych w czasie rzeczywistym, wyciąganie z nich użytecznych wniosków oraz podejmowanie lepiej uzasadnionych decyzji. Big Data obejmuje dane strukturalne, półstrukturalne i niestrukturalne, pochodzące z różnych źródeł, takich jak IoT, media społecznościowe, transakcje finansowe i czujniki przemysłowe.

Podstawowe cechy Big Data opisuje tzw. model 5V:

- duża ilość danych (volume),
- duża prędkość przetwarzania danych (velocity),
- duża różnorodność danych (variety),
- weryfikacja danych (veracity),
- wartość danych dla użytkownika (value).

Big Data znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, w tym:

- Bankowości – np. ostrzeganie przed oszustami, raportowanie o ryzyku kredytowym w przedsiębiorstwie, analityka społeczna dla handlu.
- Komunikacji, mediach i rozrywce – np. gromadzenie, analiza i wykorzystanie wiedzy o konsumentach, wykorzystanie treści z mediów mobilnych i społecznościowych, tworzenie wzorców korzystania z treści medialnych.
- Sektorze opieki zdrowotnej – np. poprawa świadczenia usług oraz obsługi klientów, ograniczenie kosztów opieki zdrowotnej.
- Edukacji – np. mierzenie efektywności postępów i rozwoju.
- Przemysłe wytwórczym i zarządzaniem zasobami naturalnymi – np. obniżenie kosztów, zwiększenie efektywności, zwiększenie sprzedaży, zwiększenie szybkości wdrażania rozwiązań innowacyjnych, bardziej efektywne badania i rozwój.
- Ubezpieczeniach – np. dostosowanie produktów do potrzeb klienta, analiza i przewidywanie zachowań klientów.
- Handlu detalicznym i hurtowym – np. kontrola lojalności klientów, inwentaryzacja, wgląd w lokalne dane demograficzne gromadzone przez sklepy detaliczne i hurtowe.
- Transporcie – np. kontrola ruchu, planowanie tras, inteligentne systemy transportowe, zarządzanie komunikacją.

- Sektorze energetycznym i usługach komunalnych – np. analiza zużycia mediów, lepsze zarządzanie aktywami i pracownikami.

Infrastruktura do obsługi dużych zbiorów danych: obejmuje specjalistyczne zasoby sprzętowe i programowe umożliwiające przechowywanie, przetwarzanie oraz zarządzanie dużymi ilościami danych. Składa się z serwerów, systemów pamięci masowej, infrastruktury sieciowej oraz platform obliczeniowych, które pozwalają na szybkie przetwarzanie i analizę danych w czasie rzeczywistym. Infrastruktura do obsługi dużych zbiorów danych jest skonstruowana w oparciu o połączenie serwerów, pamięci masowych oraz sieci, które umożliwiają gromadzenie, przechowywanie i przesyłanie ogromnych ilości danych w krótkim czasie. Dane są przechowywane na serwerach lub w chmurze, a następnie przetwarzane przez zaawansowane algorytmy i aplikacje do analizy. Infrastruktura do obsługi dużych zbiorów danych jest skonstruowana w oparciu o połączenie serwerów, pamięci masowych oraz sieci, które umożliwiają gromadzenie, przechowywanie i przesyłanie ogromnych ilości danych w krótkim czasie. Dane są przechowywane na serwerach lub w chmurze, a następnie przetwarzane przez zaawansowane algorytmy i aplikacje do analizy.

Do elementów infrastruktury Big Data zaliczają się:

- Serwery obliczeniowe: Wysokowydajne jednostki do przeprowadzania złożonych operacji analitycznych.
- Systemy pamięci masowej: Specjalistyczne systemy do przechowywania dużych zbiorów danych. Infrastruktura sieciowa: Szybkie połączenia sieciowe zapewniające transfer dużych ilości danych.
- Systemy chłodzenia: Zaawansowane technologie chłodzenia w centrach danych.
- Platformy chmurowe: Usługi przetwarzania w chmurze do skalowalnego zarządzania danymi.

Systemy do przetwarzania i przechowywania dużych zbiorów danych: obejmują kompleksowe rozwiązania technologiczne służące do gromadzenia, przechowywania, przetwarzania oraz udostępniania ogromnych ilości danych w czasie rzeczywistym. Składają się z wyspecjalizowanych serwerów, systemów pamięci masowej, rozproszonych baz danych oraz oprogramowania do przetwarzania równoległego, co pozwala na efektywną obsługę i analizę danych pochodzących z różnych źródeł. Systemy do przetwarzania i przechowywania dużych zbiorów danych działają w oparciu o rozproszone bazy danych oraz systemy plików, które umożliwiają równoczesne przechowywanie, odczyt i zapis danych. Wykorzystują architekturę klastrową, w której wiele serwerów działa jako jeden system, co pozwala na efektywne przetwarzanie i szybki dostęp do danych. Równoległe przetwarzanie danych przez rozproszone węzły obliczeniowe pozwala na dynamiczną analizę w czasie rzeczywistym. Systemy te pozwalają firmom na efektywne zarządzanie zasobami danych, co prowadzi do lepszego wykorzystania informacji, optymalizacji kosztów operacyjnych oraz tworzenia nowych modeli biznesowych opartych na danych. Dzięki tym systemom organizacje mogą przechowywać i przetwarzać dane o różnej strukturze, co wspiera procesy decyzyjne oraz rozwój innowacyjnych usług cyfrowych.

Podstawowe rodzaje

- **Analiza opisowa:** Dostarcza informacji na temat historycznych danych, pomagając zrozumieć przeszłe wzorce i trendy.
- **Analiza predykcyjna:** Umożliwia prognozowanie przyszłych zdarzeń na podstawie analizy historycznych danych i algorytmów uczenia maszynowego.
- **Analiza preskryptywna:** Identyfikuje optymalne rozwiązania w oparciu o przewidywania i rekomendacje, sugerując najlepsze działania.
- **Analiza diagnostyczna:** Pomaga w zrozumieniu przyczyn wystąpienia określonych zdarzeń poprzez analizę korelacji i związków pomiędzy różnymi zmiennymi.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** Big Data umożliwia analizę i monitorowanie procesów w czasie rzeczywistym, co wspiera automatyczne podejmowanie decyzji i optymalizację procesów.
- **Bliźniak cyfrowy:** Wirtualne modele urządzeń i systemów wykorzystują dane Big Data do monitorowania i symulacji, co pozwala na bardziej precyzyjną kontrolę i optymalizację.
- **Chmura obliczeniowa:** Dane Big Data są często przechowywane i przetwarzane w chmurze, co umożliwia skalowalność i dostępność zasobów obliczeniowych.
- **Internet Rzeczy:** Dane generowane przez urządzenia IoT są wykorzystywane do monitorowania i optymalizacji procesów produkcyjnych oraz monitorowania stanu urządzeń.
- **Sztuczna inteligencja:** Algorytmy AI wykorzystują Big Data do nauki, przewidywania wzorców oraz podejmowania autonomicznych decyzji, co ma zastosowanie m.in. w prognozowaniu popytu i optymalizacji produkcji.

Podstawowe elementy

- **Bazy danych NoSQL:** Systemy do przechowywania i zarządzania niestrukturalnymi danymi, takie jak MongoDB i Cassandra.
- **Platformy analityczne:** Narzędzia do analizy danych, takie jak Apache Hadoop, Spark i Kafka, umożliwiające przetwarzanie dużych wolumenów danych w czasie rzeczywistym.
- **Algorytmy uczenia maszynowego:** Modele analityczne, które wykorzystują dane do przewidywania i rekomendacji na podstawie wzorców.
- **Narzędzia do wizualizacji danych:** Aplikacje takie jak Tableau i Power BI, które ułatwiają prezentację wyników analizy danych w formie graficznej.

- **Infrastruktura chmurowa:** Środowiska takie jak AWS, Google Cloud i Microsoft Azure, umożliwiające skalowalne przechowywanie i przetwarzanie danych.

Mechanizm działania

- **Zbieranie danych:** Dane pochodzą z różnych źródeł, takich jak urządzenia IoT, media społecznościowe, transakcje online, logi serwerów, czujniki przemysłowe oraz systemy ERP. Zbieranie danych obejmuje zarówno dane strukturalne (np. bazy danych) jak i niestukturalne (np. teksty, obrazy).
- **Przechowywanie danych:** Zebrane dane są przechowywane w dużych bazach danych, często w chmurze, aby zapewnić skalowalność i dostępność. Bazy danych NoSQL są popularne w zarządzaniu dużymi wolumenami niestukturalnych danych.
- **Przetwarzanie danych:** Dane są przetwarzane w celu przygotowania ich do analizy. Narzędzia takie jak Hadoop i Spark umożliwiają rozproszone przetwarzanie danych, co skraca czas potrzebny na analizę dużych zestawów danych.
- **Analiza danych:** Przetworzone dane są analizowane z wykorzystaniem zaawansowanych algorytmów, takich jak algorytmy uczenia maszynowego, które pomagają odkryć wzorce, trendy i zależności. Analiza może być przeprowadzana w czasie rzeczywistym lub w sposób batchowy, w zależności od potrzeb.
- **Wizualizacja danych:** Wyniki analizy są prezentowane w formie wizualizacji, takich jak wykresy, dashboardy i mapy cieplne, które ułatwiają interpretację danych i podejmowanie decyzji.
- **Podejmowanie decyzji:** Na podstawie wyników analizy, organizacje mogą podejmować lepiej uzasadnione decyzje dotyczące produkcji, marketingu, zarządzania ryzykiem i innych obszarów działalności.
- **Optymalizacja i aktualizacja:** Wyniki analizy mogą być wykorzystywane do ciągłej optymalizacji procesów, produktów i usług. Algorytmy uczenia maszynowego są regularnie aktualizowane, aby dostosować się do zmieniających się wzorców i warunków.

Przykładowe wykorzystania

- **Analityka predykcyjna:** to zastosowanie modeli statystycznych, technik analizy danych oraz algorytmów uczenia maszynowego w celu prognozowania przyszłych zdarzeń, trendów i zachowań na podstawie danych historycznych. Technologia ta pomaga w przewidywaniu wyników biznesowych, optymalizacji działań oraz minimalizacji ryzyka. Jest szeroko stosowana w branżach takich jak finanse, marketing, logistyka, opieka zdrowotna oraz przemysł. Analityka predykcyjna działa w oparciu o analizę danych historycznych, identyfikację wzorców oraz ich zastosowanie w budowaniu modeli predykcyjnych. Analityka predykcyjna pomaga firmom przewidywać zmiany na rynku, prognozować zachowania klientów oraz

optymalizować działania operacyjne. Dzięki tym technikom przedsiębiorstwa mogą lepiej planować produkcję, minimalizować ryzyko strat oraz wprowadzać nowe usługi dostosowane do przyszłych potrzeb. W sektorze finansowym analityka predykcyjna umożliwia przewidywanie ryzyka kredytowego, a w marketingu wspiera tworzenie kampanii dostosowanych do preferencji konsumentów.

- **Biznesowe aspekty przetwarzania dużych zbiorów danych:** obejmują strategie, modele biznesowe oraz metody zarządzania, które umożliwiają firmom i organizacjom uzyskiwanie wartości biznesowej z analizy dużych wolumenów danych. Obejmują one wykorzystanie danych do poprawy procesów decyzyjnych, optymalizacji operacyjnej, tworzenia nowych produktów oraz dostosowywania ofert do indywidualnych preferencji klientów. Wymaga to zrozumienia zarówno technologicznych możliwości, jak i wyzwań związanych z wykorzystaniem dużych zbiorów danych. Biznesowe aspekty przetwarzania dużych zbiorów danych opierają się na wykorzystaniu wyników analizy danych do optymalizacji procesów biznesowych. Zaczyna się od określenia celów biznesowych, następnie wybierane są odpowiednie metody przetwarzania danych, które pozwalają na uzyskanie użytecznych informacji. Wyniki analizy mogą być następnie wykorzystane do opracowania strategii biznesowej, personalizacji usług, prognozowania trendów oraz podejmowania decyzji strategicznych. Biznesowe aspekty przetwarzania dużych zbiorów danych mają kluczowe znaczenie dla rozwoju innowacyjnych modeli biznesowych oraz optymalizacji procesów operacyjnych w firmach. Wykorzystanie danych jako zasobu strategicznego pozwala na tworzenie nowych strumieni przychodów, optymalizację kosztów oraz lepsze dostosowanie się do wymagań rynku. Analiza danych pomaga przedsiębiorstwom osiągnąć przewagę konkurencyjną oraz podejmować lepsze decyzje strategiczne.
- **Data mining:** to proces odkrywania ukrytych wzorców, zależności i relacji w dużych zbiorach danych. Wykorzystuje algorytmy statystyczne, metody analityczne i techniki sztucznej inteligencji, aby przekształcić surowe dane w użyteczne informacje wspierające podejmowanie decyzji. Data mining jest stosowany w różnych dziedzinach, takich jak finanse, marketing, medycyna i produkcja, w celu przewidywania trendów, optymalizacji procesów i identyfikacji anomalii. Data mining działa poprzez analizę danych przy użyciu algorytmów statystycznych i sztucznej inteligencji. Proces obejmuje kilka etapów: przygotowanie danych (czyszczenie, redukcja wymiarowości), wybór odpowiedniego algorytmu, trenowanie modelu, ocena wyników oraz ich interpretacja. W zależności od zastosowanego algorytmu, wyniki mogą przyjmować formę klasyfikacji, klastrów, zależności między zmiennymi lub prognoz. Data mining umożliwia przedsiębiorstwom uzyskanie cennych informacji na temat zachowań klientów, wydajności operacyjnej oraz przyszłych trendów rynkowych. Pozwala na optymalizację procesów biznesowych, poprawę efektywności operacyjnej oraz identyfikację ryzyka. Technika ta jest szczególnie istotna w sektorze finansowym, marketingu, opiece zdrowotnej oraz e-commerce.

- Przetwarzanie dużych zbiorów danych:** obejmuje technologie, techniki i procesy wykorzystywane do analizy, przetwarzania i interpretacji ogromnych ilości danych pochodzących z różnych źródeł. Procesy te pozwalają na wykrywanie wzorców, korelacji i uzyskiwanie informacji wspierających podejmowanie decyzji. Przetwarzanie obejmuje różne fazy, takie jak zbieranie danych, oczyszczanie, analiza oraz wizualizacja. Przetwarzanie dużych zbiorów danych odbywa się w oparciu o algorytmy rozproszonego przetwarzania, które dzielą dane na mniejsze części, a następnie analizują je równolegle na wielu węzłach obliczeniowych. Wyniki są łączone w jedną całość, co pozwala na uzyskanie szybkich odpowiedzi nawet przy ogromnych wolumenach danych. Algorytmy takie jak MapReduce czy Spark umożliwiają analizę danych w czasie rzeczywistym oraz tworzenie modeli predykcyjnych. Przetwarzanie dużych zbiorów danych umożliwia firmom efektywne wykorzystywanie zgromadzonych informacji do optymalizacji procesów, poprawy jakości produktów, prognozowania popytu oraz identyfikacji nowych trendów rynkowych. Firmy mogą szybciej podejmować decyzje strategiczne oraz dostosowywać swoje działania do dynamicznie zmieniającego się rynku.
- Przetwarzanie dużych zbiorów danych specjalistycznych:** obejmuje technologie, narzędzia i metody przetwarzania dedykowane do analizowania danych z wysoce wyspecjalizowanych dziedzin, takich jak geoinformatyka (GIS), biotechnologia, medycyna, finanse czy sektor energetyczny. Wymaga ono wykorzystania specyficznych algorytmów i architektur obliczeniowych, które są dostosowane do przetwarzania danych o unikalnej strukturze oraz precyzyjnych wymaganiach analitycznych. Przetwarzanie specjalistycznych zbiorów danych wymaga zastosowania dedykowanych algorytmów oraz specjalistycznego oprogramowania, które jest w stanie uwzględnić specyfikę przetwarzanych danych. W przypadku GIS dane geolokalizacyjne są analizowane w kontekście ich umiejscowienia. W medycynie przetwarzanie danych wymaga uwzględnienia wrażliwości informacji. W sektorze finansowym istotne jest analizowanie danych w czasie rzeczywistym. Przetwarzanie dużych zbiorów danych specjalistycznych umożliwia firmom i instytucjom uzyskanie precyzyjnych informacji i prognoz, które wspierają procesy decyzyjne. W sektorach takich jak opieka zdrowotna czy energetyka odpowiednie zarządzanie danymi przyczynia się do poprawy efektywności operacyjnej, lepszej alokacji zasobów oraz wprowadzenia innowacyjnych usług.
- Inne rozwiązania z zakresu dużych zbiorów:** danych obejmują innowacyjne podejścia, technologie oraz koncepcje, które nie mieszczą się w tradycyjnych kategoriach przetwarzania i analizy danych, ale są kluczowe dla dalszego rozwoju technologii Big Data. Mogą obejmować systemy zarządzania danymi wieloźródłowymi, zaawansowane metody wizualizacji danych, integrację danych z nowych źródeł (np. multimedia, dane przestrzenne), a także rozwijające się technologie, takie jak przetwarzanie kognitywne czy analiza danych z sensorów kwantowych. Inne rozwiązania w zakresie dużych zbiorów danych często wykorzystują zaawansowane

algorytmy przetwarzania i integracji danych, aby uzyskać kompleksowy wgląd w skomplikowane zależności między wieloma typami informacji. Przykładowo, systemy integracji danych wieloźródłowych łączą dane z czujników IoT, transakcji finansowych oraz mediów społecznościowych w celu tworzenia bardziej kompleksowych modeli predykcyjnych. Inne technologie, takie jak przetwarzanie kognitywne, są w stanie symulować ludzkie procesy myślowe, co wspiera analizy w obszarach takich jak przetwarzanie języka naturalnego czy analiza obrazów. Dzięki innowacyjnym rozwiązaniom w zakresie Big Data firmy mogą uzyskiwać nową wartość z danych pochodzących z różnych źródeł oraz odkrywać nowe zastosowania i modele biznesowe. Przetwarzanie multimediów, danych przestrzennych czy integracja różnych strumieni danych umożliwia lepsze zrozumienie potrzeb klientów, optymalizację procesów operacyjnych oraz rozwój nowych produktów i usług. Technologie te są kluczowe dla branż takich jak logistyka, energetyka, opieka zdrowotna i handel detaliczny.

Zaawansowanie

Wielkość globalnego rynku Big Data oszacowano w 2023 r. na 327,26 mld USD i przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie ona poziom 862,31 mld USD, rosnąc w latach 2024–2030 w tempie 14,9% (CAGR). Kluczowym czynnikiem napędzającym wzrost tego rynku jest rosnące wykorzystanie różnorodnych i dużych zbiorów danych generowanych w ramach wielu operacji biznesowych w celu uzyskania korzyści, takich jak usprawnione procesy decyzyjne, lepsze bieżące relacje z różnymi interesariuszami, dobrze określone strategie oraz znacznie lepsze doświadczenia klientów⁸¹.

Big Data w Polsce

Według opracowanego przez GUS raportu „Wykorzystanie zaawansowanych technologii w przemyśle w 2023 r.” aż 81,8% przedsiębiorstw przemysłowych nie przeprowadzało analiz Big Data ponieważ nie widziało potrzeby prowadzenia tego typu analiz. 18,1% firm tego typu nie analizowało Big Data z powodu przywiązania do „tradycyjnego” sposobu prowadzenia działalności. Firmy nie prowadziły analiz dużych zbiorów danych również z powodu braku wiedzy/kadr (13%), wysokich kosztów (9,7%) oraz obaw o bezpieczeństwo (4,4%). Inne powody niewykorzystania Big Data podało 0,9% firm⁸².

Najczęściej pozyskiwanym rodzajem danych były dane o preferencjach klientów lub inne informacje marketingowe (53,6%). Dane o stanie sektora gospodarki w którym firma prowadzi działalność były pozyskiwane przez 50,2% przedsiębiorstw przemysłowych, a dane w zakresie jakości własnych procesów produkcyjnych (np. sensory) pozyskiwało 47% firm.

Do prowadzenia analiz Big Data firmy najczęściej (33,4%) wykorzystywały dane w zakresie jakości własnych procesów produkcyjnych (np. sensory). 17,9% firm używało danych

⁸¹ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/big-data-industry>

⁸² <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/wykorzystanie-zaawansowanych-technologii-w-przemysle-w-2023-r-,10,1.html>

dotyczących preferencji klientów lub innych informacji marketingowych, a 10,9% danych o stanie sektora gospodarki, w którym firma prowadzi działalność. 21,8% firm używało któregośkolwiek rodzaju wymienionych danych.

Z przedsiębiorstw przemysłowych, które prowadziły analizy Big Data, 76,5% odnotowało poprawę jakości produktów/świadczonych usług. 76% firm zadeklarowało zwiększenie produktywności, 68,5% redukcję kosztów, a 61,3% przedsiębiorstw odnotowało skrócenie czasu produkcji/świadczania usług. Firmy zadeklarowały również wygenerowanie wartości dodanej wyrobu lub usługi (40,3%) , poprawę BHP (37,1%) oraz inne korzyści (5%).

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://stat.gov.pl/aktualnosci/cyfrowa-transformacja-polskiego-przemyslu-co-druga-firma-stawia-na-nowe-technologie,636,1.html>
2. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775859/EPRS_BRI\(2025\)775859_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775859/EPRS_BRI(2025)775859_EN.pdf)
3. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/big-data-industry>
4. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/wykorzystanie-zaawansowanych-technologii-w-przemysle-w-2023-r-,10,1.html>

Obliczenia wysokiej wydajności (ang. High Performance Computing – HPC)

Opis technologii

Definicja

Obliczenia wielkiej skali (ang. High Performance Computing – HPC): są to technologie obliczeniowe polegające na wykonywaniu miliardów operacji na sekundę. Zastosowanie superkomputerów (klastrów komputerowych) umożliwia modelowanie, symulacje oraz przetwarzanie gigantycznych ilości danych w czasie rzeczywistym. Pozwala to na szybkie rozwiązywanie skomplikowanych problemów, z którymi nie radzą sobie zwykłe komputery.

Standardowy system obliczeniowy rozwiązuje problemy głównie w oparciu o obliczenia szeregowe. Dzieli on obciążenie na sekwencję zadań, a następnie wykonuje je kolejno na tym samym procesorze. Natomiast HPC przeprowadza jednocześnie wiele zadań na wielu serwerach lub procesorach – są to tzw. obliczenia równoległe.

