

badań nad rolą norm społecznych i dyskryminacji ze względu na płeć w technologicznie zależnych relacjach handlowych. Prof. Klaus Prettnner z Uniwersytetu Ekonomicznego w Wiedniu opisał, w jaki sposób zapotrzebowanie na pracę w zawodach wysoce zautomatyzowanych zmienia się wraz z ryzykiem rozprzestrzeniania chorób zakaźnych – odnosząc badania do pandemii COVID-19. Prof. Francesco Venturini z Uniwersytetu w Urbino (Włochy) opisał regionalne skutki innowacji typu AI, a prof. Jakub Growiec ze Szkoły Głównej Handlowej przedstawił nowe spojrzenie na modelowanie wzrostu gospodarczego.

Konferencja była okazją do nawiązania nowych relacji z partnerami zagranicznymi oraz do zacieśnienia już istniejących kontaktów naukowych. Prof. Holger Görg jest liderem konsorcjum w projekcie Horyzont Europa Rethink GSC, w którym uczestniczy zespół z Wydziału Zarządzania i Ekonomii Politechniki Gdańskiej, kierowany przez piszącą te słowa (członkowie zespołu: dr hab. Joanna Wolszczak-Derlacz, prof. PG, dr inż. Sabina Szymczak, mgr Piotr Płatkowski). Jak mówiłam podczas spotkania:

*– Cieszę się, że lider dużego i silnego konsorcjum, w którym bierze udział 11 ośrodków naukowych z Europy (w tym nasza uczelnia) mógł na miejscu przekonać się o naszym potencjale badawczym i organizacyjnym. To ważny element wzmacniania wizerunku Politechniki Gdańskiej w światowej nauce.*

W czasie konferencji TIG 2024 podsumowano także wyniki projektu OPUS NCN („Specjalizacja technologiczna a dywergencja produktywności w erze digitalizacji, automatyzacji i sztucznej inteligencji”, [https://zie.pg.edu.pl/tech\\_spec](https://zie.pg.edu.pl/tech_spec)) realizowanego przeze mnie (kierowniczką projektu), dr Aleksandrę Kordalską i mgr Zuzannę H. Zarach. Wymiernymi efektami projektu jest już siedem publikacji w renomowanych czasopismach ekonomicznych (m.in. „Technovation”, „Technological Forecasting and Social Change”, „The World Economy”, „Economic Modelling”), a kolejne są w recenzji.

Konferencja TIG 2024 była objęta patronatem honorowym JM Rektora PG prof. Krzysztofa Wildego, patronatem dziekan Wydziału Zarządzania i Ekonomii dr hab. Małgorzaty Gawryckiej, prof. PG, Związku Uczelni Fahrenheita oraz Polskiego Towarzystwa Ekonomicznego. Konferencja była jednym z wydarzeń w ramach obchodów jubileuszu 120 lat Politechniki Gdańskiej.

■ [apa@zie.pg.gda.pl](mailto:apa@zie.pg.gda.pl)

*Józef Woźniak, Krzysztof Gierłowski, Michał Hoefft, Wojciech Gumiński, Krzysztof Nowicki, Jacek Rak, Jarosław Sadowski, Piotr Rajchowski, Sławomir Gajewski*

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

## Politechnika Gdańska z prywatną siecią 5G i zespołem specjalizowanych laboratoriów badawczych

### Część I: Ogólna charakterystyka projektu PL-5G oraz specyfika sieci piątej generacji

W dniu 5 marca 2024 na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki miało miejsce uroczyste otwarcie Laboratorium PL-5G na Politechnice Gdańskiej.