W przeciwieństwie to informatyki kwantowej (opartej na mechanice kwantowej i wielowymiarowych przestrzeniach obliczeniowych tworzonych przez algorytmy kwantowe) HPC opiera się na konwencjonalnych bitach i procesorach stosowanych w klasycznej informatyce. Choć rozwiązania kwantowe są bardziej wydajne w rozwiązywaniu wybranych problemów (np. symulacji zachowań cząsteczek), nie przewiduje się, aby w najbliższym czasie zastąpiły one obliczenia wysokiej wydajności –najlepszym rozwiązaniem wydaje się połączenie obu technologii w celu osiągnięcia optymalnej wydajności.

Podstawowe rodzaje

- **Obliczenia wielkiej skali (ang. High Performance Computing – HPC):** technologie obliczeniowe polegające na wykonywaniu miliardów operacji na sekundę. Modelowanie, symulacje, przetwarzanie gigantycznych ilości danych w czasie rzeczywistym stały się możliwe dzięki zastosowaniu klastrów komputerowych, zwanych też superkomputerami o coraz większej mocy obliczeniowej.
- **Obliczenia masowo równoległe:** obliczenia równoległe polegają na jednoczesnym wykonywaniu wielu zadań na licznych serwerach lub procesorach. HPC wykorzystuje obliczenia masowo równoległe, w których stosuje się od dziesiątek tysięcy do milionów procesorów lub rdzeni procesorów.
- **Wysokowydajna analityka danych (ang. High Performance Data Analytics – HPDA):** są to działania pozwalające pozyskiwać konkretne informacje z bardzo dużych zbiorów danych w czasie rzeczywistym. W ramach HPDA można m.in. szybko i szczegółowo przetwarzać dane, wyszukiwać informacje, a także odkrywać prawidłowości i schematy zawarte w analizowanych danych.

Powiązane technologie

- **Sztuczna inteligencja:** HPC wykorzystuje się w opracowywaniu modeli sztucznej inteligencji, m.in. w uczeniu maszynowym (ang. machine learning – ML) i nauczaniu głębokim (ang. deep learning).
- **Big Data:** HPC wykorzystywane jest do analizy ogromnych zbiorów danych.
- **Technologie chmurowe:** HPC w chmurze (nazywane również HPC jako usługa lub HPC as a service – HPCaaS) oferuje firmom znacznie szybszy, bardziej skalowalny i tańszy sposób korzystania z HPC. HPCaaS zazwyczaj obejmuje dostęp do klastrów HPC i infrastruktury hostowanej w centrum danych dostawcy usług w chmurze, możliwości sieciowe (takie jak sztuczna inteligencja i analityka danych) oraz wiedzę specjalistyczną w zakresie HPC.

Podstawowe elementy

- **Superkomputery:** komputery specjalnego przeznaczenia, wyposażone w miliony procesorów lub rdzeni procesorów odgrywają kluczową rolę w dziedzinie obliczeń o wysokiej wydajności. W przeciwieństwie do komputerów mainframe, superkomputery są znacznie szybsze i potrafią wykonać miliardy operacji w ciągu sekundy.
- **Klastry komputerowe (zwane również klastrami HPC):** klastry te są zaprojektowane z myślą o wydajnym przetwarzaniu dużych ilości danych – w tym celu komunikują się za pomocą szybkich łącz. W skład klastra HPC wchodzi wiele szybkich serwerów komputerowych połączonych w sieć z centralnym harmonogramem, który zarządza obciążeniem obliczeniowym w trybie równoległym. Komputery, zwane węzłami, wykorzystują albo wielordzeniowe procesory o wysokiej wydajności, albo (obecnie bardziej popularne) procesory graficzne (GPU). Węzły w klastrze mogą być wyspecjalizowane w wykonywaniu różnych typów zadań i zazwyczaj zawierają komponenty, takie jak rdzenie CPU, pamięć i przestrzeń dyskowa. Są one podobne do tych zainstalowanych w komputerach osobistych, występują jednak w większej ilości i cechuje je wyższa jakość i większa wydajność.
- **Komponenty o wysokiej wydajności:** wszystkie pozostałe zasoby obliczeniowe w klastrze HPC (takie jak sieć, pamięć, pamięć masowa i systemy plików) charakteryzują się dużą prędkością i przepustowością. Są to również komponenty o niskim opóźnieniu, które mogą nadążać za węzłami i optymalizować moc obliczeniową oraz wydajność klastra.
- **Interfejs przekazywania komunikatów (ang. Message Passing Interface – MPI):** obciążenia obliczeniowe w klastrach HPC opierają się na interfejsie przekazywania komunikatów (MPI) – standardowej bibliotece i protokole służącym do programowania równoległego, który umożliwia użytkownikom komunikację między węzłami w klastrze lub w sieci.

Przykładowe wykorzystania

- **Badania naukowe:** HPC wykorzystywane są do rozwiązywania problemów z bardzo różnorodnych dziedzin, takich jak m.in.
 - **Nauki o Ziemi:** analiza danych sejsmicznych, analiza danych geoprzestrzennych, mapowanie terenu.
 - **Meteorologia i klimatologia:** prognozy pogody, symulacja i modelowanie przebiegu zjawisk meteorologicznych np. wiatrów, modelowanie zmian klimatu.
 - **Medycyna:** m.in. epidemiologia (np. kwestie związane z Covid-19), sekwencjonowanie genomu, analiza danych diagnostycznych, projektowanie leków, modelowanie molekuł oraz wizualizacja wyników symulacji i analiz.
 - A także astronomia, chemia, energia jądrowa, fizyka kwantowa, demografia, urbanistyka i inne.
- **Obronność i cyberbezpieczeństwo:** analiza danych wywiadowczych, analiza i wykrywanie wzorców w danych dotyczących zagrożeń cyberbezpieczeństwa.
- **Przemysł:** HPC stosowane jest w procesach projektowania, testowania, produkcji i zarządzania sprzedażą. Obliczenia i analizy HPC pozwalają na szybsze podejmowania decyzji biznesowych. HPC wykorzystywane jest również tworzeniu nowych materiałów i komponentów, symulacji linii montażowych i analizie procesów, a także w mechanice i automatyce.
- **Energetyka:** modelowanie i symulacja rezerw energii, optymalizacja dystrybucji sieci elektroenergetycznych oraz poprawa efektywności energetycznej w procesach produkcyjnych.
- **Media i branża rozrywkowa:** livestreaming, renderowanie grafik 3D i efektów specjalnych, zbieranie i analiza danych potrzebnych do tworzenia treści i ich dystrybucji.
- **Bankowość i branża finansowa:** wykrywanie oszustw finansowych, przeprowadzanie analiz ryzyka np. metodą Monte Carlo.
- **Branża samochodowa:** proces projektowania produktów i procesów, np. analiza dynamiki płynów, aerodynamika, symulacja działania baterii.
- **Administracja:** HPC i HPDA mogą wspomagać sektor publiczny w zapewnianiu szybkiego dostępu do informacji pochodzących ze zgromadzonych dużych zbiorów danych, a także w zakresie cyberbezpieczeństwa.
- **Zrównoważone rolnictwo i gospodarka ekologiczna:** zarządzanie zasobami np. wody, analiza danych klimatycznych, analiza danych dotyczących m.in. produkcji plonów.

Zaawansowanie

Coraz większa ilość generowanych i przechowywanych danych wymaga nowych rodzajów ich przetwarzania. Obecnie coraz powszechniejsze staje się wykorzystanie obliczeń wysokiej wydajności w różnych obszarach zastosowań. Jednym z najczęściej wymienianych dziedzin, w których wykorzystuje się HPC jest tworzenie nowych rozwiązań sztucznej inteligencji.

Model HPCaaS (ang. High Performance Computing as a service – obliczenia wysokiej wydajności jako usługa) umożliwia dostęp do tej technologii nie tylko gigantom technologicznym, ale również mniejszym podmiotom. Według raportu The Business Research Company w 2025 r. wartość rynku tego typu usług wyniosła ponad 10 mld USD⁸³.

Usługi związane z HPC oferowane są zarówno przez największe firmy technologiczne np. Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud Platform czy IBM. W Polsce usługi związane z obliczeniami wysokiej wydajności oferuje Narodowe Centrum Kompetencji Obliczeniowych.

Obecnie światowej klasy superkomputery są w stanie wykonać obliczenia w skali petaskalowej – ponad 10^{15} (co najmniej milion miliardów) – operacji na sekundę. Kilka z istniejących systemów osiąga wydajność w skali przedeksaskalowej, czyli przekracza 10^{17} (co najmniej sto milionów miliardów) operacji na sekundę. Przewiduje się, że następna generacja (skala eksaskalowa) HPC będzie wykonywać ponad miliard miliardów (10^{18}) operacji na sekundę, jest to poziom mocy obliczeniowej porównywalny z sumą mocy obliczeniowej wszystkich telefonów komórkowych w UE. Europejski superkomputer JUPITER, zainaugurowany we wrześniu 2025 r., jest pierwszym superkomputerem w Europie, który osiągnął próg skali eksaskalowej.

EuroHPC JU (Europejskie Wspólne Przedsięwzięcie na rzecz Obliczeń Wielkiej Skali) jest to podmiot utworzony w 2018 roku z siedzibą w Luksemburgu, którego celem jest pełnienie wiodącej roli w europejskiej dziedzinie superkomputerów. EuroHPC JU umożliwia Unii Europejskiej i krajom uczestniczącym w EuroHPC JU koordynowanie wysiłków i łączenie zasobów, aby uczynić Europę światowym liderem w dziedzinie superkomputerów. Ma to na celu wzmacnianie doskonałości naukowej i siły przemysłowej Europy, wspieranie cyfrowej transformacji gospodarki EU, zapewniając jednocześnie jej suwerenność technologiczną. W Polsce w ramach EuroHPC JU działają m.in. Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, NCBR, Cyfronet AGH.

Celem organizacji jest:

- Opracowanie, wdrożenie, rozbudowa i utrzymanie wiodącego i bezpiecznego ekosystemu infrastruktury w zakresie superkomputerów, informatyki kwantowej, usług i danych na obszarze Unii Europejskiej.
- Wspieranie rozwoju i wdrażania systemów superkomputerowych zorientowanych na potrzeby użytkowników.
- Rozszerzenie wykorzystania infrastruktury HPC wśród użytkowników publicznych i prywatnych.
- Wspieranie rozwoju i wdrażania systemów superkomputerowych opartych na łańcuchach dostaw, które zapewniają dostęp do komponentów, technologii i wiedzy, a

⁸³ <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/high-performance-computing-as-a-service-global-market-report>

także ograniczą ryzyko zakłóceń oraz umożliwią opracowanie szerokiej gamy zastosowań zoptymalizowanych pod kątem tych systemów.

- Wspieranie rozwoju kluczowych umiejętności w dziedzinie HPC wśród europejskich środowisk naukowych i przemysłowych.
- Stworzenie i uruchomienie fabryk sztucznej inteligencji zlokalizowanych w pobliżu obiektów superkomputerowych EuroHPC w celu wspierania rozwoju europejskiego ekosystemu AI.
- Stworzenie gigafabryk AI (które mogłyby zostać połączone z siecią fabryk AI EuroHPC) w celu zapewnienia płynnej integracji, wsparcia użytkowników i wymiany wiedzy w całym europejskim ekosystemie AI.
- Całościowy rozwój ekosystemu kwantowego w tym: obliczeń i symulacji kwantowych, komunikacji kwantowej oraz wykrywania i metrologii kwantowej, a także zapewnienie bezpieczeństwa i odporności łańcucha dostaw technologii kwantowych oraz technologii wspomagających.

HPC w Polsce

W Polsce funkcjonuje [Narodowe Centrum Kompetencji Obliczeniowych](#) (NCKO), które powstało w ramach projektu [EuroCC](#)⁸⁴ i europejskiej inicjatywy [EuroHPC JU](#). Przynależność do sieci krajowych centrów kompetencji obliczeniowych daje dostęp do superkomputerów światowej klasy, a także do wsparcia technologicznego i szkoleniowego w zakresie wysokowydajnych obliczeń, gromadzenia, przechowywania, przetwarzania i analizowania dużych ilości danych oraz AI.

Siedziba NCKO znajduje się w Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet AGH w Krakowie. Pozostałe superkomputery, do których dostęp umożliwia NCKO, znajdują się w Gdańsku, Otwocku, Poznaniu, Wrocławiu i Warszawie.

W skład Konsorcjum PLGrid, które realizuje projekt EuroCC w Polsce, wchodzi:

- [Akademia Górniczo-Hutnicza – Akademickie Centrum Komputerowe Cyfronet AGH w Krakowie](#)
- [Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego](#)
- [Instytut Chemii Bioorganicznej Polskiej Akademii Nauk – Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe](#)
- [Politechnika Gdańska – Centrum Informatyczne Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej](#)
- [Narodowe Centrum Badań Jądrowych – Centrum Informatyczne Świerk](#)

⁸⁴ Celem projektu EuroCC jest stworzenie sieci krajowych centrów kompetencji obliczeniowych w 33 państwach europejskich.

- [Politechnika Wrocławska – Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe](#)

NCKO świadczy usługi dla uczelni, instytutów badawczych, przemysłu oraz administracji publicznej jako ośrodek ekspercki oraz punkt kontaktowy umożliwiający użytkownikom wykorzystanie polskiej i europejskiej infrastruktury superkomputerowej. Centrum oferuje również wsparcie konsultingowe w identyfikacji konkretnych usług w obszarach m.in. HPC, HPDA, AI, Big Data, NLP, analizy danych.

W NCKO zostały zrealizowane projekty w następujących dziedzinach:

- **Medycyna:** np. opracowanie modelu wyjaśnialnej sztucznej inteligencji do analizy obrazów medycznych w badaniach przesiewowych; opracowanie modelu epidemiologicznego COVID-19 pozwalającego na dostarczanie prognoz epidemiologicznych i analizę sytuacji epidemiologicznej w kraju.
- **Energetyka:** opracowanie referencyjnych baz danych DNS dla energetyki jądrowej, które będą mogły zostać wykorzystane w modelowaniu zjawisk fizycznych zachodzących w reaktorach jądrowych, a także do analiz bezpieczeństwa reaktorów jądrowych oraz w pracach koncepcyjnych nad nowymi technologiami jądrowymi.
- **Meteorologia:** prognozowanie jakości powietrza w dużej rozdzielczości czasowej i przestrzennej; niekomercyjne i komercyjne zastosowanie numerycznych prognoz meteorologicznych.
- **Lotnictwo:** numeryczna analiza aerodynamiczna i aeroakustyczna metod sterowania przepływem.
- **Fizyka/CFD:** obliczenia struktury elektronowej zaburzonego rutylu TiO₂ na komputerze wektorowym; analiza numeryczna obciążeń aerodynamicznych turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu; wykorzystanie dużej mocy obliczeniowych do analiz projektowania i optymalizacji wielkogabarytowych mieszalników przemysłowych z uwzględnieniem procesów ciepło-przepływowych; testy wydajności superkomputera CIŚ w symulacjach bezpieczeństwa pożarowego.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. https://www.eurohpc-ju.europa.eu/index_en
2. <https://cc.eurohpc.pl/>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/high-performance-computing>
4. <https://www.ibm.com/think/topics/hpc>
5. <https://www.ovhcloud.com/pl/learn/what-is-hpc/>
6. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/eurohpc-regulation-amended-strengthen-europes-ai-and-quantum-capabilities>
7. <https://hyperight.com/rise-of-high-performance-computing-as-a-service-hpcaas-market/>

Oprogramowanie (ang. Software)

Opis technologii

Definicja

Oprogramowanie: to kompleksowy zestaw instrukcji, kodów i procedur, które umożliwiają działanie systemów komputerowych oraz współpracę pomiędzy różnymi elementami infrastruktury cyfrowej. W kontekście Przemysłu 4.0 i transformacji cyfrowej, oprogramowanie odgrywa kluczową rolę, stanowiąc fundament wszystkich nowoczesnych procesów automatyzacji, zarządzania danymi i analizy.

Podstawowe rodzaje

- **Oprogramowanie systemowe:** Zestaw programów zarządzających zasobami komputera, w tym systemy operacyjne (np. Linux, Windows), które umożliwiają interakcję pomiędzy użytkownikiem a sprzętem, a także zarządzanie pamięcią, procesami i urządzeniami peryferyjnymi.
- **Oprogramowanie aplikacyjne:** Programy użytkowe, takie jak oprogramowanie biurowe (np. pakiet Microsoft Office), narzędzia do obróbki grafiki (np. Adobe Photoshop) oraz bardziej zaawansowane systemy ERP (Enterprise Resource Planning) do zarządzania procesami biznesowymi.
- **Oprogramowanie specjalistyczne:** Dedykowane rozwiązania dla specyficznych sektorów przemysłu, takich jak oprogramowanie CAD/CAM do projektowania inżynierskiego, systemy SCADA do automatyzacji przemysłowej, czy oprogramowanie medyczne do zarządzania danymi pacjentów.
- **Oprogramowanie jako usługa (ang. Software as a Service – SaaS):** model usługi chmury obliczeniowej, dzięki któremu użytkownik może korzystać z aplikacji działających na infrastrukturze chmurowej dostarczanej przez dostawcę usługi. Typowym modelem SaaS jest subskrypcja tj. cykliczna opłata za dostęp do aplikacji. Model ten eliminuje konieczność instalacji programu na komputerze użytkownika – dostęp do konkretnych funkcji oprogramowania odbywa się poprzez np. przeglądarkę internetową lub klienta aplikacji. Model SaaS przerzuca obowiązki instalacji, zarządzania, aktualizacji, pomocy technicznej z klienta na dostawcę usługi. Jednocześnie klient ma dostęp do aplikacji tylko tak długo, jak długo opłaca subskrypcję oraz nie ma możliwości (lub są one bardzo ograniczone) dokonywania zmian w oprogramowaniu.
- **Oprogramowanie dedykowane:** to oprogramowanie tworzone na zamówienie, dostosowane do specyficznych potrzeb i wymagań klienta lub organizacji. Jest projektowane, rozwijane i wdrażane w celu spełnienia unikalnych potrzeb operacyjnych, co odróżnia je od gotowych rozwiązań dostępnych na rynku.

Oprogramowanie dedykowane zapewnia większą elastyczność, kontrolę oraz dopasowanie do procesów biznesowych i wymagań klienta.

- **Rozwiązania e-commerce:** to technologie i narzędzia wspierające sprzedaż produktów i usług online. Obejmują one platformy handlowe, narzędzia do zarządzania płatnościami, magazynem, logistyką, marketingiem oraz obsługą klienta. Celem jest ułatwienie przedsiębiorstwom prowadzenia działalności handlowej w Internecie, od przyjmowania zamówień po dostawę towarów. Rozwiązania te umożliwiają integrację z systemami płatności, obsługą zamówień oraz marketingiem cyfrowym, co zwiększa efektywność operacyjną i zasięg sprzedaży.

Rodzaje oprogramowania biznesowego

Oprogramowanie biznesowe jest to każdy rodzaj oprogramowania przeznaczonego konkretnie do użytku przez przedsiębiorstwa. Jego zadaniem jest wspomaganie zarządzania i działalności firm w takich obszarach jak produkcja, handel, logistyka i zarządzanie magazynami, księgowość i inne. Do tego typu oprogramowania zalicza się takie rozwiązania jak m.in.:

- **Planowanie zasobów przedsiębiorstwa (ang. Enterprise Resource Planning – ERP):** System informatyczny, składający się z aplikacji (modułów) integrujących informacje i działania danego przedsiębiorstwa na wszystkich szczeblach i w większości obszarów zarządzania. Typowe systemy ERP łączą ze sobą planowanie, zaopatrzenie, sprzedaż, marketing, relacje z klientami, finanse i zarządzanie personelem i pozwalają na optymalne wykorzystanie zasobów oraz uporządkowanie zachodzących w przedsiębiorstwie procesów. Systemy te oparte są na jednej - wspólnej dla całego systemu - bazie danych. Dzięki temu dane wprowadzone raz są widoczne we wszystkich modułach. Niezwykle ważną cechą systemów ERP jest ich elastyczność i możliwość dopasowania do specyfiki danego przedsiębiorstwa⁸⁵.
- **Systemy zarządzania magazynem (ang. Warehouse Management Systems – WMS):** to oprogramowanie, które zapewnia wgląd w cały asortyment zapasów firmy i zarządza procesem realizacji zamówień w oparciu o łańcuch dostaw — od centrum dystrybucji do półki sklepowej. Rozwiązania WMS pozwalają też firmom jak najlepiej wykorzystywać zasoby, siłę roboczą i inwestycje w sprzęt poprzez koordynowanie i optymalizowanie przepływu zasobów. Systemy WMS są zaprojektowane w taki sposób, aby zaspokoić potrzeby całego globalnego łańcucha dostaw, w tym przedsiębiorstw dystrybucyjnych, produkcyjnych, zasobochłonnych i usługowych⁸⁶.
- **Systemy zarządzania relacjami z klientami (ang. Customer Relationship Management – CRM):** zbierają, łączą i analizują wszystkie zgromadzone dane o klientach, w tym informacje kontaktowe, informacje o interakcjach z

⁸⁵ <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/1784.pojecie.html>

⁸⁶ <https://www.oracle.com/pl/scm/logistics/warehouse-management/what-is-warehouse-management/>

przedstawicielami firmy, zakupach, zgłoszeniach serwisowych, zasobach oraz ofertach/propozycjach⁸⁷.

- **Systemy zarządzania zasobami ludzkimi (ang. Human Resource Management - HRM):** oprogramowanie używane przez organizacje do zarządzania wewnętrznymi funkcjami HR od zarządzania danymi pracowników po listy płac, rekrutację, świadczenia, szkolenia, zarządzanie talentami, angażowanie pracowników i monitorowanie ich obecności w pracy⁸⁸.
- **Business Intelligence (BI):** zbiór praktyk, metodyk, narzędzi i technologii informatycznych, służących zbieraniu i integrowaniu danych w celu dostarczenia informacji i wiedzy właściwym osobom, we właściwym miejscu oraz we właściwym czasie⁸⁹.

Główne role

- **Produkcja:** np. sterowanie i monitoring linii produkcyjnych, pomiary wydajności i produktywności.
- **Motoryzacja:** np. zastosowania produkcyjne, diagnostyczne, informacyjne w pojazdach.
- **Transport i logistyka:** np. zarządzanie transportem i śledzenie produktów.
- **Handel detaliczny:** np. zarządzanie zapasami, optymalizacja łańcucha dostaw, zmniejszenie kosztów operacyjnych.
- **Sektor publiczny:** np. zbieranie danych dotyczących awarii.
- **Wszystkie branże:** wykorzystanie oprogramowania analitycznego z elementami AI, wykorzystanie Industrial Internet of Things (IIoT), wykorzystanie chmury obliczeniowej, zażądanie zasobami ludzkimi, rozliczanie faktur.

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** Oprogramowanie sterujące robotami przemysłowymi oraz procesami automatyzacji linii produkcyjnych umożliwia realizację zadań z minimalną interwencją człowieka, przyczyniając się do wzrostu efektywności i precyzji.
- **Big Data:** Nowoczesne oprogramowanie umożliwia gromadzenie, przetwarzanie i analizowanie ogromnych ilości danych, co pozwala firmom na podejmowanie lepiej uzasadnionych decyzji, prognozowanie trendów rynkowych oraz optymalizację procesów produkcji i dystrybucji.

⁸⁷ <https://www.oracle.com/pl/cx/what-is-crm/>;

<https://www.parp.gov.pl/component/content/article/89583:oprogramowanie-crm-jak-prawidlowo-zarzadzac-danymi-klientow-i-zgodami-marketingowymi>

⁸⁸ <https://www.oracle.com/pl/human-capital-management/hrms/>

⁸⁹ <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/3972,pojecie.html>

- **Bliźniak cyfrowy:** Dzięki oprogramowaniu do tworzenia cyfrowych bliźniaków, przedsiębiorstwa mogą tworzyć wirtualne modele rzeczywistych systemów, które odzwierciedlają ich działanie w czasie rzeczywistym. To umożliwia testowanie i optymalizację procesów bez konieczności ingerencji w fizyczne zasoby, co przyspiesza wdrożenia i obniża ryzyko awarii.
- **Chmura obliczeniowa:** Oprogramowanie w chmurze umożliwia dostęp do zasobów obliczeniowych, danych i aplikacji z dowolnego miejsca na świecie, eliminując konieczność posiadania drogich serwerów lokalnych. Firmy mogą skalować swoje działania zgodnie z potrzebami, zwiększając elastyczność i redukując koszty.
- **Internet Rzeczy:** Oprogramowanie IoT umożliwia komunikację i wymianę danych pomiędzy urządzeniami w czasie rzeczywistym, pozwalając na monitorowanie i zarządzanie urządzeniami, maszynami i sensorami. Przykładem może być zarządzanie inteligentnymi fabrykami, gdzie urządzenia IoT współpracują z systemami analitycznymi w celu optymalizacji procesów produkcyjnych.
- **Sztuczna inteligencja:** Dzięki oprogramowaniu wykorzystującemu algorytmy uczenia maszynowego i sztucznej inteligencji, przedsiębiorstwa mogą analizować ogromne ilości danych, przewidywać trendy, automatyzować procesy decyzyjne oraz personalizować ofertę dla klientów. AI jest wykorzystywane w diagnostyce medycznej, automatyzacji procesów finansowych czy prognozowaniu popytu.

Podstawowe elementy

- **Systemy operacyjne:** Podstawowe oprogramowanie zarządzające zasobami komputera.
- **Bazy danych:** Oprogramowanie do zarządzania i przechowywania danych, takie jak SQL Server, Oracle Database.
- **Interfejsy użytkownika:** Graficzne i tekstowe środowiska interakcji z użytkownikami (GUI).
- **Oprogramowanie sieciowe:** Systemy zarządzające przepływem danych w sieciach komputerowych.
- **Narzędzia do analizy danych:** Oprogramowanie do gromadzenia, przetwarzania i analizy danych w czasie rzeczywistym (np. Hadoop, Tableau).

Mechanizm działania

- Oprogramowanie funkcjonuje na zasadzie przekształcania danych wejściowych na określone wyjścia, zgodnie z zestawem predefiniowanych reguł, algorytmów oraz procedur. Podstawowym zadaniem oprogramowania jest pośrednictwo pomiędzy użytkownikiem, sprzętem a złożonymi systemami informatycznymi, które wykonują różnorodne operacje w zależności od przeznaczenia aplikacji.

- **Przetwarzanie danych wejściowych:** Oprogramowanie odbiera dane wejściowe od użytkowników (np. wprowadzenie komendy, danych do analizy) lub z urządzeń peryferyjnych (np. czujniki, kamery, skanery). Następnie te dane są interpretowane przez algorytmy, które dokonują ich przetwarzania zgodnie z logiką danego programu. Przykładem może być wprowadzenie danych w systemie ERP w celu generowania raportów finansowych lub sterowanie robotem w procesie produkcji.
- **Zarządzanie zasobami systemu:** Oprogramowanie zarządza zasobami sprzętowymi komputera, takimi jak procesor, pamięć, przestrzeń dyskowa oraz urządzenia peryferyjne, aby zapewnić optymalne wykonanie operacji. System operacyjny pełni kluczową rolę w tym procesie, koordynując przydział zasobów dla różnych aplikacji i procesów działających jednocześnie. W ramach tego mechanizmu, oprogramowanie optymalizuje zużycie zasobów, zapewniając stabilność i wydajność działania systemu.
- **Przetwarzanie algorytmów i procedur:** Główna logika oprogramowania, oparta na zestawie algorytmów, jest odpowiedzialna za realizację kluczowych zadań aplikacji. Algorytmy mogą być proste, jak np. obliczenia matematyczne, lub bardziej zaawansowane, jak te wykorzystywane w sztucznej inteligencji, analizie danych czy symulacjach cyfrowych bliźniaków. Algorytmy są programowane w taki sposób, aby wykonywać operacje w najbardziej efektywny sposób, z uwzględnieniem złożoności danych oraz ograniczeń sprzętowych.
- **Interakcja z użytkownikiem i innymi systemami:** Oprogramowanie umożliwia użytkownikom interakcję poprzez graficzne lub tekstowe interfejsy użytkownika (GUI). Użytkownicy mogą wprowadzać dane, wybierać opcje, a także otrzymywać informacje zwrotne w postaci wyników, raportów, czy wizualizacji. Oprogramowanie może również integrować się z innymi systemami poprzez protokoły sieciowe, API lub inne mechanizmy komunikacyjne, co pozwala na wymianę danych i współpracę pomiędzy różnymi platformami.
- **Przetwarzanie wyjściowe i zarządzanie wynikami:** Po przetworzeniu danych wejściowych, wyniki są generowane i przekazywane użytkownikowi lub innym systemom. Mogą to być różnego rodzaju raporty, wizualizacje, komunikaty sterujące maszynami lub innymi systemami zewnętrznymi. Wyniki te są następnie wykorzystywane do dalszego podejmowania decyzji, automatyzacji procesów lub informowania użytkowników o stanie systemu.
- **Monitorowanie i aktualizacja:** Oprogramowanie często działa w trybie ciągłym, monitorując stan systemu oraz danych w czasie rzeczywistym. W przypadku oprogramowania sterującego procesami produkcyjnymi, oprogramowanie automatycznie reaguje na zmieniające się warunki i dostosowuje działanie systemu (np. zmniejsza moc produkcji, zmienia parametry działania maszyn). Dodatkowo, mechanizmy aktualizacji umożliwiają wprowadzanie poprawek, nowych funkcji i ulepszeń, co zapewnia stałą wydajność i bezpieczeństwo działania.

Przykładowe wykorzystania

- **Dostawa API (ang. Application Programming Interface):** odnosi się do procesu projektowania, tworzenia, udostępniania i zarządzania interfejsami programistycznymi, które umożliwiają wymianę danych między różnymi systemami informatycznymi. API umożliwia programom i aplikacjom komunikację i współpracę, co jest kluczowe w integracji różnych usług i systemów w nowoczesnych architekturach IT. Dostawa API obejmuje także monitorowanie wydajności, bezpieczeństwo oraz zapewnienie zgodności z wymaganiami biznesowymi i technologicznymi.
- **Prototypowanie i projektowanie produktów:** to procesy, które obejmują tworzenie wstępnych wersji produktów w celu ich testowania, walidacji oraz dalszego doskonalenia przed wprowadzeniem na rynek. Współczesne technologie, w tym oprogramowanie CAD (Computer-Aided Design) oraz narzędzia do symulacji i modelowania, pozwalają na szybkie i efektywne tworzenie prototypów. Etapy te są kluczowe w cyklu rozwoju produktów, ponieważ umożliwiają identyfikację potencjalnych problemów, optymalizację funkcji oraz dostosowanie projektu do oczekiwań użytkowników.
- **Tworzenie narzędzi web oraz aplikacji mobilnych na zamówienie klienta:** odnosi się do procesu projektowania, budowy i wdrażania aplikacji internetowych oraz mobilnych dostosowanych do specyficznych potrzeb użytkowników. Aplikacje te są rozwijane na bazie indywidualnych wymagań klientów, co pozwala na dostosowanie funkcji, interfejsu użytkownika oraz integracji z innymi systemami. Proces ten obejmuje wszystkie etapy tworzenia oprogramowania, od analizy wymagań po wdrożenie i utrzymanie aplikacji, co pozwala na realizację projektów biznesowych, usługowych, edukacyjnych i wielu innych.
- **Wystawianie i zarządzanie fakturami elektronicznymi:** obejmuje procesy związane z generowaniem, przesyłaniem, przechowywaniem oraz zarządzaniem fakturami w formie cyfrowej. Dzięki oprogramowaniu do fakturowania elektronicznego, firmy mogą automatyzować procesy księgowe, poprawić efektywność finansową i zmniejszyć ryzyko błędów. Systemy te integrują się z ERP, CRM oraz innymi narzędziami biznesowymi, umożliwiając zarządzanie płatnościami, analizę kosztów oraz zgodność z przepisami podatkowymi.
- **Zarządzanie produkcją:** obejmuje procesy planowania, organizowania, kontrolowania oraz optymalizowania zasobów i operacji w celu wytwarzania produktów w sposób efektywny i zgodny z wymaganiami jakościowymi. Jest to kluczowy element w cyklu życia produktów, szczególnie w sektorach takich jak przemysł, motoryzacja, elektronika i medycyna. Oprogramowanie do zarządzania produkcją (MES, ERP) wspiera przedsiębiorstwa w automatyzacji i optymalizacji procesów produkcyjnych, zwiększając wydajność oraz minimalizując marnotrawstwo surowców i czasu.
- **Zarządzanie zasobami organizacji:** to procesy związane z efektywnym wykorzystaniem i koordynacją zasobów przedsiębiorstwa, takich jak materiały,

pracownicy, finanse, informacje i technologie. Oprogramowanie do zarządzania zasobami organizacji, takie jak ERP (Enterprise Resource Planning), WMS (Warehouse Management Systems), CRM (Customer Relationship Management), oraz HRM (Human Resource Management), umożliwia firmom integrację różnych aspektów działalności i poprawę efektywności operacyjnej. Te systemy wspierają planowanie, kontrolę i analizę procesów biznesowych, zapewniając lepszą koordynację i podejmowanie decyzji na podstawie danych.

- **Inne rozwiązania z zakresu oprogramowania wspomagającego:** obejmują różnorodne narzędzia i aplikacje, które wspierają działanie przedsiębiorstw i organizacji, pomagając w automatyzacji procesów, zarządzaniu danymi, optymalizacji operacji czy zwiększeniu wydajności. Oprogramowanie wspomagające może obejmować systemy do zarządzania projektami, narzędzia analityczne, oprogramowanie do zarządzania relacjami z klientami (CRM), systemy zarządzania zasobami organizacji (ERP) i wiele innych.

Zaawansowanie

Według raportu opublikowanego przez Grand View Research w 2024 r. wielkość światowego rynku oprogramowania oszacowano na 730,70 mld USD. Przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie on poziom 1 397,31 mld USD, a tempo wzrostu w latach 2025–2030 wyniesie 11,3% (CAGR)⁹⁰. Wzrost ten będzie wynikał z kilku kluczowych czynników, w tym postępu technologicznego, inicjatyw rządowych oraz projektów badawczych zwiększających możliwości oprogramowania.

Należy również wziąć pod uwagę zwrot ku tzw. suwerenności cyfrowej, która przejawia się m.in. odchodzeniem od korzystania z oprogramowania oferowanego przez wielkie koncerny lub firmy zagraniczne. Powodowane jest to obawami o wykorzystanie oprogramowania do szpiegowania i wykradania informacji oraz uzależnieniem technologicznym, które mogłoby być wykorzystywane do rozgrywek politycznych. Przykładami takich działań może być np. podjęta przez rząd francuski decyzja o przejściu z oprogramowania Microsoft na Linux (w tym zakaz korzystania z Teams i innych amerykańskich programów telekonferencyjnych).

Oprogramowanie w Polsce⁹¹

Poziom wykorzystania oprogramowania biznesowego zależy od takich czynników jak: wielkość firmy, branża oraz rodzaj oprogramowania. Według danych GUS, w 2025 r. oprogramowanie ERP wykorzystywało 40,5% firm, oprogramowanie klasy CRM 25,1%, a Business Intelligence wykorzystywano w 13% przedsiębiorstw.

⁹⁰ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/software-market-report>

⁹¹ Opracowano na podstawie „Społeczeństwo informacyjne w Polsce w 2025 r.”, GUS, Warszawa, Szczecin, 2025. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne-w-polsce-w-2025-r-,1,19.html>

Z oprogramowania biznesowego najczęściej korzystają firmy duże klasy wielkości, z czego 94% z nich używa systemów ERP, 71,1% wykorzystuje systemy CRM, a 65,6% używa Business Intelligence.

Najrzadziej z oprogramowania biznesowego korzystają małe firmy. Z ERM korzysta 32,9% firm tej wielkości, z CRM 20%, a z Business Intelligence zaledwie 8%.

W przypadku firm średniej klasy wielkości odsetki te plasują się pomiędzy dużymi i małymi firmami. Wśród średnich firm 69,7% używa ERP, 42,8% z CRM, a 28,3% z Business Intelligence.

Biorąc pod uwagę rodzaj działalności, z oprogramowania biznesowego najczęściej korzystają firmy działające w branży informacji i komunikacji. 65,2% z nich używa systemów klasy ERP, 57,4% korzysta z programów CRM, a 38,7% używa Business Intelligence.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/software-market-report>
2. <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/1784,pojecie.html>
3. <https://www.oracle.com/pl/scm/logistics/warehouse-management/what-is-warehouse-management/>
4. <https://www.oracle.com/pl/cx/what-is-crm/>
5. <https://www.parp.gov.pl/component/content/article/89583:oprogramowanie-crm-jak-prawidlowo-zarzadzac-danymi-klientow-i-zgodami-marketingowymi>
6. <https://www.oracle.com/pl/human-capital-management/hrms/>
7. <https://stat.gov.pl/metainformacje/slownik-pojec/pojecia-stosowane-w-statystyce-publicznej/3972,pojecie.html>
8. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-technika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne-w-polsce-w-2025-r-1,19.html>

Przetwarzanie brzegowe (ang. Edge Computing)

Opis technologii

Definicje

Przetwarzanie brzegowe (ang. Edge Computing): termin ten odnosi się do przetwarzania, analizowania i przechowywania danych bliżej źródeł, w których te dane są generowane. W przeciwieństwie od tradycyjnego modelu przetwarzania i analizy danych w centralnym centrum danych (w siedzibie firmy lub w chmurze) w przypadku edge computing wytwarzane dane są przetwarzane na obrzeżach sieci.

Znaczenie przetwarzania brzegowego zwiększa się wraz ze wzrostem ilości wytwarzanych danych, co spowodowane jest głównie przez wykorzystanie czujników Internetu Rzeczy (ang. Internet of Things – IoT).

Telco Edge: są to rozwiązania przetwarzania brzegowego wykorzystywane w telekomunikacji.

Wykorzystanie rozwiązań edge computing pozwala na m.in.:

- Przechwytywanie, przetwarzanie i analizę danych w czasie prawie rzeczywistym.
- Szybszy dostęp do informacji potrzebnych do podejmowania decyzji.
- Zmniejszenie ilości danych przesyłanych poza organizację (np. do chmury).
- Filtrowanie i eliminację niepotrzebnych danych.
- Zwiększenie wydajności takich aplikacji jak np. rozszerzona rzeczywistość (AR), wirtualna rzeczywistość (VR), uczenie maszynowe (ML) i sztuczna inteligencja (AI).
- Możliwość wykorzystania danych w odległych lokalizacjach, które mogą mieć problemy z łącznością.
- Ułatwienie zapewnienie zgodności danych (brak przenoszenia danych ze źródła pochodzenia).
- Zmniejszenie kosztów operacyjnych.
- Wykorzystanie lokalnych sieci komputerowej (LAN).
- Zwiększenie bezpieczeństwa danych.
- Zwiększenie niezawodności i odporności na awarie – przetwarzanie danych jest możliwe nawet w przypadku słabego połączenia z Internetem, a awaria jednego urządzenia brzegowego nie wpływa na działanie pozostałych komponentów ekosystemu.

Podstawowe elementy

- **Urządzenia brzegowe:** są to urządzenia łączące wewnętrzną sieć lokalną (LAN) z zewnętrzną siecią rozległą (WAN) lub Internetem. Przykładowe urządzenia to m.in. inteligentne kamery, drony, maszyny przemysłowe i sprzęt do noszenia (ang. wearables). Urządzenia brzegowe są wyposażone w technologie umożliwiające wydajne przetwarzanie i przechowywanie danych, w tym: wbudowaną pamięć

masową, opcje łączności (np. Wi-Fi i Bluetooth, 5G), chipy AI do zaawansowanych zadań przetwarzania danych.

- **Sieci brzegowe:** zapewniają łączność i zasoby obliczeniowe dla urządzeń brzegowych. Składają się z komponentów, które są ze sobą połączone za pośrednictwem routerów i innego sprzętu sieciowego. Zmniejsza to potrzebę przesyłania danych do centrów danych czy chmury.
- **Infrastruktura brzegowa:** są to wszystkie komponenty wykorzystywane w przetwarzaniu brzegowym. Są to zarówno elementy fizyczne (np. serwery, urządzenia pamięci masowej, sprzęt sieciowy), jak i oprogramowanie. Ich głównym zadaniem jest zapewnienie zasobów potrzebnych do obsługi dużej ilości danych w czasie rzeczywistym.
- **Węzły brzegowe (ang. edge nodes):** węzły obliczeniowe zapewniające opóźnienia poniżej 20 milisekund, takie jak pojedynczy serwer lub inny zestaw połączonych zasobów obliczeniowych, eksploatowanych jako część infrastruktury przetwarzania brzegowego. Służą one do przetwarzania danych bliżej użytkownika końcowego lub miejsca ich powstawania, dzięki czemu: zmniejszają opóźnienia w przesyłaniu danych, odciążają sieci szkieletowe, umożliwiają działanie usług czasu rzeczywistego, zwiększają odporność infrastruktury dzięki rozproszeniu, poprawiają jakość usług cyfrowych o dużych wymaganiach wydajnościowych. Węzeł brzegowy może obsługiwać aplikacje gdzie czas odpowiedzi ma kluczowe znaczenie m.in. IoT, przetwarzanie obrazów, strumieniowanie multimediów, analitykę danych czy zadania dla przemysłu 4.0.

Przykładowe wykorzystania

- **Analiza danych (Data Analytics):** wstępne przetwarzanie i agregacja dużych wolumenów danych blisko miejsca ich powstawania.
- **Handel detaliczny:** uprawnienie operacji i poprawa jakości usług np. w obszarze zarządzania zapasami lub analizy zachowań klientów.
- **Przemysł:** utrzymanie wysokiej wydajności procesów produkcyjnych, przewidywanie napraw (analiza predykcyjna), sterowanie liniami produkcyjnymi w czasie rzeczywistym oraz eliminowanie zagrożeń na hali produkcyjnej.
- **Opieka zdrowotna:** analizowanie danych z urządzeń i sensorów medycznych m.in. monitorów EKG, glukometrów, termometrów, inhalatorów, ciśnieniomierzy itp.
- **Transport:** poprawa bezpieczeństwa w pojazdach autonomicznych, analiza danych z czujników i systemów GPS.
- **Smart cities:** przetwarzanie danych z czujników miejskich w czasie zbliżonym do rzeczywistego.
- **Rolnictwo:** monitorowanie poziomu wilgotności gleby, zawartości składników odżywczych, predykcje pogody w okresie wzrostu, wegetacji i owocowania roślin oraz przewidywanie optymalnego czasu zbiorów plonów.

- **Edukacja i VR/AR:** obsługa zdalnych laboratoriów, symulacji i wizualizacji 3D z niskim opóźnieniem.
- **Bezpieczeństwo i cyberochrona:** wykrywanie anomalii i analiza zagrożeń bezpośrednio na brzegu sieci oraz bezpieczeństwo danych dzięki ich rozproszeniu i eliminacji pojedynczego miejsca awarii.

Zaawansowanie

Według raportu „Edge Computing Market” opracowanego przez MarketsandMarkets rynek edge computing w 2025 r. osiągnął wartość ok. 168 miliardów USD. Przewiduje się, że wartość ta wzrośnie do 249 miliardów USD w 2030 r. z czego największy segment rynku ma należeć do zastosowań przemysłowych (automatyzacji i Internetu Rzeczy). W obszarze komponentów, największy wzrost przewidywany jest w obszarze oprogramowania potrzebnego do zarządzania przetwarzaniem brzegowym⁹².

Wraz ze wzrostem liczby urządzeń IoT (przewidywane jest, że w 2026 r. ich liczba ma wynieść 49 mld) wykorzystanie przetwarzania brzegowego będzie niezbędne, aby poradzić sobie z ilością wytwarzanych danych.

Unia Europejska opracowała [Internet of Things Policy](#), czyli dokument zawierający zestaw działań pozwalających na wspieranie i przyspieszenie wdrażania takich technologii jak IoT i edge computing.