**P**odczas tej uroczystości, z udziałem władz uczelni oraz WETI, JM Rektor Politechniki Gdańskiej prof. Krzysztof Wilde, członek korespondent PAN, przecinając symboliczną wstęgę, powiedział:

*– Z radością i entuzjazmem otwieram nowe laboratorium na uczelni. Powstało bowiem miejsce bardzo ważne, gdzie mamy dostęp do najnowocześniejszych metod testowania komunikacji z wykorzystaniem bardzo wysokich częstotliwości. To przyszłość dla informatyki i cyfryzacji.*

Wydarzenie to jest również powodem do satysfakcji nie tylko dla zespołu wykonawców tego laboratorium, współrealizatorów projektu PL-5G, ale także dla całego Konsorcjum PL-5G, reprezentowanego podczas otwarcia przez prof. Andrzeja Bębna, kierownika projektu (w jego końcowej fazie), przedstawiciela lidera Konsorcjum – Politechniki Warszawskiej.

Uruchomienie laboratorium sieci 5G Politechniki Gdańskiej jest efektem trzyletnich prac prowadzonych od stycznia 2021 roku w ramach



Fot. 1. Uroczyste przecięcie wstęgi do nowego laboratorium. Na zdjęciu prof. Krzysztof Wilde, rektor PG, prof. Józef Woźniak, kierownik projektu PL-5G na PG, Mariusz Miler, kanclerz PG, Mariusz Miszewski, dyrektor administracyjny WETI PG

Fot. Krzysztof Krzempek

projektu PL-5G: „Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem”. Intensywne prace projektowe oraz wdrożeniowe realizowane były przez konsorcjum sześciu jednostek naukowo-badawczych, w skład którego wchodziła Politechnika Gdańska. Projekt PL-5G, z racji swoich unikatowych założeń, został na początku 2020 roku wpisany oficjalnie na tzw. Polską Mapę Infrastruktury Badawczej. Uczestnikami konsorcjum poza naszą uczelnią są: Politechnika Warszawska (lider projektu), Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Politechnika Wrocławska oraz Instytut Chemii Bioorganicznej PAN – Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe (PCSS) (por. rys. 1).

Inicjatorem i kierownikiem projektu był prof. Wojciech Burakowski z Wydziału Elektroniki i Tech-

nik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Nagła śmierć Profesora, 6 stycznia br., była dla nas wszystkich wielkim wstrząsem i ogromnym dramatem. Przez lata był On pomysłodawcą i liderem szeregu innych wspólnych projektów.

Unikatowość naszego przedsięwzięcia, bez wątplenia nawet w skali światowej, wynika ze stworzenia badawczej sieci międzyregionalnej na rzadko spotykaną skalę (sieć łączy główne ośrodki akademickie w Polsce) oraz z ogromnej różnorodności specjalizowanych instalacji lokalnych, z wręcz tysiącami urządzeń do badań nad sieciami i usługami związanymi zarówno z technologią 5G, jak i podwalinami 6G. Połączenie wspomnianych ośrodków siecią operacyjną (której łączy światłowodowe udostępnia PCSS i akademicka sieć PIONIER) wspieraną przez Centra Danych w każdej lokalizacji zapewni bez mała pełny dostęp do praktycznie wszystkich zasobów, także tych lokalnych, u poszczególnych konsorcjantów. Dodajmy też, że w naszej, gdańskiej lokalizacji Data Center ulokowane zostało w serwerowni budynku WETI B.

Funkcjonowanie tego typu sieci radiowej wymaga oczywiście pozwoleń na użytkowanie licencjonowanych pasm częstotliwości. Politechnika Gdańska oraz pozostali konsorcjanci PL-5G uzyskali od Urzędu Komunikacji Elektronicznej pozwolenia radiowe na użytkowanie kilku pasm częstotliwości w lokalnej i międzyregionalnej sieci 5G na cały 5-letni okres trwania projektu (tj. do końca 2028 roku). Dodatkowo Politechnika Gdańska pozyskała także na okres roku pozwolenia testowe.

Po stronie Politechniki Gdańskiej w realizację projektu zaangażowane były zespoły z dwóch katedr WETI – Katedry Teleinformatyki oraz Katedry Systemów i Sieci Radiokomunikacyjnych.