Przetwarzanie brzegowe w Polsce

W 2025 r. rozpoczęło się oficjalne wdrażanie projektu [EdgePL](#) (Pilotażowe wdrożenie systemu węzłów brzegowych w Polsce). W jego ramach zostaną uruchomione 32 pilotażowe węzły brzegowe o opóźnieniach poniżej 20 ms, zintegrowane z krajową siecią naukową PIONIER. Powstała infrastruktura umożliwi testowanie usług blisko użytkownika, zwiększając efektywność przetwarzania danych oraz jakość usług cyfrowych. Realizacja przedsięwzięcia ma stanowić fundament dla rozwoju krajowej, neutralnej klimatycznie infrastruktury edge computing i integracji z europejskimi inicjatywami dotyczącymi danych i obliczeń rozproszonych. Projekt jest zgodny z założeniami unijnego programu „Droga ku cyfrowej dekadzie”.

Zakres prac w ramach przedsięwzięcia to:

1. Opracowanie wstępnego projektu systemu węzłów brzegowych.
2. Przygotowanie wymagań dla infrastruktury sieciowej i obliczeniowej.
3. Wybór aplikacji i ich dostosowanie do działania w infrastrukturze węzłów brzegowych oraz opracowanie i implementacja algorytmów wyboru najlepszego węzła brzegowego.

⁹² <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/edge-computing-market-133384090.html>

4. Wdrożenie pilotażowe – przez udostępnienie prototypowej sieci węzłów brzegowych użytkownikom końcowym.
5. Przygotowanie raportu z rekomendacjami dla pełnoskalowego systemu w Polsce.

Przewidywane korzyści płynące z projektu dla różnych sektorów to:

- **Administracja publiczna:** możliwość uruchamiania e-usług bliżej użytkownika, zwiększona niezawodność i bezpieczeństwo danych, lepsze wsparcie dla inteligentnych usług miejskich i transportowych.
- **Uczelnie, instytuty badawcze i sektor nauki:** dostęp do rozproszonej infrastruktury obliczeniowej, możliwość prowadzenia badań nad przetwarzaniem brzegowym, AI, 5G/6G, środowisko testowe dla projektów B+R.
- **Przemysł i przedsiębiorstwa:** możliwość testowania usług czasu rzeczywistego bez inwestowania w własne DC, nowe możliwości w przemyśle 4.0, logistyce, robotyce, optymalizacja kosztów transferu i przetwarzania danych.
- **Obywatele:** szybsze i bardziej responsywne usługi online, większe bezpieczeństwo danych przetwarzanych lokalnie, lepsza dostępność usług w mniejszych miejscowościach.

W skład konsorcjum projektowego wchodzi:

- Politechnika Poznańska (lider i koordynator),
- Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Sztucznej Inteligencji i Cyberbezpieczeństwa (Łukasiewicz – AI),
- Instytut Chemii Bioorganicznej PAN / Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS),
- OPI PIB – Ośrodek Przetwarzania Informacji.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-alliance-industrial-data-edge-and-cloud-releases-its-reference-architecture-telco-cloud>
2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/white-paper-how-master-europes-digital-infrastructure-needs>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-announces-eu75-million-euro-3c-project-build-federated-telco-edge-cloud-infrastructure>
4. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/digital-networks-act>
5. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/edge-observatory>
6. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/internet-things-policy>

Dodatkowe informacje

1. <https://www.ibm.com/think/topics/edge-computing>
2. <https://www.intel.com/content/www/us/en/learn/what-is-edge-computing.html>

3. <https://www.ovhcloud.com/pl/learn/what-is-edge-computing/>
4. <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-edge-computing>
5. <https://eitt.pl/baza-wiedzy/edge-computing-przyszlosc-przetwarzania-danych-blizej-zrodla/>
6. <https://www.gov.pl/web/baza-wiedzy/zabezpieczenia-sprzetowe-w-przetwarzaniu-chmurowym-i-brzegowym2>
7. <https://www.orange.pl/poradnik-dla-firm/chmura/co-to-jest-edge-computing/>
8. <https://edgepl.put.poznan.pl/>
9. <https://ai.usz.edu.pl/2025/04/02/technologia-ai-edge-i-jej-transformacyjny-wplyw-na-przemysl/>
10. <https://www.researchgate.net/publication/385260179> The Evolution of Edge Computing in a Data-Driven World
11. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/edge-computing-market-133384090.html>

Technologie rozproszonych rejestrów (ang. Distributed Ledger Technology – DLT)

Opis technologii

Definicje

Technologie rozproszonych rejestrów (ang. Distributed Ledger Technology - DLT): jest to technologia zapisu i przechowywania danych, która umożliwia wprowadzanie, weryfikowanie i przechowywanie danych w sposób zdecentralizowany, tj. pełna lub częściowa kopia rejestru (np. transakcji finansowej) znajduje się równocześnie na kilku komputerach (tzw. węzłach), które działają według zdefiniowanego mechanizmu konsensusu.

Budowa sieci komputerów jest oparta o architekturę *peer-to-peer*, a poszczególne urządzenia komunikują się w zdefiniowany sposób określony przez oprogramowanie.

Technologie rozproszonych rejestrów mają wiele zalet, takich jak:

- **Bezpieczeństwo:** dane są zabezpieczone kryptograficznie i rozproszone, co utrudnia manipulację.
- **Niezmiennność danych:** dane zapisane w węzłach nie mogą być zmienione lub usunięte.
- **Transparentność:** transakcje mogą być weryfikowane przez każdego uczestnika sieci.
- **Decentralizacja:** nie ma jednego centralnego serwera, co zmniejsza ryzyko awarii i ataków.
- **Efektywność:** transakcje są szybkie i tanie, szczególnie w porównaniu z tradycyjnymi systemami finansowymi.
- **Synchronizacja:** rejestry są jednocześnie współdzielone pomiędzy użytkownikami, dzięki czemu nie mogą powstać różne wersje rejestru.
- **Konsensus:** aby dodać dane do rejestru muszą one zostać zatwierdzone przez sieć.
- **Elastyczność wykorzystania:** rozwiązania DLT mogą być wykorzystywane w różnych branżach, np. sektorze finansowym, bankowości, logistyce, ochronie zdrowia, energetyce, telekomunikacji, ubezpieczeniach czy też administracji publicznej.

Technologie rozproszonych rejestrów mają również wady, np.:

- **Skalowalność:** wybrane technologie DLT mają ograniczoną skalowalność, co może przekładać się na wolniejsze przeprowadzanie transakcji i wyższe koszty.
- **Regulacje:** ponieważ technologie DLT są wciąż stosunkowo nowe, wciąż powstają nowe regulacje i przepisy prawne dotyczące ich wykorzystania co może prowadzić do niepewności prawnej.

- **Bezpieczeństwo:** istnieją pewne rodzaje zagrożeń, np. ataki typu 51%, które mogą prowadzić do manipulacji danymi zapisanymi w DLT⁹³.

Kryptoaktywa: aktywa cyfrowe wykorzystujące technologię blockchain do zabezpieczania i rejestrowania transakcji. Należą do nich m.in. kryptowaluty (środki płatnicze lub środki wymiany np. Bitcoin, Ether), tokeny (środki dostępu do towarów lub usług) i inne zasoby cyfrowe, które mogą być wykorzystywane jako forma płatności, przechowywane jako aktywa inwestycyjne lub mogące służyć jako narzędzia w różnych aplikacjach blockchain.

Najbardziej znanym rodzajem DLT jest blockchain.

Blockchain: to zdecentralizowana i rozproszona baza danych, która przechowuje informacje w blokach połączonych ze sobą w formie łańcucha. Każdy blok zawiera dane o transakcjach oraz odniesienie do poprzedniego bloku, co zapewnia bezpieczeństwo, transparentność i niezmienność przechowywanych informacji. W kontekście Przemysłu 4.0, blockchain jest stosowany do zapewnienia bezpieczeństwa, integralności danych oraz transparentności w procesach zarządzania łańcuchem dostaw, transakcji finansowych, zarządzania tożsamością i monitorowania zasobów. Podstawowe rodzaje blockchain to:

- **Blockchain publiczny:** Dostępny dla każdego, kto chce wziąć udział w sieci. Transakcje są widoczne i weryfikowane przez wszystkich uczestników (np. Bitcoin, Ethereum).
- **Blockchain prywatny:** Zarezerwowany dla wybranej grupy użytkowników, zwykle stosowany w firmach do zarządzania danymi wewnętrznymi, z ograniczonym dostępem i kontrolą nad weryfikacją transakcji.
- **Blockchain konsorcyjny:** Typ hybrydowy, gdzie grupa organizacji współdzieli zarządzanie siecią i weryfikację transakcji, co pozwala na zwiększenie transparentności przy jednoczesnej ochronie danych.

Podstawowe elementy blockchain to:

- **Blok:** to podstawowa jednostka przechowująca informacje o transakcjach. Każdy blok zawiera dane transakcyjne, znacznik czasu oraz odnośnik do poprzedniego bloku, co tworzy niezmienny łańcuch. Bloki mogą zawierać różne rodzaje danych, w zależności od zastosowania blockchainu.
- **Łańcuch bloków:** to sekwencja połączonych bloków, w której każdy blok jest powiązany z poprzednim poprzez kryptograficzny odnośnik. Ta struktura gwarantuje, że żadna transakcja nie może zostać zmieniona lub usunięta bez unieważnienia wszystkich kolejnych bloków.

⁹³ Atak 51% - może mieć miejsce wtedy, gdy członek sieci DLT (lub ich grupa) zdobędzie kontrolę nad ponad połową jej mocy obliczeniowej. Pozwala to na manipulowanie zapisem transakcji, tj. stworzenie własnej wersji łańcucha. Atak tego typu pozwala na podwójne wysyłanie środków, blokowanie transakcji, tworzenie przewagi nad innymi użytkownikami, tymczasowe przejęcie kontroli nad siecią.

<https://kanga.exchange/university/courses/poziom-zaawansowany/lessons/13-czym-jest-atak-51-na-blockchain/>

- **Hash:** to unikalny identyfikator wygenerowany dla każdego bloku na podstawie jego zawartości. Każda zmiana w bloku powoduje zmianę jego hash, co zapewnia integralność danych. Algorytmy haszujące, takie jak SHA-256, sprawiają, że dane są trudne do sfalszowania.
- **Inteligentne kontrakty (Smart Contracts):** to samoegzekwujące się kontrakty zapisane w kodzie, które automatycznie wykonują określone czynności po spełnieniu ustalonych warunków. Wykorzystywane są w wielu aplikacjach, od płatności po zarządzanie łańcuchem dostaw.
- **Węzły (Nodes):** to komputery uczestniczące w sieci blockchain, które przechowują kopie całego łańcucha bloków i weryfikują nowe transakcje. Węzły mogą być pełne (pełna kopia blockchained) lub lekkie (przechowujące jedynie kluczowe dane).
- **Mechanizm konsensusu:** to sposób, w jaki węzły w sieci blockchain osiągają porozumienie co do aktualnego stanu bazy danych. Popularne mechanizmy konsensusu to Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS) oraz Delegated Proof of Stake (DPoS). Mechanizmy te zapewniają, że tylko zweryfikowane transakcje są dodawane do łańcucha bloków.
- **Portfele kryptograficzne (ang. Crypto Wallets):** służą do zarządzania kluczami prywatnymi i publicznymi, które umożliwiają przeprowadzanie transakcji na blockchainie. Klucz prywatny pozwala na podpisywanie transakcji, natomiast klucz publiczny umożliwia ich weryfikację.
- **Kryptografia asymetryczna:** to system kryptografii wykorzystywany do zabezpieczania transakcji na blockchainie, który używa pary kluczy: prywatnego i publicznego. Ten system pozwala na autoryzację transakcji i zapewnia bezpieczeństwo danych.

Mechanizm działania blockchain to:

- **Tworzenie transakcji:** Użytkownik inicjuje transakcję, która jest następnie przesyłana do sieci blockchain, gdzie zostaje zaszyfrowana za pomocą kryptografii asymetrycznej.
- **Walidacja transakcji:** Transakcja jest weryfikowana przez węzły w sieci za pomocą mechanizmu konsensusu, np. PoW lub PoS. Węzły sprawdzają, czy transakcja jest zgodna z zasadami sieci i czy środki są dostępne.
- **Dodanie transakcji do bloku:** Zatwierdzone transakcje są grupowane w bloki. Blok jest następnie dodawany do łańcucha bloków i otrzymuje unikalny hash, który identyfikuje jego zawartość.
- **Łączenie bloków:** Każdy nowy blok jest powiązany z poprzednim poprzez swój hash, co tworzy łańcuch bloków. Ta struktura zapewnia, że zmiana jakiegokolwiek bloku unieważniłaby wszystkie następujące po nim bloki, co chroni przed manipulacją.
- **Rozproszenie kopii w sieci:** Zaktualizowany blockchain jest rozsyłany do wszystkich węzłów w sieci, które przechowują pełne kopie łańcucha bloków. W ten sposób dane są dostępne i zabezpieczone na wielu węzłach.
- **Wykonanie inteligentnych kontraktów (opcjonalnie):** W przypadku blockchainów obsługujących smart contracts, po spełnieniu określonych warunków zapisanych w

kontrakcie kod automatycznie wykonuje działania, np. przelew środków lub aktualizację danych.

- **Monitorowanie i audyt:** Blockchain pozwala na transparentne monitorowanie wszystkich transakcji. Każda transakcja jest trwała i niezmienna, co umożliwia audyt oraz zwiększa zaufanie użytkowników do systemu.

Przykładowe wykorzystania:

- **Przetwarzanie płatności i transferów pieniężnych:** przyspieszenie rozliczania i ograniczenie (lub eliminacja) opłat za transfery.
- **Monitorowanie łańcuchów dostaw:** zapewnienie pełnego śledzenia aktywów.
- **Cyfrowa tożsamość:** kontrola cyfrowych tożsamości oraz dostępu do danych.
- **Współdzielenie danych:** bezpieczne przechowywanie i przenoszenie danych przedsiębiorstwa.
- **Ochrona praw autorskich i tantiem:** zapewnienie artystom zachowania praw do ich dzieł, przejrzysta dystrybucja tantiem (w czasie rzeczywistym).
- **Zarządzanie siecią IoT:** funkcja regulatora sieci IoT (identyfikacja podłączonych urządzeń, monitorowanie aktywności, uwierzytelnianie urządzeń dodawanych do sieci).
- **Służba zdrowia:** zarządzanie danymi z badań klinicznych i elektroniczną dokumentacją medyczną zgodnie z przepisami RODO.

Zaawansowanie

Wielkość światowego rynku technologii blockchain oszacowano w 2024 r. na 31,28 mld USD i przewiduje się, że do 2030 r. osiągnie ona poziom 1 431,54 mld USD, rosnąc w latach 2025–2030 w tempie 90,1% (CAGR). Wzrost rynku napędzany jest rosnącym zapotrzebowaniem na bezpieczne i przejrzyste transakcje w wielu branżach⁹⁴.

Europejski rynek kryptoaktywów regulowany jest przez rozporządzeniem 2023/1114 w sprawie rynków kryptoaktywów (rozporządzenie MiCA – Markets in Crypto-Assets). Określa ono jednolite zasady dla emitentów kryptoaktywów, którzy do tej pory nie podlegali regulacjom wynikającym z innych aktów prawnych Unii Europejskiej (UE) dotyczących usług finansowych, oraz dla podmiotów świadczących usługi związane z takimi kryptoaktywami (dostawców usług w zakresie kryptoaktywów)⁹⁵.

Technologie rozproszonych rejestrów w Polsce

8 maja 2026 r. został przyjęty projekt ustawy o rynku kryptoaktywów, który zapewnia stosowanie unijnego rozporządzenia MiCA w ramach polskiego prawa. Rozwiązania przyjęte

⁹⁴ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/blockchain-technology-market>

⁹⁵ <https://eur-lex.europa.eu/PL/legal-content/summary/european-crypto-assets-regulation-mica.html>

w ustawie mają zwiększyć ochronę klientów i inwestorów, a także wprowadzają mechanizmy przeciwdziałania nadużyciom i oszustwom na rynku kryptoaktywów poprzez zaostrzenie kar. Według zapisów ustawy firmy zarejestrowane w Polsce będą mieć możliwość oferowania swoich usług obywatelom Polski, a także prowadzenie działalności we wszystkich państwach UE. Klientom (zarówno potencjalnym, jak i już posiadającym aktywa) ustawa ma zapewnić możliwość wykupu kryptoaktywów od emitenta w dowolnym momencie, otrzymanie pełnej informacji (w tym specyfiki, funkcji oraz potencjalnego ryzyka związanego z zakupem) na temat kryptoaktywów, dostęp do rzetelnych materiałów marketingowych oraz dostęp do szybkich i sprawiedliwych procedur rozpatrywania skarg.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://www.parp.gov.pl/component/content/article/88724:rachunek-dlt-jakie-ma-zastosowanie-w-nowoczesnej-gospodarce>
2. <https://www.gov.pl/web/finanse/rzad-przyjal-projekt-ustawy-o-rynku-kryptoaktywow>
3. https://www.knf.gov.pl/dla_rynku/kryptoaktywa_czy_wiaza_sie_z_wyzszym_ryzykiem/podstawy_tehnologii
4. https://www.knf.gov.pl/dla_rynku/kryptoaktywa_czy_wiaza_sie_z_wyzszym_ryzykiem
5. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/crypto-assets-how-the-eu-is-regulating-markets/>
6. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/blockchain-technology-market>
7. <https://eur-lex.europa.eu/PL/legal-content/summary/european-crypto-assets-regulation-mica.html>
8. https://www.knf.gov.pl/dla_rynku/kryptoaktywa_czy_wiaza_sie_z_wyzszym_ryzykiem/zakres_rozporzadzenia_mica
9. <https://kanga.exchange/university/courses/poziom-zaawansowany/lessons/13-czym-jest-atak-51-na-blockchain/>

Wirtualna rzeczywistość (ang. Virtual Reality)

Opis technologii

Definicja

Wirtualna rzeczywistość (VR): to technologia umożliwiająca tworzenie w pełni immersyjnych, trójwymiarowych środowisk cyfrowych, z którymi użytkownik może wchodzić w interakcje za pomocą specjalistycznego sprzętu, takiego jak gogle VR, kontrolery ruchu oraz sensory. VR symuluje obecność w wirtualnym świecie, co pozwala na realistyczne doświadczenie przestrzeni i interakcji w środowisku cyfrowym. W kontekście Przemysłu 4.0, VR znajduje zastosowanie w szkoleniach pracowników, symulacjach produkcyjnych, projektowaniu produktów oraz wizualizacji procesów, umożliwiając zmniejszenie kosztów i ryzyka oraz zwiększenie efektywności operacyjnej.

Metaverse (świat wirtualny): wg definicji opracowanej przez Centre on Regulation in Europe jest to „wciągające, synchroniczne, trwałe i spójne środowisko użytkownika w 3D, które może umożliwić masowe tworzenie treści.”⁹⁶ Należy jednak zaznaczyć, że jest to jedna z kilku istniejących definicji.

Podstawowe rodzaje

- **Wirtualna rzeczywistość (ang. Virtual Reality – VR):** całkowicie wirtualne, cyfrowe środowisko. Pełne zanurzenie w wirtualnej rzeczywistości.
- **Rzeczywistość rozszerzona (ang. Augmented Reality – AR):** świat rzeczywisty z elementami świata wirtualnego. Świat rzeczywisty wzbogacony o wirtualne obiekty, elementy i informacje.
- **Rzeczywistość mieszana (ang. Mixed Reality – MR):** połączenie świata rzeczywistego ze światem wirtualnym. Obustronne interakcje pomiędzy światem rzeczywistym a wirtualnym.

Główne role

- **Szkolenia i symulacje:** VR umożliwia bezpieczne szkolenie pracowników w realistycznych warunkach, symulując sytuacje kryzysowe, procedury produkcyjne oraz skomplikowane operacje techniczne.
- **Projektowanie i prototypowanie:** VR pozwala inżynierom i projektantom na tworzenie i testowanie cyfrowych prototypów produktów w pełnej skali, co skraca czas projektowania i umożliwia szybsze wdrażanie poprawek.
- **Wizualizacja danych:** Dzięki VR, skomplikowane dane i procesy mogą być przedstawiane w przestrzeni trójwymiarowej, co ułatwia ich analizę, monitorowanie oraz podejmowanie decyzji.

⁹⁶ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/751408/EPRS_ATAG\(2023\)751408_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/751408/EPRS_ATAG(2023)751408_EN.pdf)

- **Spotkania i współpraca zdalna:** VR umożliwia tworzenie wirtualnych przestrzeni pracy, w których zespoły mogą spotykać się i współpracować w czasie rzeczywistym, niezależnie od lokalizacji.
- **Rozrywka:** rozwiązania VR i AR wykorzystywane są m.in. w grach komputerowych oraz do tworzenia wirtualnych spacerów (np. po muzeach, galeriach sztuki, archiwach) oraz filmów.
- **Handel:** wirtualne modele np. mebli pozwalają na zachęcenie klientów do zakupów przez Internet.

Powiązane technologie

- **Big Data:** VR pozwala na wizualizację dużych zbiorów danych w interaktywny sposób, co ułatwia ich analizę i identyfikację wzorców.
- **Bliźniak cyfrowy:** VR pozwala na interakcję z cyfrowymi bliźniakami urządzeń i systemów, co umożliwia ich monitorowanie, testowanie oraz optymalizację w bezpiecznym, wirtualnym środowisku.
- **Chmura obliczeniowa:** VR korzysta z mocy obliczeniowej chmury do renderowania i przetwarzania złożonych środowisk, co umożliwia skalowanie i współpracę w czasie rzeczywistym.
- **Internet Rzeczy:** W połączeniu z IoT, VR umożliwia monitorowanie i analizę rzeczywistych danych z urządzeń w czasie rzeczywistym, co przydaje się m.in. w symulacjach i wizualizacjach procesów produkcyjnych.
- **Sztuczna inteligencja:** AI wspiera interakcje w VR, umożliwiając generowanie inteligentnych środowisk, wirtualnych asystentów oraz analizę zachowań użytkowników.

Podstawowe elementy

- **Infrastruktura VR/AR/XR:** to zestaw technologii i sprzętu, które wspierają działanie wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości. Działa ona na zasadzie przetwarzania danych z sensorów, kamer i innych urządzeń, aby generować interaktywne doświadczenia w wirtualnym lub rozszerzonym środowisku. Obejmuje zarówno elementy sprzętowe, takie jak gogle VR, kamery, sensory, kontrolery, jak i oprogramowanie oraz platformy, które umożliwiają użytkownikom interakcję z trójwymiarowymi światami w czasie rzeczywistym. Infrastruktura VR/AR/XR jest kluczowa dla rozwoju aplikacji w takich dziedzinach jak edukacja, rozrywka, przemysł czy medycyna.
- **Gogle VR:** Urządzenie wyświetlające obraz trójwymiarowy, które całkowicie otacza pole widzenia użytkownika, umożliwiając pełne zanurzenie w wirtualnym środowisku. Gogle VR są wyposażone w wyświetlacze o wysokiej rozdzielczości oraz czujniki śledzące ruch głowy.

- **Kontrolery ruchu:** Urządzenia, które pozwalają użytkownikowi na interakcję z obiektami w wirtualnym świecie. Kontrolery wyposażone są w przyciski, joysticki oraz sensory ruchu, które śledzą położenie i gesty rąk użytkownika.
- **Śledzenie ruchu:** System, który monitoruje pozycję użytkownika oraz jego ruchy w przestrzeni. Śledzenie może być realizowane przez kamery zewnętrzne (ang. outside-in tracking) lub sensory wbudowane w gogle VR (ang. inside-out tracking).
- **Silnik graficzny VR:** Oprogramowanie do tworzenia i renderowania środowisk VR. Silniki graficzne, takie jak Unity i Unreal Engine, pozwalają na budowanie interaktywnych i realistycznych środowisk 3D.
- **System audio przestrzennego:** Technologia dźwięku przestrzennego, która dostosowuje dźwięk do pozycji użytkownika, co zwiększa realizm i immersję w wirtualnym środowisku.
- **Haptyka:** Systemy haptyczne, takie jak rękawice VR, umożliwiają użytkownikom odczuwanie fizycznych wrażeń w wirtualnym świecie, co zwiększa realizm interakcji z obiektami.
- **Serwery i platformy chmurowe:** Umożliwiające przetwarzanie i renderowanie treści VR/AR/XR w czasie rzeczywistym.

Mechanizm działania

- **Generowanie środowiska 3D:** Na podstawie projektu środowiska VR, silnik graficzny renderuje realistyczne obrazy w trójwymiarze. Środowisko VR może być stworzone od podstaw lub bazować na rzeczywistych obiektach przy użyciu technologii skanowania 3D.
- **Wyświetlanie obrazu i śledzenie ruchu:** Gogle VR wyświetlają obraz dopasowany do ruchów głowy użytkownika, co pozwala na swobodne rozglądanie się po wirtualnym świecie. System śledzenia ruchu analizuje zmiany pozycji głowy i ciała, aby odpowiednio dostosować obraz.
- **Interakcja z otoczeniem:** Użytkownik może wchodzić w interakcje z wirtualnymi obiektami za pomocą kontrolerów ruchu, które przesyłają informacje o położeniu i gestach do systemu VR. W zaawansowanych aplikacjach stosuje się systemy haptyczne, które umożliwiają odczuwanie wrażeń dotykowych.
- **Symulacja dźwięku przestrzennego:** Systemy VR wykorzystują technologię dźwięku przestrzennego, która dostosowuje dźwięki do ruchów i pozycji użytkownika, co pozwala na realistyczne doświadczenie środowiska.
- **Przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym:** VR często wymaga przetwarzania dużej ilości danych w czasie rzeczywistym, co umożliwia użytkownikowi płynne i realistyczne doznania. Proces ten obejmuje renderowanie grafiki, śledzenie ruchu i analizę interakcji użytkownika.

- **Zastosowanie praktyczne:** Wirtualne środowisko VR może być stosowane do szkoleń, testowania prototypów, wizualizacji danych lub zdalnej współpracy. VR jest wykorzystywane w takich branżach jak produkcja, architektura, edukacja oraz medycyna.

Podstawowe elementy

- **Platformy szkoleniowe VR/AR/XR:** Zintegrowane systemy umożliwiające zarządzanie treściami edukacyjnymi oraz śledzenie postępów uczestników szkoleń.
- **Symulatory:** Oprogramowanie i urządzenia symulujące realistyczne warunki pracy, takie jak operacje chirurgiczne, obsługa maszyn czy scenariusze awaryjne.
- **Śledzenie ruchu:** Technologie, które monitorują i rejestrują ruchy użytkowników, zapewniając interaktywne doświadczenie szkoleniowe.
- **Narzędzia do oceny umiejętności:** Systemy umożliwiające ocenę postępów pracowników na podstawie ich działań w środowiskach VR/AR/XR.
- **Interfejsy użytkownika:** Aplikacje umożliwiające intuicyjną interakcję z wirtualnymi symulacjami, które mogą być dostosowywane do różnych potrzeb szkoleniowych.

Przykładowe wykorzystania

- **Kompleksowe rozwiązania VR/AR/XR do szkoleń i treningu:** to zaawansowane systemy, które umożliwiają tworzenie realistycznych symulacji i interaktywnych środowisk edukacyjnych. Dzięki zastosowaniu wirtualnej rzeczywistości (VR), rozszerzonej rzeczywistości (AR) oraz rzeczywistości mieszanej (XR), pracownicy mogą uczestniczyć w szkoleniach w pełni immersyjnych warunkach. Technologie te są wykorzystywane w różnych sektorach, takich jak przemysł, medycyna, wojsko, lotnictwo oraz edukacja, wspierając zdobywanie praktycznych umiejętności bez ryzyka i kosztów związanych z fizycznymi szkoleniami. Rozwiązania VR/AR/XR do szkoleń działają poprzez symulację realistycznych środowisk, w których użytkownicy mogą ćwiczyć konkretne umiejętności. Gogle VR oraz urządzenia AR/XR dostarczają obrazy trójwymiarowych modeli, które reagują na ruchy użytkowników oraz interakcje z wirtualnymi obiektami. Symulatory pozwalają pracownikom na symulowanie skomplikowanych zadań, takich jak operacje techniczne lub ćwiczenia w sytuacjach awaryjnych. W ten sposób można przeprowadzać szkolenia bez ryzyka, z możliwością powtarzania scenariuszy w dowolnym momencie. Postępy uczestników są śledzone, a dane analizowane w celu oceny ich wyników. VR/AR/XR umożliwia redukcję kosztów związanych z fizycznymi symulacjami, sprzętem szkoleniowym oraz materiałami eksploatacyjnymi. Umożliwiając bezpieczne i efektywne szkolenia w realistycznym środowisku, rozwiązania te przyczyniają się do zwiększenia produktywności i zmniejszenia ryzyka błędów. Wspierają również ciągły rozwój zawodowy pracowników, co wpływa na poprawę jakości usług i produktów.

- **Oprogramowanie VR/AR/XR:** to zestaw narzędzi, aplikacji i platform, które umożliwiają tworzenie, zarządzanie i interakcję z wirtualnymi, rozszerzonymi oraz mieszanymi środowiskami. Dzięki tym technologiom użytkownicy mogą wchodzić w interakcję z symulowanymi światami, otrzymywać dane w czasie rzeczywistym lub wizualizować trójwymiarowe obiekty. Oprogramowanie to znajduje zastosowanie w szerokim spektrum dziedzin, w tym w edukacji, przemyśle, rozrywce, medycynie i marketingu. Oprogramowanie VR/AR/XR działa poprzez przetwarzanie danych z czujników, kamer i urządzeń kontrolujących oraz renderowanie trójwymiarowych obrazów, które dostosowują się do pozycji i ruchu użytkownika. W środowiskach rozszerzonej rzeczywistości (AR) oprogramowanie nakłada wirtualne elementy na rzeczywiste obrazy z kamery, co umożliwia interakcję z danymi wizualnymi w czasie rzeczywistym. Oprogramowanie umożliwia również integrację z systemami analizy danych, co pozwala na tworzenie inteligentnych środowisk, które dynamicznie reagują na działania użytkowników. Oprogramowanie VR/AR/XR znajduje coraz szersze zastosowanie w różnych sektorach gospodarki. W edukacji umożliwia zdalne nauczanie oraz przeprowadzanie wirtualnych eksperymentów, w przemyśle wspiera projektowanie i testowanie prototypów, a w medycynie ułatwia szkolenie chirurgów oraz diagnostykę pacjentów. W handlu oprogramowanie AR pozwala na wyświetlanie produktów w rozszerzonej rzeczywistości, co poprawia doświadczenia zakupowe. W miarę rozwoju technologii VR/AR/XR, oprogramowanie będzie miało jeszcze większy wpływ na optymalizację procesów i tworzenie nowych modeli biznesowych.
- **Symulatory VR/AR/XR:** to zaawansowane narzędzia technologiczne, które umożliwiają tworzenie realistycznych symulacji i interaktywnych środowisk wirtualnych, rozszerzonych lub mieszanych. Użytkownicy mogą wchodzić w interakcję z wirtualnym środowiskiem, aby ćwiczyć i doskonalić umiejętności, które wymagają precyzji, doświadczenia lub szkolenia w bezpiecznym, kontrolowanym otoczeniu. Symulatory te znajdują zastosowanie w edukacji, medycynie, lotnictwie, przemyśle oraz rozrywce. Symulatory VR/AR/XR działają poprzez integrację urządzeń śledzących ruch użytkownika z algorytmami symulacyjnymi, które odtwarzają realistyczne scenariusze w wirtualnym środowisku. Użytkownicy noszą gogle VR lub korzystają z urządzeń AR/XR, które dostarczają obrazy 3D i umożliwiają interakcję z wirtualnymi obiektami w czasie rzeczywistym. Silniki renderujące generują wizualizacje, które zmieniają się w zależności od ruchów użytkownika i interakcji z wirtualnym otoczeniem. Symulatory mogą także oferować sprzężenie zwrotne, takie jak wibracje lub dźwięki, aby zwiększyć realizm doświadczenia. Symulatory VR/AR/XR mają szerokie zastosowanie w sektorach, które wymagają intensywnych szkoleń i doskonalenia umiejętności, takich jak medycyna, lotnictwo, przemysł oraz wojsko. Pozwalają na redukcję kosztów związanych z fizycznym sprzętem szkoleniowym, zmniejszają ryzyko błędów, a także umożliwiają wielokrotne przeprowadzanie ćwiczeń w kontrolowanych warunkach. Dzięki symulatorom pracownicy mogą ćwiczyć

scenariusze wysokiego ryzyka, takie jak operacje chirurgiczne czy loty testowe, bez ryzyka dla zdrowia i bezpieczeństwa.

- **Systemy nawigacji VR/AR/XR:** to technologie umożliwiające użytkownikom poruszanie się i interakcję w wirtualnych, rozszerzonych lub mieszanych rzeczywistościach. Te systemy pomagają użytkownikom zrozumieć ich pozycję w cyfrowym lub rzeczywistym środowisku, często w czasie rzeczywistym, i dostarczają informacji o ścieżkach, kierunkach oraz celach w danym środowisku. Znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach, od gier i rozrywki po przemysł, medycynę i logistykę. Systemy nawigacji VR/AR/XR działają poprzez śledzenie pozycji i ruchów użytkownika za pomocą sensorów, kamer i technologii GPS. W przypadku VR, nawigacja opiera się na precyzyjnym odwzorowaniu ruchów użytkownika w wirtualnym świecie, co pozwala na realistyczne poruszanie się po cyfrowym środowisku. W AR, systemy nawigacji nakładają wirtualne wskazówki na rzeczywiste otoczenie, co pomaga użytkownikom w odnajdywaniu się w fizycznym świecie. Integracja z algorytmami uczenia maszynowego może pozwolić na dynamiczne dostosowywanie ścieżek i informacji nawigacyjnych w zależności od ruchów użytkownika. Systemy nawigacji VR/AR/XR mają szerokie zastosowanie w wielu branżach. W przemyśle i logistyce mogą usprawniać zarządzanie magazynami oraz optymalizować procesy transportowe. W medycynie pomagają chirurgom nawigować podczas skomplikowanych procedur, natomiast w edukacji i szkoleniach pozwalają na bezpieczne poruszanie się po symulowanych przestrzeniach. W handlu detalicznym nawigacja AR wspiera klientów w odnajdywaniu produktów na półkach, a w branży gier i rozrywki poprawia wrażenia użytkowników, oferując realistyczne ścieżki poruszania się po wirtualnych światach.
- **Wykorzystanie VR/AR/XR w komunikacji:** odnosi się do zastosowania technologii wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości do interakcji międzyludzkiej, prezentacji treści oraz zdalnej współpracy. Dzięki tym technologiom możliwe jest tworzenie immersyjnych doświadczeń, które umożliwiają użytkownikom uczestnictwo w spotkaniach, prezentacjach czy szkoleniach w realistycznych wirtualnych środowiskach lub wzbogacanie rzeczywistych doświadczeń o dodatkowe informacje i elementy. Zastosowania VR/AR/XR w komunikacji obejmują szeroką gamę branż, w tym biznes, edukację, medycynę oraz marketing. Systemy komunikacyjne VR/AR/XR opierają się na urządzeniach takich jak gogle VR, kamery i sensory, które śledzą ruchy użytkownika i przekładają je na interakcje w wirtualnym środowisku. Platformy do komunikacji VR/AR umożliwiają uczestnictwo w spotkaniach, prezentacjach lub projektach, podczas których uczestnicy mogą swobodnie poruszać się po wirtualnych przestrzeniach, prezentować materiały czy współpracować w czasie rzeczywistym. Integracja z technologiami chmurowymi i internetowymi umożliwia zdalną współpracę, podczas gdy sztuczna inteligencja może wspierać personalizację i analizę danych interakcji. Wykorzystanie VR/AR/XR w komunikacji rewolucjonizuje współpracę zdalną i prezentację treści w różnych sektorach, takich jak biznes,

edukacja, marketing i medycyna. Dzięki immersyjnej technologii możliwe jest prowadzenie bardziej interaktywnych i angażujących spotkań, szkoleń czy prezentacji. Firmy mogą ograniczać koszty związane z podróżami służbowymi, a edukacja i szkolenia stają się bardziej dostępne i skuteczne. W marketingu VR/AR pozwala na prezentowanie produktów i usług w sposób angażujący klientów, co zwiększa efektywność działań promocyjnych.

- **Inne rozwiązania z zakresu wykorzystania VR/AR/XR:** obejmują technologie wirtualnej, rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości stosowane w mniej typowych, lecz innowacyjnych i zaawansowanych obszarach. Mogą obejmować zastosowania w sektorach takich jak architektura, sztuka, moda, turystyka, a także w rozwijających się dziedzinach przemysłowych, gdzie VR/AR/XR pozwala na tworzenie nowych modeli biznesowych oraz efektywniejszą pracę z danymi. Technologie te mogą być także stosowane w diagnostyce, monitoringu oraz kontroli jakości, wspierając transformację cyfrową w różnych branżach. Inne rozwiązania VR/AR/XR działają poprzez łączenie zaawansowanych technologii renderowania 3D, śledzenia ruchu oraz przetwarzania danych w czasie rzeczywistym. Użytkownicy mogą wchodzić w interakcję z wirtualnymi obiektami i przestrzeniami, które są dynamicznie generowane i dostosowywane na podstawie danych wejściowych z sensorów lub systemów IoT. Silniki renderujące przekształcają dane i modele 3D w obrazy widoczne przez użytkownika, a zaawansowane algorytmy pozwalają na symulowanie interakcji w czasie rzeczywistym. Zastosowania obejmują zarówno doświadczenia indywidualne, jak i wieloosobowe, np. w turystyce, architekturze czy modzie. Inne rozwiązania VR/AR/XR mają znaczący wpływ na rozwój innowacji w sektorach takich jak architektura, turystyka, sztuka czy moda. W przemyśle te technologie wspierają optymalizację procesów, w tym planowanie przestrzenne, projektowanie oraz wizualizacje, które poprawiają jakość produktów i usług. Zastosowania VR/AR/XR przyczyniają się do obniżenia kosztów operacyjnych, zwiększenia efektywności oraz wprowadzania nowych modeli biznesowych, które dostosowują się do wymagań rynkowych. W architekturze VR/AR umożliwia tworzenie realistycznych wizualizacji projektów, w turystyce pozwala na wirtualne zwiedzanie miejsc, a w sztuce tworzy nowe formy ekspresji artystycznej.

Zaawansowanie

Wielkość światowego rynku rzeczywistości wirtualnej (VR) szacuje się na 97.41 mld USD w 2026 r. a według przewidywań ma on osiągnąć wartość 268.58 mld USD w 2030 r. z CAGR na poziomie 18,4% w przewidywanym okresie⁹⁷. Głównym motorem rozwoju jest coraz powszechniejsza adopcja tego typu technologii m.in. w branży gier, szkoleń, medycynie, sprzedaży i zastosowaniach przemysłowych. Na rozwój technologii VR duży wpływ mają również nowe rozwiązania w takich dziedzinach jak technologie wyświetlania, przetwarzanie przestrzenne (ang. spatial computing) czy śledzenie ruchu, które pozwalają na poprawę

⁹⁷ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/augmented-reality-virtual-reality-market-1185.html>

wydajności urządzeń VR, realizmu i użyteczności środowisko wirtualnych. Również rozwój AI, łączności 5G i rozwiązań chmurowych pozwala na tworzenie skalowalnych, bardziej responsywnych i napędzanych danymi aplikacji. Także ulepszenia w obszarze projektowania urządzeń, np. lekkie okulary/gogle VR czy wydajniejsze baterie pozwalają na coraz powszechniejsze wykorzystanie VR.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. <https://en.parp.gov.pl/component/content/article/89444:wirtualna-rzeczywistosc-vr-w-dzialalnosci-przedsiębiorstwa-jak-wykorzystac-ja-zgodnie-z-prawem>
2. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/w-bezpiecznej-wirtualnej-rzeczywistosci>
3. <https://epicvr.pl/pl/wirtualne-wystawy-i-targi-vr-blog/>
4. <https://startup.pfr.pl/artukul/praktyczne-zastosowania-wirtualnej-rzeczywistosci-w-czym-moze-pomoc-nam-vr>
5. <https://mitsmr.pl/zarzadzanie-projektami/wirtualna-rzeczywistosc-w-procesie-onboardingu/>
6. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/augmented-reality-virtual-reality-market-1185.html>
7. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA\(2023\)751408](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA(2023)751408)
8. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/775e6eec-16f5-11ee-806b-01aa75ed71a1/language-en>

Technologie kwantowe i postkwantowe

Kryptografia kwantowa i postkwantowa (ang. Quantum and Post-quantum cryptography)

Opis technologii

Definicje

Technologie kwantowe: są to zaawansowane rozwiązania technologiczne oparte na zasadach fizyki kwantowej, które mają potencjał rewolucjonizowania obliczeń, komunikacji, a także precyzyjnych pomiarów. Zjawiska kwantowe, takie jak splątanie, superpozycja czy tunelowanie, umożliwiają osiągnięcie możliwości technologicznych, które są poza zasięgiem tradycyjnych technologii opartych na fizyce klasycznej⁹⁸.

W kontekście Przemysłu 4.0, technologie kwantowe odgrywają kluczową rolę w rozwijaniu nowych systemów obliczeniowych, takich jak komputery kwantowe, oraz w zabezpieczaniu komunikacji poprzez kwantową kryptografię. Technologia kwantowa znajduje także zastosowanie w precyzyjnych systemach pomiarowych i czujnikach, które pozwalają na osiąganie ekstremalnie wysokiej dokładności.

Kryptografia jest to dziedzina zajmująca się ochroną informacji poprzez opracowywanie zasad, środków i metod zapobiegających nieuprawnionemu dostępowi. Wykorzystuje się ją przede wszystkim do ochrony wrażliwych informacji m.in. poufnych danych, płatności elektronicznych, prywatnej komunikacji oraz danych przechowywanych w systemach komputerowych. W zakres tej dziedziny wchodzi techniki szyfrowania i deszyfrowania, które wykorzystują algorytmy i funkcje matematyczne do zapewnienia bezpieczeństwa oraz poufności danych (zarówno podczas ich przechowywania, jak i w trakcie przesyłania między systemami informatycznymi). Algorytmy kryptograficzne przekształcają dane przy użyciu zmiennych, tzw. kluczy, które zapewniają zabezpieczenie przesyłanych informacji⁹⁹.

Obecnie większość zaszyfrowanej komunikacji opiera się na algorytmach **kryptografii symetrycznej** i **asymetrycznej**, które różnią się sposobem dystrybucji kluczy kryptograficznych.

Algorytmy klucza asymetrycznego (tzw. szyfrowanie kluczem publicznym) wykorzystują różne klucze do szyfrowania i deszyfrowania: jeden klucz publiczny i jeden klucz prywatny. Informacje są szyfrowane przy użyciu klucza publicznego odbiorcy, a odszyfrować je może wyłącznie właściciel tajnego klucza prywatnego. Ponieważ klucze prywatne nie są przeznaczone do udostępniania, ataki polegające na ich przechwyceniu są trudniejsze do przeprowadzenia. Dlatego też większość podmiotów kryptograficznych i funkcji ustanawiania

⁹⁸ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/760413/EPRS_ATA\(2024\)760413_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/760413/EPRS_ATA(2024)760413_EN.pdf)

⁹⁹ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI\(2024\)766237_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI(2024)766237_EN.pdf)

kluczy wykorzystuje kryptografię klucza publicznego (np. w przypadku podpisów cyfrowych)¹⁰⁰.

Algorytmy symetryczne wykorzystują te same klucze do szyfrowania i deszyfrowania, co oznacza, że , zarówno nadawca, jak i odbiorca informacji chronionych muszą znać te klucze, aby móc się ze sobą komunikować. Kryptografia symetryczna jest wykorzystywana do masowego szyfrowania dużych ilości danych (np. w przypadku transakcji kartowych w sektorze bankowym). Jeśli jednak atakującemu uda się przechwycić klucze, chronione informacje przestaną być tajne¹⁰¹.

Algorytmy szyfrowania symetrycznego są szybkim i wydajnym sposobem ochrony danych, wymagającym mniejszej mocy obliczeniowej niż algorytmy szyfrowania asymetrycznego, ale stawiają więcej wyzwań związanych z zarządzaniem kluczami (np. tworzeniem i zapewnieniem ich bezpieczeństwa) w porównaniu z algorytmami szyfrowania asymetrycznego.

Systemy kryptograficzne służące do zabezpieczania informacji często łączą te dwa algorytmy. Najpierw stosuje się kryptografię asymetryczną do bezpiecznej wymiany kluczy między dwiema stronami. Następnie zaś strony wykorzystują klucze do komunikowania się ze sobą w postaci zaszyfrowanej, przechodząc do użycia kryptografii symetrycznej.