Całkowity koszt projektu opiewa na kwotę ok. 225 mln zł, w tym koszty kwalifikowane w wysokości ok. 196 mln zł. Dofinansowanie projektu sięga natomiast prawie 167 mln zł. W przypadku PG pozyskane dofinansowanie przekroczyło 22,5 mln zł.

Politechnika Gdańska zrealizowała blisko 60 postępowań przetargowych niezbędnych do zakupu zaplanowanej w projekcie aparatury badawczej na kwotę ponad 18 mln zł, a zestawienie poniesionych wydatków zawiera setki (a z drobiazgami nawet tysiące) pozycji!

Sześć dużych postępowań przeprowadzonych zostało wspólnie – w ramach całego konsorcjum, co wymagało pełnej współpracy z władzami poszczególnych jednostek i ich działami

Rys. 1. Tablica informacyjna projektu PL-5G



#### PL-5G: Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem

**Cel projektu:** Zbudowanie unikalnej w skali kraju infrastruktury badawczej dla praktycznych badań dotyczących nowych technik i rozwiązań w obszarze sieci i usług nowej generacji 5G.

**Lider konsorcjum**

**Beneficjent:** Politechnika Warszawska

**Partnerzy:** Politechnika Gdańska • Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie • Instytut Chemii Bioorganicznej PAN • Poznańskie Centrum Superkomputerowo-Sieciowe • Instytut Łączności-Państwowy Instytut Badawczy • Politechnika Wrocławska

[www.mapadotacji.gov.pl](http://www.mapadotacji.gov.pl)

prawnymi. Trzy takie postępowania przeprowadził PCSŚ w Poznaniu: dotyczące wyposażenia centrum danych, rdzenia badawczego sieci 5G z dostępem do kodu źródłowego oraz przełączników sieci operacyjnej. Dwa zrealizowała nasza uczelnia (prywatne systemy 5G z usługami głosowymi/wideo oraz system Open-RAN), a jedno AGH w Krakowie – dotyczące wdrożenia sieci międzyregionalnej.

Prace nad projektem zapoczątkowano na przełomie lat 2017 i 2018, a pierwszym istotnym krokiem na drodze do pozyskania finansowania był wspólny wniosek jednostek o wpisanie planowanej infrastruktury na tzw. „Mapę Drogową”, czyli Polską Mapę Infrastruktury Badawczej. Wniosek został złożony w czerwcu 2018 roku. Poprzedziło to podpisanie wspólnej umowy Konsorcjum zawartej w Warszawie w dniu 8 czerwca 2018 roku, a przygotowanie wstępnej wersji wniosku zajęło konsorcjantom pierwsze półrocze 2018 roku.

Podkreśliśmy też mocno, że prace nad projektem „Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem” miały, zarówno w tamtym okresie, jak i później, życzliwe wsparcie JM Rektora prof. Krzysztofa Wildego oraz dziekanów WETI dwóch kolejnych kadencji – prof. Jerzego Wtorka i prof. Jacka Stefańskiego.

W czerwcu 2019 roku Politechnika Gdańska oraz pozostali konsorcjanci upoważnili Politechnikę Warszawską, lidera Konsorcjum, w oparciu o umowę Konsorcjum podpisaną w 2018 roku oraz w związku z Komunikatem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) z dnia 4 czerwca 2019 roku, do złożenia podania do MNiSW o wpisanie infrastruktury badawczej „Krajowe laboratorium sieci i usług 5G wraz z otoczeniem” na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej – na podstawie informacji zawartych w Komunikacie MNiSW z dnia 12 kwietnia 2018 roku o otwartym naborze wniosków.

Na konkurs ogłoszony w czerwcu 2019 roku do MNiSW wpłynęło 146 wniosków o wpisanie proponowanej infrastruktury badawczej na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej. Każdy z nich został poddany ocenie merytorycznej przez Zespół doradczy do spraw Polskiej Mapy Infrastruktury Badawczej oraz dwóch ekspertów zewnętrznych – krajowego i zagranicznego.