Komputery kwantowe mają być w stanie wykonywać obliczenia i rozwiązywać pewne problemy matematyczne znacznie szybciej i skuteczniej niż komputery klasyczne. Stanowi to zagrożenie dla systemów kryptograficznych, których bezpieczeństwo opiera się na trudności w rozwiązywaniu określonych problemów matematycznych. Istnieją już algorytmy służące do łamania tradycyjnych rozwiązań kryptograficznych przy użyciu komputerów kwantowych – najbardziej znanym z nich jest tzw. algorytm Shora.

Kryptografia postkwantowa (wykorzystująca właściwości komputerów klasycznych) oraz kryptografia kwantowa (wykorzystująca właściwości mechaniki kwantowej) to dwa rodzaje kluczowych technologii zdolnych do ochrony infrastruktury cyfrowej przed atakami komputerów kwantowych.

Kryptografia kwantowa (ang. quantum cryptography) wykorzystuje podstawowe prawa mechaniki kwantowej do szyfrowania i bezpiecznego przesyłania danych. Metody tego typu kryptografii wykorzystują światłowody lub sieci satelitarne do przesyłania zakodowanych danych w postaci spolaryzowanych fotonów. Bezpieczeństwo jest gwarantowane przez zasady mechaniki kwantowej (np. splątanie i interferencję), które uniemożliwiają kopiowanie wysyłanych danych. Ponadto każde zakłócenie lub ingerencja w proces przesyłania danych wywołuje zmiany w stanie kwantowym i pozostawia wykrywalny, mierzalny ślad, co umożliwia wykrycie niepożądanych działań ze strony nieuprawnionych podmiotów. Najbardziej znanym i powszechnie stosowanym zastosowaniem algorytmów kryptografii kwantowej są metody dystrybucji kluczy, znane również jako **kwantowa dystrybucja kluczy**

¹⁰⁰ Tamże.

¹⁰¹ Tamże.

(ang. quantum key distribution – QKD)¹⁰². Głównym zadaniem QKD jest stworzenie współdzielonego pomiędzy dwoma stronami, tajnego klucza chronionego przez zasady mechaniki kwantowej. Najprostsza wersja takiego klucza polega na przesyłaniu kubitów pomiędzy stronami, gdzie pierwsza z nich wysyła dane, a druga dokonuje pomiaru/obserwacji kubitów w celu ich odszyfrowania¹⁰³.

Kryptografia postkwantowa (ang. post-quantum cryptography – PQC) nie opiera się na fundamentalnych prawach mechaniki kwantowej, ale na konstrukcjach matematycznych, które działają na komputerach konwencjonalnych. Jest to dziedzina badań kryptograficznych, której celem jest opracowanie i rozwój zaawansowanych technik i problemów matematycznych dla algorytmów kryptograficznych, które byłyby trudne do złamania zarówno przez komputery konwencjonalne, jak i komputery kwantowe (są to tzw. algorytmy odporne na ataki kwantowe)¹⁰⁴.

Zaawansowanie

Technologie kwantowe postrzegane są jako technologie ważne strategicznie – zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym. Dlatego też powstaje szereg strategii, które mają nadać kierunek i zapewnić warunki do ich dalszego rozwoju¹⁰⁵.

Ministerstwo Cyfryzacji w marcu 2026 zakończyło prace nad zaktualizowaną wersją „Założeń do Polityki Rozwoju Technologii Kwantowych”. W najnowszej wersji dokumentu uwzględniono wyniki konsultacji z przedstawicielami środowiska naukowego, administracji publicznej oraz sektora prywatnego, w ramach których zgłoszono sugestie dotyczące kierunków strategicznych oraz konkretnych mechanizmów wdrażania tej polityki¹⁰⁶.

Również Unia Europejska przygotowała szereg polityk i strategii dotyczących technologii kwantowych w tym zalecenia w sprawie skoordynowanego planu wdrożenia dotyczącego przejścia na kryptografię postkwantową¹⁰⁷.

Choć wybrane rozwiązania z obszaru technologii kwantowych (np. sensoryka kwantowa) są już wykorzystywane komercyjnie, jednakże inne rozwiązania z obszaru tych technologii są wciąż na wczesnych poziomach gotowości technologicznej i znajdują się one na etapie badań lub pilotażowych wdrożeń¹⁰⁸. Choć przewiduje się, że dzięki swojemu potencjałowi do zmiany paradygmatów obliczeniowych, bezpieczeństwa informacji i przetwarzania danych,

¹⁰² <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/outreach/quantum-101/glossary#qkd>

¹⁰³ <https://quantum.psnc.pl/komunikacja-quantowa/>

¹⁰⁴ <https://www.gov.pl/web/instytut-laczynosci/kryptografia-postkwantowa-bez-quantow>

¹⁰⁵ Na przykład: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies>

¹⁰⁶ <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/rozwoj-technologii-quantowych-w-polsce--zaktualizowane-zalozenia-polityki>

¹⁰⁷ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/library/coordinated-implementation-roadmap-transition-post-quantum-cryptography>

¹⁰⁸ <https://www.gov.pl/web/instytut-laczynosci/stad-do-polskiego-komputera-quantowego-infrastruktura-juz-w-niedalekiej-przyszlosci>

technologie kwantowe będą mieć charakter przełomowy, pełne efekty tej technologii pojawią się dopiero w dłuższym horyzoncie czasowym.

Chociaż komputery kwantowe o mocy i niezawodności wystarczającej do złamania klasycznej kryptografii (zwane również komputerami kwantowymi wielkoskalowymi) jeszcze nie istnieją, potencjalne zagrożenie jest uważane za realne. Według przewidywań bezpieczeństwo powszechnie stosowanych metod szyfrowania może zostać poważnie naruszone. Większość ekspertów uważa, że pierwsze naruszenia metod szyfrowania przez komputery kwantowe mogą nastąpić już pod koniec lat 30. XXI wieku¹⁰⁹. Dlatego też uważa się, że aby zachować bezpieczeństwo informacji, systemy bezpieczeństwa powinny jak najszybciej zacząć przygotowywać się do wykorzystania komputerów kwantowych.

Obecnie istnieją dwa główne rodzaje zagrożeń, jakie technologia kwantowa stwarza dla tradycyjnej kryptografii. Po pierwsze, ataki typu „zapisz teraz, odszyfruj później” (ang. store now, decrypt later – SNDL) – znane również jako ataki typu „harvest” – stanowią aktywne zagrożenie, które naraża na niebezpieczeństwo aktualne dane¹¹⁰. Po drugie, pojawienie się w przyszłości komputerów kwantowych na dużą skalę ma zagrozić wszystkim danym zaszyfrowanym tradycyjnymi metodami (np. poprzez złamanie popularnych algorytmów kryptograficznych).

Biorąc pod uwagę, że komputery kwantowe będą mogły złamać obecne systemy kryptograficzne, stwarza to zagrożenie dla wrażliwych danych prywatnych i rządowych. Podczas gdy państwa przygotowują swoje struktury cyfrowe i cyberbezpieczeństwa na pojawienie się komputerów kwantowych, trwa debata na temat najskuteczniejszych technologii zabezpieczania danych. Obecnie dwa najbardziej obiecujące rozwiązania to kryptografia kwantowa oraz kryptografia postkwantowa (PQC).

Uważa się, że prace nad PQC są obecnie bardziej zaawansowane (schematy PQC są obecnie opracowywane i standaryzowane), a rozwiązania tego typu oferują pewne zalety w porównaniu z QKD. Na przykład algorytmy PQC zapewniają szybsze i tańsze wdrożenie niż QKD, ponieważ działają na klasycznym sprzęcie (tj. wykorzystują bity, a nie kubity). Pozwala im to również na kompatybilność z istniejącą infrastrukturą, co zapewnia szybkie wdrożenie (np. wymagające jedynie aktualizacji oprogramowania)¹¹¹.

Kryptografia kwantowa i postkwantowa w Polsce

Protokół kwantowej dystrybucji klucza został zaproponowany w 1991 r. przez profesora Artura Ekerta – polskiego fizyka teoretycznego, który uważany jest za pioniera w obszarze kryptografii kwantowej. Obecnie polskie ośrodki badawcze prowadzą zaawansowane prace nad kwantową dystrybucją kluczy (QKD).

¹⁰⁹ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI\(2024\)766237_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI(2024)766237_EN.pdf)

¹¹⁰ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI\(2024\)766237_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI(2024)766237_EN.pdf)

¹¹¹ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI\(2024\)766237_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI(2024)766237_EN.pdf)

W marcu 2025 roku została zaprezentowana technologia zabezpieczania łączności opracowana w ramach projektu Optokrypt przez Wojskową Akademię Techniczną we współpracy z firmą TELDAT i NASK. Demonstracyjne szyfrowane połączenie wykorzystujące QKD zostało przeprowadzone pomiędzy Ministerstwem Cyfryzacji a WAT. Wykorzystało ono dwa zestawy QKD oraz węzeł zaufany w NASK¹¹².

W ramach projektu PIONIER-Q powstała infrastruktura kwantowej dystrybucji klucza (QKD) oraz sieć komunikacji kwantowej, która wykorzystuje istniejącą infrastrukturę światłowodową sieci PIONIER^{113,114}. Operacyjność sieci została osiągnięta w 2024 r. Według informacji dot. projektu sieć światłowodowa do kwantowej wymiany kluczy w Polsce liczy ponad 1700 km, co czyni ją najdłuższą w Europie i drugą najdłuższą na świecie (dłuższą sieć tego typu posiadają wyłącznie Chiny). Obecnie połączone są nią Warszawa, Gdańsk, Poznań, Wrocław i Kraków. Urządzenia QKD będą przysyłać symetryczne klucze szyfrujące pomiędzy szyfratorami połączonymi dedykowanymi światłowodami. Klucze te będą wysyłane kanałem kwantowym, co będzie stanowić dodatkową warstwę zabezpieczeń. Próby podglądnięcia transmisji kwantowej spowodują uszkodzenia klucza (który stanie się bezużyteczny), a warstwa nadzorująca wyśle powiadomienie o tym zdarzeniu.

W ramach projektu PIONIER-Q-SAT powstaną transgraniczne łącza kwantowe pomiędzy polską Infrastrukturą Komunikacji Kwantowej (QCI) a innymi sieciami QCI w Europie¹¹⁵. Celem projektu jest również zapewnienie połączenia sieci PIONIER-Q z segmentem kosmicznym EuroQCI. W ramach projektu ma powstać mobilna stacja naziemna wykorzystująca QKD, umożliwiająca połączenia z satelitami – obecnie Eagle-1 (pierwszy europejski satelita wykorzystujący QKD), a docelowo z innymi satelitami wykorzystującymi QKD¹¹⁶. Projekt realizowany jest przez konsorcjum kierowane przez NASK, w skład którego wchodzi również Creotech Instruments, Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS), Wojskowa Akademia Techniczna (WAT) i litewski Kauno Technologijos Universitetas (KTU, Uniwersytet Techniczny w Kownie).

W styczniu 2026 r. Urząd Miasta Krakowa rozpoczął użycie technologii kwantowej dystrybucji klucza wdrożonej przez Akademickie Centrum Komputerowe Cyfronet AGH. Specjaliści z ACK Cyfronet AGH zaprojektowali, zbudowali i uruchomili system QKD, który połączył Urząd Miasta Krakowa z Cyfronetem AGH¹¹⁷. Przesyłane klucze szyfrujące wykorzystywane są do zabezpieczania łącza sieciowego o przepustowości 100 Gbps. Pozwala to na bezpieczne przesyłanie danych między instytucjami w celu np. archiwizacji, wymiany baz danych, analizy danych itp.

¹¹² <https://www.nask.pl/aktualnosci/polska-w-czolowce-rozwiazan-technologiei-quantowej-prezentacja-qkd>

¹¹³ <https://pionierq.pionier.net.pl/>

¹¹⁴ <https://www.pcass.pl/projekty/pionier-q/>

¹¹⁵ <https://www.nask.pl/aktualnosci/nask-rozwinie-komunikacje-quantowa-z-europejskimi-satelitami>

¹¹⁶ <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news>

¹¹⁷ <https://www.agh.edu.pl/aktualnosci/detail/agh-uruchamia-quantowa-ochrone-danych-krakow-zyskuje-przewage-w-cyberbezpieczenstwie>

W ramach projektu QKD Network Germany-Poland-Czechia ma powstać bezpieczna infrastruktura kwantowa (QCI) łącząca Polskę, Czechy i Niemcy. Powstająca sieć będzie wykorzystywać QKD w celu zapewnienia bezpiecznej komunikacji. Projekt stanowi część europejskiej strategii EuroQCI¹¹⁸, mającej na celu połączenie krajowych QCI i zbudowanie kwantowo bezpiecznej sieci komunikacji cyfrowej obejmującej swym zasięgiem kontynent europejski¹¹⁹.

Według najnowszego opracowania „Raport o trendach technologicznych – marzec 2026” opublikowanego przez Ministerstwo Cyfryzacji polska sieć QKD została oceniona jako „obiecująca”, natomiast obszar talentów technologicznych został oceniony jako „wyjątkowy”. Raport zdiagnozował również wady polskiego ekosystemu kwantowego, do których należą głównie brak strategii narodowej (która jest w fazie prac) oraz „rażąco niski” poziom inwestycji rządowych w obszar kwantów¹²⁰.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Akty prawne i strategie

1. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/rozwój-technologii-quantowych-w-polsce--zaktualizowane-zalozenia-polityki>
2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>
4. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/library/coordinated-implementation-roadmap-transition-post-quantum-cryptography>

Dodatkowe materiały

1. <https://pionierq.pionier.net.pl/>
2. <https://www.pcss.pl/projekty/pionier-q/>
3. <https://www.pcss.pl/powstaje-nowoczesna-infrastruktura-quantowa-laczaca-niemcy-polske-i-czechy/>
4. <https://www.nask.pl/aktualnosci/nask-rozwinie-komunikacje-quantowa-z-europejskimi-satelitami>
5. <https://naukawpolsce.pl/aktualnosci/news>
6. <https://www.nask.pl/aktualnosci/polska-w-czlowce-rozwiazan-technologii-quantowej-prezentacja-qkd>
7. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/przelom-w-wymianie-strategicznich-danych--pierwsze-polskie-polaczenie-quantowe>
8. <https://www.pcss.pl/euroqci-quantowe-polaczenia-polski-z-europa-juz-wkrotce/>
9. <https://www.agh.edu.pl/aktualnosci/detail/agh-uruchamia-quantowa-ochrone-danych-krakow-zyskuje-przewage-w-cyberbezpieczenstwie>

¹¹⁸ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

¹¹⁹ <https://www.pcss.pl/powstaje-nowoczesna-infrastruktura-quantowa-laczaca-niemcy-polske-i-czechy/>

¹²⁰ <https://www.gov.pl/web/instytut-laczynosci/technologie-przyspieszaja-panstwa-musza-nadazyc>

10. <https://www.gov.pl/web/instytut-lacznosci/kryptografia-postkwantowa-bez-kwantow>
11. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/760413/EPRS_ATA\(2024\)760413_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/760413/EPRS_ATA(2024)760413_EN.pdf)
12. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI\(2024\)766237_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2024/766237/EPRS_BRI(2024)766237_EN.pdf)
13. <https://quantum.psn.pl/komunikacja-kwantowa/>
14. <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/outreach/quantum-101/glossary#qkd>
15. <https://www.gov.pl/web/instytut-lacznosci/stad-do-polskiego-komputera-kwantowego-infrastruktura-juz-w-niedalekiej-przyszlosci>
16. <https://www.gov.pl/web/instytut-lacznosci/technologie-przyspieszaja-panstwa-musza-nadazyc>
17. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/pl/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>

Technologie kwantowe (ang. Quantum technologies)

Opis technologii

Definicja

Technologie kwantowe: jest to zestaw zaawansowanych rozwiązań technologicznych opartych na zasadach fizyki kwantowej, które mają potencjał rewolucjonizowania obliczeń, komunikacji, a także precyzyjnych pomiarów. Zjawiska kwantowe, takie jak splątanie, superpozycja czy tunelowanie, umożliwiają osiągnięcie możliwości technologicznych, które są poza zasięgiem tradycyjnych technologii opartych na klasycznej fizyce.

W kontekście Przemysłu 4.0, technologie kwantowe odgrywają kluczową rolę w rozwijaniu nowych systemów obliczeniowych, takich jak komputery kwantowe, oraz w zabezpieczaniu komunikacji poprzez kwantową kryptografię. Technologia kwantowa znajduje także zastosowanie w precyzyjnych systemach pomiarowych i czujnikach, które pozwalają na osiągnięcie ekstremalnie wysokiej dokładności.

Infrastruktura dla technologii kwantowych: obejmuje wszystkie niezbędne zasoby, urządzenia oraz systemy wspierające rozwój, wdrażanie i działanie technologii kwantowych, takich jak komputery kwantowe, komunikacja kwantowa czy sensory kwantowe. Infrastruktura ta obejmuje centra danych, sieci światłowodowe, laboratoria kriogeniczne oraz systemy do przechowywania i przesyłania informacji kwantowych. Wprowadzenie infrastruktury kwantowej wymaga rozbudowy istniejących zasobów oraz opracowania nowych standardów technologicznych i operacyjnych.

Podstawowe rodzaje

- **Komputery kwantowe:** Urządzenia obliczeniowe wykorzystujące bity kwantowe (kubit), które mogą reprezentować jednocześnie wiele stanów, co umożliwia równoległe przetwarzanie informacji i prowadzenie obliczeń na niespotykaną skalę.
- **Kryptografia kwantowa:** Technologie zabezpieczania informacji opierające się na zasadzie splątania kwantowego i zasadzie niepewności Heisenberga, które uniemożliwiają przechwytywanie danych bez wykrycia przez nadawcę i odbiorcę.
- **Czujniki kwantowe:** Precyzyjne urządzenia pomiarowe wykorzystujące zjawiska kwantowe, takie jak interferencja i superpozycja, które umożliwiają detekcję bardzo słabych sygnałów lub zmian w środowisku z dużą dokładnością.

Główne role

- **Medycyna:** Precyzyjne kwantowe czujniki mogą być używane do obrazowania medycznego na poziomie molekularnym, co pozwala na wczesne wykrywanie chorób, takich jak nowotwory. Technologie kwantowe wykorzystywane są również w badaniach nad lekami i genomice (nauce zajmującej się analizą i mapowaniem genomu organizmów).

- **Telekomunikacja:** Kwantowa kryptografia umożliwia bezpieczną komunikację, odporną na próby przechwycenia danych, co ma kluczowe znaczenie w obronności oraz dla instytucji finansowych.
- **Badania naukowe:** Komputery kwantowe pozwalają na rozwiązywanie problemów, które dotychczas były niemożliwe do przeliczenia na klasycznych superkomputerach, co może przyspieszyć rozwój naukowy w dziedzinach takich jak chemia kwantowa, fizyka materiałów czy symulacje astrofizyczne.
- **Finanse:** aplikacje kwantowe wykorzystywane są w modelowaniu finansowym, optymalizacji portfela, zarządzaniu ryzykiem i wykrywaniu oszustw.

Powiązane technologie

- **Big Data:** Wykorzystanie tzw. algorytmu Grovera do przeszukiwania dużych wolumenów danych. Pozwala on na szybsze znajdowanie konkretnego elementu w nieuporządkowanych bazach danych, a także na szybsze rozwiązywanie trudnych obliczeniowo problemów, jak np. przyporządkowywanie składów pociągów do zaplanowanych połączeń kolejowych.
- **Cyberbezpieczeństwo:** Wykorzystanie kryptografii kwantowej do szyfrowania i przesyłania danych.
- **Sztuczna inteligencja:** Wykorzystanie komputerów kwantowych w uczeniu maszynowym.

Podstawowe elementy

- **Kubit:** Podstawowa jednostka informacji w komputerach kwantowych, która w przeciwieństwie do klasycznych bitów może przyjmować stany 0, 1 oraz superpozycję obu stanów jednocześnie.
- **Splątanie kwantowe:** Zjawisko, w którym dwie cząstki pozostają połączone w taki sposób, że stan jednej natychmiast wpływa na stan drugiej, niezależnie od odległości.
- **Interferencja kwantowa:** Zjawisko wykorzystywane do precyzyjnych pomiarów w technologii kwantowych czujników, gdzie fale kwantowe mogą wzmacniać lub osłabiać wyniki pomiarów.
- **Dekoherencja:** Zjawisko prowadzące do utraty właściwości kwantowych kubitów, co stanowi jedno z głównych wyzwań w konstrukcji komputerów kwantowych.
- **Algorytmy kwantowe:** Specjalne algorytmy, takie jak algorytm Shora czy Grovera, które wykorzystują zjawiska kwantowe do przyspieszenia obliczeń w porównaniu do klasycznych algorytmów.
- **Superpozycja:** Możliwość kubitów do jednoczesnego przebywania w wielu stanach, co zwiększa moc obliczeniową komputerów kwantowych.