Zespół doradczy przedłożył Ministrowi Nauki i Szkolnictwa Wyższego rekomendacje w sprawie wpisania 65 najwyższej ocenionych przedsięwzięć na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej. Minister, przychyliając się do rekomendacji

Zespołu, podjął jednocześnie decyzję o umieszczeniu na Mapie pięciu dodatkowych projektów, w odniesieniu do których istnieją międzynarodowe zobowiązania Rządu Rzeczypospolitej Polskiej.

Opublikowana w styczniu 2020 roku Polska Mapa Infrastruktury Badawczej zawierała więc 70 przedsięwzięć podzielonych, wzorem klasyfikacji stosowanej przez Europejskie Forum Strategii ds. Infrastruktur Badawczych, na sześć obszarów badań, tj.: nauki techniczne i energetyka (14 projektów); nauki o Ziemi i środowisku (5); nauki biologiczno-medyczne i rolnicze (16); nauki fizyczne i inżynierskie (23); nauki społeczne i humanistyczne (6) oraz cyfrowe infrastruktury badawcze (6).

W następstwie oficjalnego wpisania projektu na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej wniosek o dofinansowanie projektu został złożony przez Konsorcjum, wraz z pozostałymi dokumentami, 15 lipca 2020 roku w ramach Konkursu 4/4.2/2020, Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014–2020, Działania 4.2: Rozwój nowoczesnej infrastruktury badawczej sektora nauki.

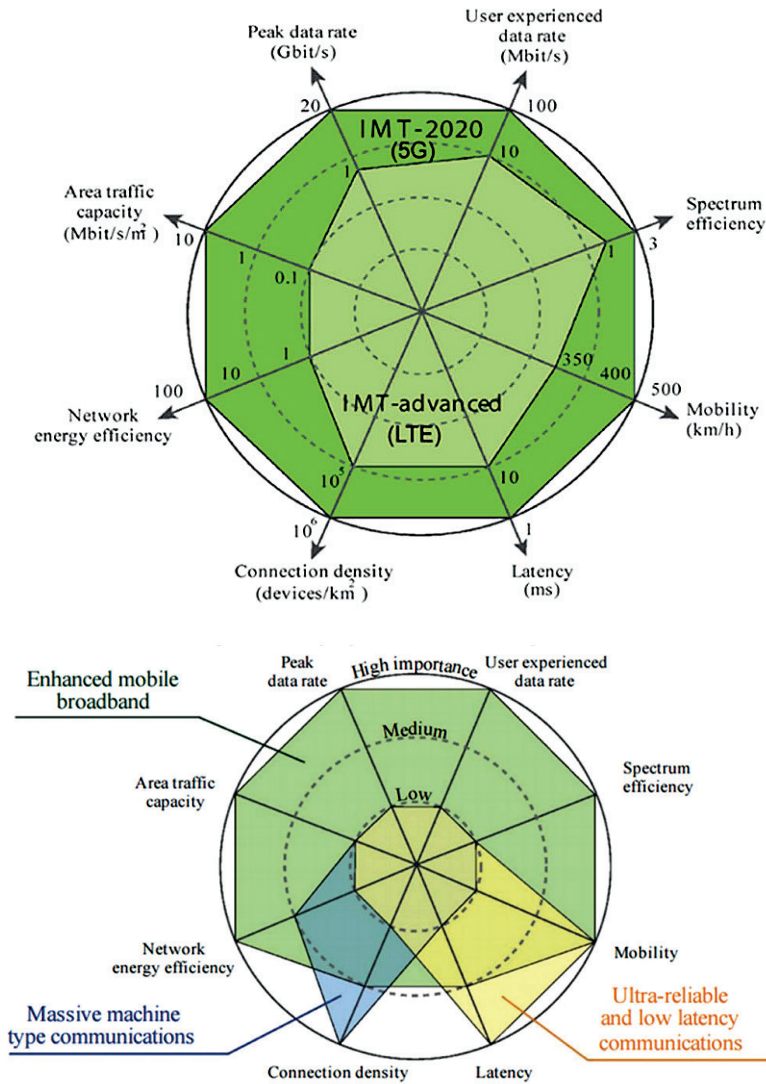
Wśród 8 projektów wybranych do dofinansowania, złożonych w ramach wspomnianego Programu Operacyjnego, propozycja PL-5G znalazła się na wysokiej czwartej pozycji.