Mechanizm działania

- **Superpozycja:** W klasycznych systemach obliczeniowych bit może reprezentować wartość 0 lub 1. W komputerach kwantowych, dzięki zjawisku superpozycji, kubit może znajdować się jednocześnie w stanie 0, 1 lub w dowolnym połączeniu tych dwóch stanów. Oznacza to, że komputery kwantowe mogą przetwarzać ogromne ilości danych równolegle, co czyni je niezwykle wydajnymi w rozwiązywaniu skomplikowanych problemów, takich jak optymalizacja, symulacje molekularne czy analiza danych wielowymiarowych. W praktyce, superpozycja pozwala komputerom kwantowym na jednoczesne wykonywanie wielu obliczeń, co znacznie przyspiesza realizację skomplikowanych zadań.
- **Splątanie kwantowe:** Splątanie kwantowe to zjawisko, w którym dwie cząstki, które są splątane, pozostają nierozzerwalnie związane, niezależnie od odległości między nimi. Zmiana stanu jednej cząstki natychmiast wpływa na stan drugiej, nawet jeśli są one oddalone o setki kilometrów. Zjawisko to jest podstawą kwantowej kryptografii, gdzie splątanie kwantowe jest wykorzystywane do bezpiecznego przesyłania informacji, ponieważ każda próba przechwycenia danych automatycznie zmienia stan splątania, co zostaje natychmiast wykryte. Splątanie umożliwia również tworzenie bardzo wydajnych sieci kwantowych, które mogą przysyłać dane w sposób szybszy i bardziej bezpieczny niż w tradycyjnych sieciach.
- **Tunelowanie kwantowe:** Tunelowanie kwantowe jest zjawiskiem, które pozwala cząstkom kwantowym „tunelować” przez bariery energetyczne, które w świecie klasycznym byłyby nieprzekraczalne. To zjawisko znajduje zastosowanie w różnorodnych urządzeniach, takich jak kwantowe czujniki, które są zdolne do detekcji niezwykle słabych sygnałów lub zmian w środowisku. Tunelowanie jest także używane w zaawansowanych tranzystorach kwantowych, które mogą działać na poziomie atomowym, co umożliwia miniaturyzację urządzeń elektronicznych oraz zwiększenie ich wydajności.
- **Interferencja kwantowa:** W technologii kwantowych czujników, interferencja kwantowa odgrywa kluczową rolę w uzyskiwaniu precyzyjnych wyników. Zjawisko to polega na nakładaniu się fal kwantowych, które mogą wzmacniać lub osłabiać sygnały w zależności od ich fazy. Dzięki temu, kwantowe czujniki są w stanie wykrywać nawet najdrobniejsze zmiany w środowisku, co czyni je niezastąpionymi w aplikacjach takich jak medycyna (np. precyzyjne obrazowanie medyczne), geofizyka (np. detekcja anomalii w polu grawitacyjnym) czy nawet w wojskowych systemach nawigacyjnych. Interferencja kwantowa pozwala na uzyskanie ekstremalnie wysokiej dokładności pomiarów, co jest nieosiągalne dla tradycyjnych technologii.
- **Kwantowe obliczenia równoległe:** W klasycznych komputerach obliczenia są wykonywane sekwencyjnie, jedno po drugim. W komputerach kwantowych, dzięki superpozycji i splątaniu, wiele operacji może być wykonywanych równocześnie.

Dzięki temu, kwantowe algorytmy, takie jak algorytm Shora (do rozkładu liczb na czynniki pierwsze) czy algorytm Grovera (do przeszukiwania nieustrukturyzowanych baz danych), oferują znacznie lepsze wyniki niż ich klasyczne odpowiedniki. To otwiera drogę do rozwiązywania problemów, które wcześniej były uważane za nierozwiązywalne w praktycznym czasie, takich jak modelowanie molekularne w chemii kwantowej, optymalizacja logistyczna czy symulacje systemów finansowych.

- **Kwantowe wzmacnianie sygnału:** W kwantowych czujnikach, zjawiska takie jak superpozycja i splątanie pozwalają na wzmacnianie sygnałów pomiarowych, co zwiększa dokładność detekcji nawet na poziomie atomowym. Kwantowe wzmacnianie sygnału pozwala na wykrywanie minimalnych fluktuacji w polu magnetycznym czy elektrycznym, co może mieć zastosowanie w badaniach biomedycznych, wykrywaniu promieniowania kosmicznego czy w systemach nawigacyjnych.

Przykładowe wykorzystania:

- **Czujniki i metrologia kwantowa:** to technologie wykorzystujące zjawiska kwantowe, takie jak superpozycja, splątanie kwantowe i interferencja, w celu uzyskania niezwykle precyzyjnych pomiarów fizycznych i chemicznych. Zastosowanie kwantowych technologii w metrologii pozwala na osiągnięcie dokładności i czułości, które przewyższają tradycyjne metody pomiarowe. Czujniki kwantowe znajdują zastosowanie w medycynie, telekomunikacji, nawigacji, a także w badaniach naukowych i przemyśle.
- **Sensory kwantowe:** to urządzenia wykorzystujące właściwości mechaniki kwantowej, takie jak superpozycja, splątanie kwantowe i interferencja, w celu uzyskania niezwykle precyzyjnych pomiarów fizycznych, chemicznych lub biologicznych. Sensory te mogą mierzyć zjawiska z dużo większą dokładnością niż tradycyjne technologie, co znajduje zastosowanie w takich dziedzinach jak medycyna, nawigacja, telekomunikacja, nauki przyrodnicze i przemysł. Sensory kwantowe wykorzystują zjawiska kwantowe, takie jak splątanie i superpozycja, do niezwykle precyzyjnych pomiarów. Zmiany w stanach kwantowych czujników, wywołane oddziaływaniem z badanym obiektem, są interpretowane i analizowane, co pozwala na uzyskanie bardzo dokładnych wyników. W przeciwieństwie do tradycyjnych sensorów, które mają ograniczoną dokładność, sensory kwantowe mogą mierzyć zjawiska na poziomie subatomowym, co czyni je wyjątkowo czułymi.
- **Komputery kwantowe:** to zaawansowane urządzenia obliczeniowe, które wykorzystują zasady mechaniki kwantowej do wykonywania obliczeń. W przeciwieństwie do klasycznych komputerów, które przetwarzają informacje za pomocą bitów, komputery kwantowe operują na kubitach, które mogą przyjmować wiele stanów jednocześnie. Dzięki temu komputery kwantowe mają potencjał do rozwiązywania bardzo złożonych problemów, takich jak symulacje molekularne, optymalizacje i problemy związane z kryptografią, które są poza zasięgiem klasycznych

maszyn. Komputery kwantowe działają poprzez manipulację kubitami, które mogą znajdować się w stanie superpozycji, co pozwala im na równoczesne przetwarzanie wielu informacji. Dzięki splątaniu kwantowemu kubity mogą współpracować, co pozwala na bardziej efektywne rozwiązywanie złożonych problemów. W przeciwieństwie do klasycznych komputerów, które wykonują obliczenia liniowo, komputery kwantowe mogą przetwarzać wiele możliwości jednocześnie, co znacznie przyspiesza obliczenia w określonych zadaniach. Komputery kwantowe mają ogromny potencjał do zmiany wielu sektorów gospodarki, zwłaszcza tych, które wymagają zaawansowanych obliczeń, takich jak farmacja, finanse, materiałoznawstwo czy kryptografia. Rozwiązania te mogą znacząco przyspieszyć rozwój nowych leków, materiałów oraz technologii, co otworzy nowe możliwości w innowacjach i rozwoju przemysłu. Komputery kwantowe mogą także wspierać optymalizację procesów w logistyce, energetyce i telekomunikacji, co przyczyni się do zwiększenia efektywności i redukcji kosztów operacyjnych. Technologie wykorzystywane w komputerach kwantowych mają zastosowanie także w rozwoju bardziej precyzyjnych sensorów kwantowych. Natomiast symulatory kwantowe pomagają w testowaniu algorytmów kwantowych i ich wydajności w różnych scenariuszach.

- **Obliczenia kwantowe:** to metoda przetwarzania informacji, która wykorzystuje zasady mechaniki kwantowej, takie jak superpozycja i splątanie, do wykonywania obliczeń. W przeciwieństwie do klasycznych komputerów, które operują na bitach, komputery kwantowe używają kubitów, co pozwala na równoczesne przetwarzanie wielu stanów i rozwiązywanie złożonych problemów z dużo większą wydajnością. Obliczenia kwantowe mają zastosowanie w takich dziedzinach jak kryptografia, modelowanie molekularne, optymalizacja oraz sztuczna inteligencja. Obliczenia kwantowe polegają na manipulacji kubitami, które mogą znajdować się w stanie superpozycji, co pozwala na jednoczesne przetwarzanie wielu rozwiązań danego problemu. Dzięki splątaniu kwantowemu, kubity współpracują, co znacząco przyspiesza wykonywanie złożonych obliczeń. Algorytmy kwantowe, takie jak algorytm Shora, pozwalają na rozwiązywanie problemów, które dla klasycznych komputerów są zbyt trudne lub czasochłonne.
- **Komunikacja kwantowa:** to technologia wykorzystująca zasady mechaniki kwantowej, takie jak splątanie i superpozycja, do przesyłania informacji w sposób, który jest teoretycznie odporny na podsłuch i włamania. Komunikacja kwantowa umożliwia tworzenie bezpiecznych sieci komunikacyjnych, które mogą być kluczowe w sektorze finansowym, wojskowym oraz w ochronie danych. Bezpieczna transmisja danych między komputerami kwantowymi stanie się kluczowym elementem rozwoju zaawansowanych obliczeń kwantowych. Splątanie kwantowe może być również wykorzystywane w zaawansowanych sensorach, które monitorują stan sieci. Komunikacja kwantowa opiera się na zjawisku splątania kwantowego i superpozycji. Informacje są kodowane w stanie kwantowym, na przykład w fotonach, i przesyłane przez sieci światłowodowe. Jeśli jakkolwiek próba podsłuchu zostanie

przeprowadzona, zmiany w stanie kwantowym sygnału zostaną natychmiast wykryte, co uniemożliwi przechwycenie informacji. Głównie zastosowanie tej technologii to kryptografia kwantowa, która oferuje bezpieczną wymianę kluczy szyfrujących.

- **Rozwiązania kryptograficzne i cyberbezpieczeństwa w technologii kwantowej:** obejmują metody ochrony danych i komunikacji, które wykorzystują zasady mechaniki kwantowej do zapewnienia niezawodnego szyfrowania i ochrony przed atakami. Komputery kwantowe mogą stanowić zarówno zagrożenie dla obecnej kryptografii, jak i wspierać rozwój nowych systemów zabezpieczeń. Rozwiązania kryptograficzne i cyberbezpieczeństwa oparte na technologiach kwantowych polegają na wykorzystywaniu splątania i superpozycji kwantowej do bezpiecznej transmisji danych i wymiany kluczy kryptograficznych. Kryptografia kwantowa wykorzystuje fotony jako nośniki informacji, a każda próba przechwycenia danych powoduje zmiany w stanie kwantowym, co jest natychmiast wykrywane. Algorytmy post-quantowe pozwalają na bezpieczne szyfrowanie danych, nawet w erze komputerów kwantowych, które mogą złamać tradycyjne metody kryptograficzne.
- Kryptografia kwantowa, w tym dystrybucja kluczy kwantowych (QKD), zapewnia teoretycznie niezłamaną ochronę przed podsłuchem, co staje się kluczowe w erze komputerów kwantowych, które mogą złamać tradycyjne systemy kryptograficzne. **Dystrybucja kluczy kwantowych (QKD)** umożliwia bezpieczną wymianę kluczy szyfrujących, co stanowi fundament bezpieczeństwa komunikacji. telekomunikacyjnych i finansowych, oferując bezpieczne kanały do przesyłania danych. Zastosowanie tej technologii w bankowości, ochronie zdrowia, administracji publicznej oraz w sektorze obronnym znacząco zwiększy ochronę danych wrażliwych. W miarę rozwoju infrastruktury, komunikacja kwantowa może stać się kluczowym elementem globalnych systemów bezpieczeństwa.
- **Symulatory kwantowe:** to specjalistyczne urządzenia wykorzystujące zasady mechaniki kwantowej, które służą do symulacji złożonych układów kwantowych. W odróżnieniu od uniwersalnych komputerów kwantowych, symulatory kwantowe są zaprojektowane do rozwiązywania specyficznych problemów, takich jak modelowanie materiałów, molekuł czy procesów fizycznych. Symulacje te są szczególnie przydatne w chemii kwantowej, fizyce cząstek, a także w badaniach nad nowymi materiałami. Symulatory kwantowe działają poprzez odwzorowanie zjawisk i interakcji kwantowych, takich jak oddziaływania między cząsteczkami czy atomami, przy użyciu kubitów. W przeciwieństwie do uniwersalnych komputerów kwantowych, symulatory te są zoptymalizowane do określonych zadań i problemów. Korzystają ze zjawisk takich jak superpozycja i splątanie kwantowe, co pozwala na jednoczesne modelowanie różnych stanów układów kwantowych i bardziej efektywne rozwiązywanie złożonych problemów.
- **Inne rozwiązania z zakresu technologii kwantowych:** obejmują różnorodne technologie i aplikacje oparte na zjawiskach mechaniki kwantowej, które nie mieszczą się w bardziej standardowych kategoriach, takich jak komputery kwantowe,

kryptografia czy sensory. Technologie te mogą dotyczyć dziedzin takich jak nowe metody przesyłu danych, kwantowe akceleratory obliczeniowe czy nowe koncepcje związane z fizyką kwantową, które jeszcze nie zostały powszechnie wdrożone, ale mają ogromny potencjał do zastosowania w przemyśle, medycynie, energetyce i nauce. Technologie te wykorzystują zjawiska kwantowe, takie jak splątanie i superpozycja, w nowatorskich rozwiązaniach technicznych. Nowe protokoły komunikacyjne i kwantowe akceleratory obliczeniowe mają na celu zwiększenie szybkości transmisji danych i obliczeń poprzez równoczesne przetwarzanie wielu stanów kwantowych. Eksploracja materiałów kwantowych otwiera drogę do tworzenia bardziej wydajnych technologii, które mogą znaleźć zastosowanie w różnych sektorach gospodarki.

Zaawansowanie

Technologie kwantowe postrzegane są jako technologie ważne strategicznie – zarówno na poziomie krajowym, jak i międzynarodowym. W celu zapewnienia ich rozwoju powstają liczne konsorcja, strategie i programy wspierające działania w tym obszarze. Jednakże większość z technologii tego typu jest wciąż na wczesnych poziomach gotowości technologicznej i znajdują się one na etapie badań lub pilotażowych wdrożeń. Dlatego też, choć przewiduje się, że technologie kwantowe będą mieć charakter przełomowy, co związane jest z ich potencjałem do zmiany paradygmatów obliczeniowych, bezpieczeństwa informacji i przetwarzania danych, pełne efekty tej technologii pojawią się dopiero w dłuższym horyzoncie czasowym.

Według informacji zawartych w analizie „Future-proofing the Quantum Europe Strategy for 2040¹²¹” opracowanej dla Parlamentu Europejskiego, poziom zaawansowania technologii kwantowych jest różny w zależności od obszaru ich wykorzystania. Takie rozwiązania jak sensory kwantowe osiągnęły wysoki poziom dojrzałości, a niektóre ich rodzaje jak np. magnetometry (urządzenia służące do pomiaru pola magnetycznego) są w pełni sprawne i dostępne na rynku.

Inne rodzaje technologii kwantowych m.in. wykrywanie radarowe i nawigacja inercyjna, są nadal w fazie rozwoju. Kwantowa dystrybucja kluczy (QKD), została pomyślnie przetestowana w rzeczywistych warunkach, również w Polsce¹²².

Najslabiej rozwinięte są obecnie obliczenia kwantowe, a uniwersalne komputery kwantowe nadal znajdują się w fazie eksperymentalnej. Związane jest to z takimi wyzwaniami jak m.in. skalowanie procesorów kwantowych i sprzętu komputerowego (hardware), błędy związane z dekoherencją (błędym działaniem) kubitów czy konieczność tworzenia nowych algorytmów i oprogramowania dla obliczeń kwantowych¹²³.

¹²¹ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2025/774696/EPRS_IDA\(2025\)774696_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2025/774696/EPRS_IDA(2025)774696_EN.pdf)

¹²² <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/przelom-w-wymianie-strategicznym-danych--pierwsze-polskie-polaczenie-quantowe>

¹²³ <https://www.ibm.com/think/topics/quantum-computing>

Technologie kwantowe w Polsce¹²⁴

Ministerstwo Cyfryzacji w marcu 2026 zakończyło prace nad zaktualizowaną wersją Założeń do Polityki Rozwoju Technologii Kwantowych. W najnowszej wersji dokumentu uwzględniono wyniki konsultacji z przedstawicielami środowiska naukowego, administracji publicznej oraz sektora prywatnego, w ramach których zgłoszono sugestie dotyczące kierunków strategicznych oraz konkretnych mechanizmów wdrażania polityki.

Jako mocne strony polskiego ekosystemu kwantowego projekt strategii zidentyfikował:

- Wysokie kompetencje teoretyczne w takich dziedzinach jak: matematyka, kryptografia, informatyka, fizyka, silna szkoła algorytmiki.
- Wysokie kompetencje eksperymentalne na poziomie nauk podstawowych w wybranych obszarach.
- Istniejąca infrastruktura kwantowa m.in. sieciowa i obliczeniowa.
- Udział w projektach międzynarodowych (np. QuantERA, EuroQCI, EuroHPC JU, ERC), dający polskim badaczom dostęp do najnowszych wyników badań, doświadczeń, kontaktów międzynarodowych i know-how.
- Realizacja projektów badawczych finansowanych przez programy europejskie (np. Horyzont Europa, Cyfrowa Europa, EURAMET).
- Powstający ekosystem firm i startupów.
- Diaspora naukowo-technologiczna dająca możliwości nawiązywanie kontaktów i współpracy międzynarodowej.

Jako słabe strony polskiego ekosystemu kwantowego projekt strategii zidentyfikował:

- Stale utrzymujący się zbyt niski poziom finansowania edukacji, nauki i wdrożeń – brak stabilnej długoterminowej ścieżki budżetowej pozwalającej na finansowanie działań naukowych, w tym utrzymania kadr i infrastruktury badawczej.
- Brak efektywnych możliwości i ścieżek transferu wyników badań B+R do przemysłu.
- Niedostateczne powiązanie nauki z przemysłem – mało projektów pilotażowych i wdrożeniowych, ograniczony popyt, brak rynku odbiorców, zbyt mało laboratoriów badawczych i technologicznych oraz pilotaży.
- Niedostosowanie systemu edukacji do potrzeb rynku (niedostateczna ilość ścieżek kształcenia w obszarze technologii kwantowych).
- Brak systemowej ścieżki kształcenia dla aktywnych zawodowo profesjonalistów.
- Brak ułatwień migracyjnych dla zagranicznych talentów.
- Brak wystarczających zachęt do kształcenia się w obszarze fizyki, matematyki i technologii kwantowych.
- Brak wystarczających zachęt dla kadry kształcącej w szkołach podstawowych i średnich w zakresie nauk ścisłych (STEM) – szczególnie fizyki.

¹²⁴ Opracowano na podstawie: <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/rozwoj-technologii-quantowych-w-polsce--zaktualizowane-zalozenia-polityki>

- Brak rynku wewnętrznego oraz kapitału inwestycyjnego dedykowanego technologiom kwantowym.
- Brak systemowego mapowania ekosystemu kwantowego w Polsce.
- Zbyt niskie uczestnictwo podmiotów z Polski w międzynarodowych projektach dotyczących technologii kwantowych w stosunku do potencjału.
- Brak formalnie uchwalonej polityki krajowej i dedykowanego finansowania na rozwój technologii kwantowych.
- Brak wystarczającej społecznej świadomości w zakresie możliwości i zagrożeń związanych z technologiami kwantowymi.

Według informacji zawartych w propozycji strategii kwantowej Polska posiada zasoby, które mogą stanowić załóżek krajowego ekosystemu technologii kwantowych, do których zalicza się infrastruktura, kapitał ludzki, zaplecze naukowe i inicjatywy przemysłowe.

W skład polskiego ekosystemu technologii kwantowych wchodzi m.in.:

- [PIONIER-Q](#)
- [Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe](#)
- [CEZAMAT Politechniki Warszawskiej](#)
- [Akademickie Centrum Komputerowe Cyfronet AGH](#)
- [Wrocławskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe](#)
- [Uniwersytet Warszawski](#)
- [Krajowe Centrum Informatyki Kwantowej Uniwersytetu Gdańskiego](#)
- [Uniwersytet Jagielloński](#)
- [Uniwersytet Mikołaja Kopernika \(UMK\) w Toruniu](#)
- [Wojskowa Akademia Techniczna \(WAT\)](#)
- [CFT PAN](#)
- [IF PAN](#)
- [IITiS PAN](#)
- [Politechnika Łódzka](#)
- [Politechnika Poznańska](#)
- [NASK](#)
- [Klaster Q](#)
- [Komitet Technologii Kwantowych przy Krajowej Izbie Gospodarczej](#)
- [Fundacja Quantum AI](#)
- oddolne inicjatywy organizacyjne i społeczne, np. [QPoland](#)

W Polsce działają obecnie dwa superkomputery kwantowe:

[PIAST-Q](#) – jego działalność zainaugurowano w czerwcu 2025 r. w Poznańskim Centrum Superkomputerowo-Sieciowym. Jest to pierwszy w Polsce i Europie komputer kwantowy EuroHPC, będący częścią europejskiej infrastruktury obliczeń kwantowych. Poznański komputer kwantowy wykorzystuje technologię uwięzionych jonów. W tym systemie pola

elektromagnetyczne uwięziły naładowane atomy (jony), które są manipulowane za pomocą precyzyjnych laserów w celu wykonywania operacji kwantowych zapewniających długi czas koherencji. Systemy uwięzionych jonów są znane ze swojej dokładności i są rozwijane do różnych zadań związanych z obliczeniami kwantowymi.

[Odra 5](#) - w maju 2025 r. Politechnika Wrocławska uruchomiła pierwszy w Polsce i Europie Środkowo-Wschodniej komputer kwantowy działający w technologii kubitów nadprzewodzących w ekstremalnie niskich temperaturach. Pięciokubitowa maszyna modelu „IQM Spark” została opracowana i dostarczona przez IQM Quantum Computers, światowego lidera w dziedzinie komputerów i sprzętu kwantowego. Wraz z zakupem i uruchomieniem komputera Politechnika Wrocławska otrzymała dostęp do maszyn wykorzystujących 20 i ponad 50 kubitów, działających w siedzibie firmy IQM w fińskim mieście Alto. Urządzenie zamontowane na PWr waży 1,5 tony, ma 3 metry wysokości i pracuje w temperaturze - 273,14 °C (21,5 mK – milikelwinów).

Polskie podmioty biorą również czynny udział w międzynarodowych projektach w obszarze technologii kwantowych, takich jak:

[EuroQCI](#) – infrastrukturę EuroQCI (European Quantum Communication Infrastructure) zaczęto budować w 2019 roku. EuroQCI buduje bezpieczną infrastrukturę komunikacji kwantowej obejmującą całą UE, w tym jej terytoria zamorskie. Inicjatywa została podzielona na fazy i jest koordynowana z europejskimi programami rozwoju technologii kwantowych. Na początku planowane jest zbudowanie krajowych infrastruktur QCI, a następnie połączenie ich międzynarodowymi łączami naziemnymi lub satelitarnymi. Oficjalnym reprezentantem Polski w inicjatywie EuroQCI jest konsorcjum PIONIER poprzez projekt [PIONIER-Q](#).

[QuantERA](#) – jest to międzynarodowa sieć finansowania, wspierana przez Komisję Europejską. W jej skład wchodzi ponad 40 organizacji finansujących badania naukowe (RFO) z ponad 30 krajów – zarówno w Europie, jak i poza nią. Celem organizacji jest wspieranie badań podstawowych i stosowanych w dziedzinie technologii kwantowych (QT), promowanie współpracy oraz wzmacnianie ekosystemu kwantowego poprzez zapewnienie trwałego finansowania. Ze strony Polski do QuantERA należą NCN oraz NCBR.

[EuroHPC JU](#) – Europejskie Wspólne Przedsięwzięcie na rzecz Obliczeń Wielkiej Skali to podmiot utworzony w 2018 roku z siedzibą w Luksemburgu, którego celem jest pełnienie wiodącej roli w europejskiej dziedzinie superkomputerów. EuroHPC JU umożliwia Unii Europejskiej i krajom uczestniczącym w EuroHPC JU koordynowanie wysiłków i łączenie zasobów, aby uczynić Europę światowym liderem w dziedzinie superkomputerów. Ma to na celu wzmacnianie doskonałości naukowej i siły przemysłowej Europy, wspieranie cyfrowej transformacji gospodarki EU, zapewniając jednocześnie jej suwerenność technologiczną. W Polsce w ramach EuroHPC JU działają m.in. Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe, NCBR, Cyfronet AGH.

Natomiast według oceny zamieszczonej w raporcie „Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji” w Polsce potencjał działań B+R w

obszarze technologii kwantowych został oceniony jako bardzo niski¹²⁵. Ocena ta została podyktowana głównie małą aktywnością publikacyjną oraz nikłą aktywnością patentową.

Bibliografia i dodatkowe informacje

Wybrane akty prawne i strategie

1. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/rozwoj-technologii-quantowych-w-polsce--zaktualizowane-zalozenia-polityki>
2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/european-declaration-quantum-technologies>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/quantum-europe-strategy>
4. <https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-new-plan-for-europe-s-sustainable-prosperity-and-competitiveness/file-quantum-act>

Dodatkowe informacje

1. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/760413/EPRS_ATAG\(2024\)760413_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2024/760413/EPRS_ATAG(2024)760413_EN.pdf)
2. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum>
3. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>
4. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/przelom-w-wymianie-strategicznych-danych--pierwsze-polskie-polaczenie-quantowe>
5. <https://www.gov.pl/web/obrona-narodowa/quantowa-dystrybucja-kluczy-to-przelom-w-bezpieczenstwie-komunikacji-podmiotow-panstwa>
6. <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/otwarcie-pierwszego-europejskiego-komputera-quantowego-w-polsce>
7. <https://pwr.edu.pl/uczelnia/aktualnosci/komputer-quantowy-dla-polskiej-nauki-13751.html>
8. <https://portal.umk.pl/pl/article/unikalne-technologie-quantowe-powstaly-w-umk-w-toruniu>
9. <https://cc.eurohpc.pl/>
10. <https://qt.eu/>
11. <https://www.eurohpc.pl/>
12. <https://sto-trends.com/>
13. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/01/a-quantum-technologies-policy-primer_bdac5544/fd1153c3-en.pdf
14. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2025/774696/EPRS_IDA\(2025\)774696_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2025/774696/EPRS_IDA(2025)774696_EN.pdf)
15. <https://www.ibm.com/think/topics/quantum-computing>

¹²⁵ Poszukiwanie w technologiach wschodzących potencjalnych inteligentnych specjalizacji, PARP, Warszawa, 2026.

Zaawansowane wytwarzanie

Druk 3D i technologie przyrostowe (ang. 3D printing and additive manufacturing)

Opis technologii

Definicja

Druk 3D: znany także jako produkcja addytywna lub przyrostowa, to proces wytwarzania trójwymiarowych obiektów poprzez dodawanie kolejnych warstw materiału na podstawie cyfrowego modelu. W kontekście Przemysłu 4.0, druk 3D umożliwia szybkie prototypowanie, personalizację produktów oraz produkcję skomplikowanych kształtów, które byłyby trudne lub niemożliwe do wykonania tradycyjnymi metodami. Dzięki tej technologii możliwe jest znaczne zmniejszenie ilości odpadów, obniżenie kosztów produkcji i skrócenie czasu realizacji.

Podstawowe rodzaje

- **Stereolitografia (SLA):** technologia wykorzystująca ciekłe żywice fotopolimerowe, które utwardzane są warstwa po warstwie za pomocą lasera UV.
- **Modelowanie osadzania topionego (FDM):** popularna metoda, w której stopiony filament (np. PLA, ABS) jest osadzany warstwa po warstwie na platformie roboczej.
- **Selektywne spiekanie laserowe (SLS):** Technika wykorzystująca laser do spiekania proszku, zwykle polimerowego lub metalowego, w celu utworzenia warstw obiektu.
- **Drukowanie z wykorzystaniem proszków metalicznych (SLM/DMLS):** Proces tworzenia obiektów z metalu poprzez topienie proszków metalowych przy użyciu lasera.

Przykładowe wykorzystania

- **Przemysł motoryzacyjny:** projektowanie części (w tym zamiennych) samochodowych i elementów nadwozia, tworzenie prototypów części i narzędzi wspomagających produkcję, optymalizacja parametrów (np. drukowanie lżejszych, bardziej wytrzymałych komponentów), personalizacja pojazdu, druk komponentów z wykorzystaniem wysokowytrzymałych filamentów i proszków metalicznych, produkcja seryjna elementów.
- **Architektura:** tworzenie modeli budynków oraz krajobrazów do wizualizacji projektów, druk elementów architektonicznych
- **Budownictwo:** druk elementów wsporczych i wykończeniowych, wydruk całych budynków.
- **Medycyna, stomatologia i inżynieria biomedyczna:** modelowanie i wydruk implantów, personalizacja implantów i protez, wydruk urządzeń medycznych o

wysokiej trwałości, modelowanie i druk koron zębów i protez, bioprotezy, wydruk tkanek, produkcja biokompatybilnych materiałów do druku implantów i narzędzi chirurgicznych, tworzenie prototypów implantów oraz narzędzi chirurgicznych, seryjna produkcja komponentów, wykonywanie modeli anatomicznych do planowania operacji, tworzenie implantów o złożonej strukturze wewnętrznej oraz personalizowanych narzędzi chirurgicznych.

- **Rozrywka:** tworzenie animacji oraz efektów specjalnych w filmach i grach wideo.
- **Lotnictwo:** projektowanie części silników lotniczych, części zamiennych, elementów konstrukcyjnych, struktur samolotów, optymalizacja w celu zmniejszenia masy i zwiększenia wytrzymałości komponentów, wykorzystanie żywic oraz stopów metali o właściwościach wysokotemperaturowych do produkcji komponentów, produkcja seryjna części strukturalnych o złożonej geometrii do samolotów i dronów, prototypowanie części, tworzenie złożonych komponentów lotniczych z metali o wysokiej wytrzymałości, wytwarzanie lekkich, wytrzymałych komponentów o skomplikowanej geometrii wewnętrznej.
- **Energetyka:** projektowanie i wytwarzanie elementów pracujących.
- **Moda i design:** projektowanie, wytwarzanie i personalizacja dodatków, akcesoriów, biżuterii, butów, ubrań, dekoracji oraz ozdób.
- **DIY i majsterkowanie:** realizacja projektów typu „zrób to sam” oraz drukowanie narzędzi i części zamiennych.
- **Modelarstwo:** tworzenie modeli architektonicznych oraz miniatur na potrzeby modelarstwa hobbystycznego.
- **Sport:** optymalizacja kształtów i masy sprzętu sportowego w celu poprawy jego wydajności.
- **Elektronika:** druk elementów elektronicznych (np. Printed Circuit Boards – PCB), produkcja niestandardowych obudów oraz elementów elektronicznych o nietypowych kształtach, produkcja przewodzących filamentów oraz żywic do tworzenia ścieżek i komponentów elektronicznych, drukowanie mikrostruktur oraz przewodzących ścieżek do zastosowań w mikroelektronice.
- **Prototypowanie:** tworzenie prototypów przed wdrożeniem produkcji przemysłowej, szybkie testowanie różnych wariantów modelu, prototypowanie urządzeń AGD, zabawek oraz innych produktów codziennego użytku.
- **Odlewnictwo:** wytwarzanie form odlewniczych.
- **Marketing:** tworzenie unikalnych materiałów promocyjnych dostosowanych do konkretnego wydarzenia lub marki.

- **Optoelektronika:** tworzenie mikrostruktur do soczewek oraz elementów optycznych o specjalnych właściwościach.
- **Edukacja:** drukowanie modeli edukacyjnych do celów dydaktycznych i badawczych, wykorzystanie drukarek 3D w szkołach i na uczelniach do nauki projektowania oraz inżynierii.
- **Personalizacja produktów**

Powiązane technologie

- **Automatyzacja:** Drukarki 3D mogą być zintegrowane z liniami produkcyjnymi i automatyzowane, co umożliwia produkcję bez udziału człowieka.
- **Big Data:** Analiza danych z procesów druku 3D umożliwia optymalizację ustawień maszyn, monitorowanie zużycia materiałów oraz poprawę jakości wydruków.
- **Bliźniak cyfrowy:** Cyfrowy model drukowanego obiektu może być używany do symulacji procesu produkcyjnego, co umożliwia testowanie różnych materiałów i geometrii przed przystąpieniem do fizycznego druku.
- **Internet Rzeczy:** Drukarki 3D podłączone do sieci IoT mogą być monitorowane i kontrolowane zdalnie, co zwiększa efektywność produkcji.

Podstawowe elementy

- **Głowica drukująca:** Element odpowiedzialny za nakładanie materiału warstwa po warstwie. W zależności od technologii, głowica może być wyposażona w dyszę do stopionego filamentu (FDM) lub laser do utwardzania żywic (SLA) i proszków metalicznych (SLM/DMLS).
- **Platforma robocza:** Powierzchnia, na której budowany jest obiekt. Platforma może być podgrzewana, aby zapobiec odkształceniom i zapewnić lepszą adhezję pierwszych warstw materiału.
- **System podawania materiału:** Mechanizm, który dostarcza filament, żywicę lub proszek do głowicy drukującej. W drukarkach FDM jest to zazwyczaj system z rolkami, natomiast w drukarkach SLA i SLS materiał jest podawany z pojemnika lub tacy.
- **Oprogramowanie do modelowania i slicing:** Oprogramowanie CAD pozwala na tworzenie cyfrowych modeli 3D, które są następnie przekształcane w plik do druku przez oprogramowanie typu slicer, dzielące model na warstwy i generujące ścieżkę dla głowicy drukującej.
- **System chłodzenia i wentylacji:** Komponenty odpowiedzialne za utrzymanie odpowiedniej temperatury drukarki i materiału, co ma wpływ na jakość druku i zapobiega przegrzaniu elementów.
- **Kalibracja i systemy czujników:** Systemy kalibracji zapewniają precyzyjne pozycjonowanie głowicy i platformy roboczej, a czujniki monitorują temperaturę,

poziom materiału oraz inne parametry, aby zapewnić poprawność procesu drukowania.

Mechanizm działania

- **Tworzenie modelu 3D:** Obiekt jest projektowany za pomocą oprogramowania CAD i przekształcany w model cyfrowy, który następnie zostaje zapisany w formacie STL lub innym kompatybilnym z drukarką 3D.
- **Slicing i generowanie ścieżki:** Model jest dzielony na warstwy przez oprogramowanie slicer, które generuje instrukcje dla drukarki, określając ścieżki, po których ma się poruszać głowica drukująca.
- **Podgrzewanie i przygotowanie materiału:** W zależności od technologii, materiał (filament, żywica, proszek) jest przygotowywany do procesu druku poprzez podgrzanie do odpowiedniej temperatury lub odpowiednie przygotowanie w tacy.
- **Nakładanie materiału:** Drukarka nakłada materiał warstwa po warstwie zgodnie z instrukcjami wygenerowanymi przez oprogramowanie slicer. Każda warstwa jest nanoszona dokładnie na poprzednią, co pozwala na stopniowe tworzenie trójwymiarowego obiektu.
- **Chłodzenie i utwardzanie:** Każda warstwa materiału jest chłodzona lub utwardzana, aby zapobiec deformacjom i zapewnić trwałość struktury. W technologiach takich jak SLA i SLS proces ten odbywa się za pomocą lasera lub źródła UV.
- **Post-processing:** Po zakończeniu druku obiekt może wymagać dodatkowych czynności, takich jak usunięcie podpór, wygładzenie powierzchni, a także malowanie lub inne wykończenie powierzchni.
- **Kontrola jakości:** Obiekt jest sprawdzany pod kątem wymiarów, jakości wykończenia i ewentualnych wad, aby upewnić się, że spełnia wymagania projektowe.

Zaawansowanie

Według raportu Grand View Research wielkość światowego rynku produkcji addytywnej oszacowano na 30,55 mld USD w 2025 r. i przewiduje się, że do 2033 r. osiągnie ona poziom 168,93 mld USD, rosnąc w tempie 23,9% w okresie od 2026 do 2033 r. Wzrost rynku jest napędzany przez szybkie wdrażanie przemysłowego druku 3D, produkcji cyfrowej i technologii Przemysłu 4.0, a także rosnący popyt na produkcję na żądanie, masową personalizację i szybkie prototypowanie w takich sektorach, jak lotnictwo, opieka zdrowotna, motoryzacja i przemysł wojskowy¹²⁶.

Poziom zaawansowania i nasycenia rynku konkretnymi technologiami addytywnymi zależy od przeznaczenia i konkretnego rodzaju stosowanej technologii druku 3D.

¹²⁶ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>

Rozwiązania bardzo wyspecjalizowane, wymagające niestandardowych rozwiązań i materiałów, jak np. drukowanie tkanek w biomedycynie, są obecnie na etapie eksperymentalnym.

Inne rozwiązania (np. druk w metalu lub ceramice) są wykorzystywane w rozwiązaniach przemysłowych – wymagają specjalistycznych materiałów, procesów i wiedzy, co uniemożliwia lub bardzo utrudnia ich wykorzystanie w warunkach domowych.

Natomiast inne rozwiązania druku 3D, takie jak m.in. modelowanie osadzania topionego (FDM) jako materiał wykorzystujące np. różne rodzaje polimerów są powszechnie dostępne do użytku konsumenckiego. Ceny najprostszych modeli drukarek 3D do użytku domowego rozpoczynają się już od ok. 650-700 zł, a bardziej zaawansowane modele można kupić już za ok. 1500-2000 zł. Na rynku dostępnych jest również wiele rodzajów filamentów przeznaczonych do tego rodzaju druku. Drukarki domowego użytku znajdują bardzo różnorodne zastosowania, zarówno praktyczne – np. drukowanie spersonalizowanych systemów przechowywania, jak i hobbystyczne np. drukowanie figurek do gier planszowych.

Druk 3D w Polsce¹²⁷

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój technologii przyrostowych zarówno w skali globalnej, jak i krajowej. W Polsce rynek ten znajduje się w fazie intensywnego wzrostu i stopniowej transformacji z etapu zastosowań prototypowych do pełnoprawnych wdrożeń przemysłowych.

Rzeczony rynek technologii przyrostowych w Polsce należy rozpatrywać w kontekście globalnych trendów, które wyznaczają kierunki jego transformacji. W 2024 roku wartość światowego rynku Additive Manufacturing osiągnęła poziom około 15,9 mld USD, natomiast prognozy wskazują na jego wzrost do ponad 70 mld USD do roku 2030. Średnioroczne tempo wzrostu (CAGR) utrzymuje się na poziomie około 18–20%, co czyni ten sektor jednym z najszybciej rozwijających się obszarów nowoczesnej produkcji.

Tak wysoka dynamika rozwoju wynika przede wszystkim z rosnącego zapotrzebowania na elastyczne systemy produkcyjne, zdolne do realizacji produkcji krótkoseryjnej oraz spersonalizowanej. Istotnym czynnikiem jest również skracanie łańcuchów dostaw oraz dążenie do lokalizacji produkcji, co szczególnie uwidoczniło się po 2020 r. Technologie przyrostowe odpowiadają na te potrzeby, umożliwiając produkcję na żądanie oraz redukcję kosztów logistycznych.

Struktura rynku technologii przyrostowych wskazuje na wyraźną zmianę w sposobie wykorzystania tych technologii. Wyróżnia się trzy główne segmenty: sprzęt, materiały oraz usługi. W ostatnich latach obserwuje się rosnący udział materiałów oraz usług, co świadczy o przejściu rynku z fazy inwestycyjnej do fazy operacyjnej, w której technologie AM są

¹²⁷ Fragment został opracowany na podstawie danych i wyników badań przeprowadzonych na potrzeby pracy doktoranckiej nt. technologii addytywnych w Polsce autorstwa Kingi Skrzek (Departament Wsparcia Przedsiębiorczości PARP).

wykorzystywane w rzeczywistych procesach produkcyjnych. W 2024 r. wartość segmentu materiałów polimerowych osiągnęła około 7,8 mld USD, natomiast materiałów metalowych około 5,58 mld USD. Segment usług przekroczył wartość 7,4 mld USD, co potwierdza rosnące znaczenie modeli biznesowych opartych na świadczeniu usług produkcyjnych.

W warunkach polskich obserwuje się analogiczne tendencje, jednak rynek charakteryzuje się większym udziałem przedsiębiorstw korzystających z usług druku 3D zamiast inwestujących w zaawansowaną infrastrukturę technologiczną. Wynika to przede wszystkim z ograniczeń finansowych oraz kompetencyjnych, które są szczególnie widoczne w sektorze małych i średnich przedsiębiorstw.

Dynamika rozwoju rynku technologii przyrostowych pozostaje wysoka i stabilna. W pierwszym kwartale 2024 r. odnotowano wzrost na poziomie około 8% r/r, natomiast prognozy wskazują na możliwość dalszego intensywnego rozwoju w kolejnych latach. Szczególne przyspieszenie obserwuje się po 2020 r., co jest bezpośrednio związane z globalnymi zmianami gospodarczymi, w tym zakłóceniami w łańcuchach dostaw oraz rosnącym znaczeniem produkcji zdecentralizowanej.

Polski rynek technologii przyrostowych charakteryzuje się specyficzną strukturą przedsiębiorstw, w której dominującą rolę odgrywają mikro, małe i średnie przedsiębiorstwa. Szacuje się, że ponad 85% podmiotów funkcjonujących w tym sektorze stanowią mikrofirmy. Taka struktura wpływa na sposób wdrażania technologii, ograniczając możliwości inwestycyjne oraz poziom zaawansowania technologicznego.

Rozmieszczenie przedsiębiorstw związanych z technologiami przyrostowymi nie jest równomierne i wykazuje koncentrację w regionach o wysokim poziomie rozwoju gospodarczego. Największy udział firm odnotowuje się w województwie mazowieckim oraz wielkopolskim, co wynika z obecności ośrodków naukowo-badawczych, zaplecza technologicznego oraz większego dostępu do kapitału.

Analiza danych rynkowych pozwala na identyfikację kluczowych tendencji rozwojowych. Przede wszystkim obserwuje się przejście technologii przyrostowych z obszaru prototypowania do produkcji funkcjonalnej, co oznacza ich coraz szersze zastosowanie w wytwarzaniu części końcowych. Jednocześnie rośnie znaczenie technologii druku metali, które znajdują zastosowanie w sektorach o wysokich wymaganiach jakościowych, takich jak lotnictwo czy medycyna.

Istotnym wnioskiem wynikającym z analizy jest rosnąca złożoność procesów decyzyjnych związanych z wdrażaniem technologii przyrostowych. Wybór odpowiedniej technologii, materiału oraz parametrów procesu wymaga uwzględnienia wielu kryteriów technicznych i ekonomicznych. Problem ten jest szczególnie widoczny w sektorze MŚP, gdzie ograniczone zasoby kompetencyjne utrudniają podejmowanie racjonalnych decyzji inwestycyjnych.

W związku z powyższym rośnie znaczenie narzędzi wspierających proces decyzyjny, w szczególności systemów doradczych wykorzystujących metody analizy wielokryterialnej oraz sztucznej inteligencji. Systemy te umożliwiają redukcję ryzyka wdrożeniowego, optymalizację

doboru technologii oraz ocenę efektywności ekonomicznej inwestycji, co ma kluczowe znaczenie dla dalszego rozwoju rynku technologii przyrostowych w Polsce.

Polski rynek technologii przyrostowych znajduje się w fazie dynamicznego wzrostu i stopniowej profesjonalizacji. Pomimo istniejących barier, takich jak ograniczenia finansowe, kompetencyjne oraz technologiczne, sektor ten posiada znaczący potencjał rozwoju i odgrywa coraz większą rolę w transformacji przemysłu. W szczególności istotne znaczenie ma rozwój narzędzi wspierających proces wdrażania technologii, które mogą przyczynić się do zwiększenia efektywności i konkurencyjności przedsiębiorstw, zwłaszcza z sektora MŚP.

Bibliografia i dodatkowe informacje

1. https://www.kpt.krakow.pl/app/uploads/2026/02/raport_druk-3d.pdf
2. <https://3d.edu.pl/>
3. <https://pimib.polsl.pl/pliki/imiib/11/Adamczyk.pdf>
4. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/additive-manufacturing-market>

Druk 3D w Polsce – bibliografia

1. ASTM International (2012). *Standard terminology for additive manufacturing technologies (ASTM F2792-12a)*. West Conshohocken, PA.
2. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies (3rd ed.)*. Springer.
3. Wohlers, T. (2024). *Wohlers Report 2024: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. Wohlers Associates.
4. Ngo, T. D., Kashyap, S., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196.
5. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162.
6. Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 215–243.
7. Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587.
8. SmarTech Analysis (2024). *Additive Manufacturing Market Outlook*.
9. Statista (2024). *3D printing market size worldwide*.
10. MarketsandMarkets (2023). *3D Printing Market – Global Forecast to 2030*.
11. McKinsey & Company (2022). *The Future of Manufacturing: Additive Manufacturing*.
12. European Commission (2022). *Additive Manufacturing in Europe: Opportunities and Challenges*.
13. OECD (2021). *The Next Production Revolution: Implications for Governments and Business*.

14. Wohlers, T. (2025). *Wohlers Report 2025: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. Wohlers Associates.
15. Bourell, D. L. et al. (2017). Materials for additive manufacturing. *CIRP Annals*, 66(2), 659–681.
16. Thompson, M. K. et al. (2016). Design for additive manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65(2), 737–760.
17. Wohlers, T. (2019). *Wohlers Report 2019: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*. Wohlers Associates.