Na przełomie października i listopada 2020 roku odbyły się panele z Komisją Konkursową. Projekt zyskał wysoką ocenę Komisji i akceptację finansową Ośrodka Przetwarzania Informacji – PIB – dysponenta środków, desygnowanego przez Ministerstwo do obsługi projektów z Polskiej Mapy Infrastruktury Badawczej.

Finalnie umowa na dofinansowanie i realizację projektu została podpisana 29 grudnia 2020 roku.

### **Czym jest i co oferuje technologia piątej generacji, czyli 5G?**

Mamy już za sobą kilkadziesiąt lat doświadczeń związanych z użytkowaniem sieci telefonii komórkowej, które począwszy od drugiej generacji (2G) zapamiętanej jako GSM (*Global System for Mobile Communications*, pierwotnie fr. *Groupe Spécial Mobile*) są sieciami w pełni cyfrowymi. Z kolei od trzeciej generacji (3G) począwszy, czyli sieci UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) wspierają one technikę IP (*Internet Protocol*), czyli dominującą w światowym Internecie komunikację datagramową. Wraz z tą generacją telefonia komórko-



Rys. 2. Porównanie kluczowych wskaźników efektywności systemu 5G w odniesieniu do systemu LTE (a) oraz pomiędzy usługami zdefiniowanymi w ramach systemu 5G (b)  
 Źródło: ITU-R M.2083-0, IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. 2015

wa zanurzyła się na dobre w Internecie, ale i Internet nie może żyć dalej bez telefonii komórkowej (wykorzystując oferowaną przez telefonię komórkową mobilność w dostępie do usług). Zmiany związane z 4G (czyli LTE – *Long Term Evolution*) stanowiły kontynuację powyższego trendu, całkowicie likwidując tryb komutacji kanałów i realizując wszystkie usługi w trybie komutacji pakietów. W połączeniu z nową architekturą, powiększonym zestawem usług oraz szybkościami przekazu rzędu nawet 1 Gb/s (w przypadku wersji LTE-Advanced) uczyniło to sieć LTE rozwiązaniem dobrze dostosowanym do aktualnych potrzeb użytkowników.

### Czym jednak, o ile w ogóle, może nas jeszcze zaskoczyć 5G?

Pierwsze skojarzenie, które nasuwa się użytkownikowi w sposób oczywisty, to wie-

lokrotna poprawa parametrów funkcjonowania sieci. Patrząc na podstawowe wskaźniki oferowane przez 5G, wystarczy powiedzieć, że to 10–20-krotnie większa szybkość przekazu (por. rys. 2) w stosunku do 4G (ten obszar w 5G określamy zwykle jako *Enhanced Mobile Broadband*), radykalne skrócenie czasu reakcji sieci, nawet do pojedynczych milisekund (oczywiście nie zawsze i nie wszędzie), setki razy większa pojemność systemu, szczególnie w przypadku komunikacji między sensorami czy różnymi elementami wykonawczymi Internetu Rzeczy (*Massive Machine-Type Communications*) i zdecydowanie wyższa niezawodność oraz jakość obsługi naszych żądań (*Ultra Reliable and Low Latency Communications*). Powyższe scenariusze wykorzystania systemów 5G, czyli eMBB, mMTC czy URLLC, bazują na w pełni programowej koncepcji funkcjonowania sieci i udostępniania usług, a nie jak dotąd postrzeganej bardzo sprzętowo.

Technika 5G, jak żadna z wcześniejszych generacji sieci telefonii komórkowej, otwiera się na możliwość tworzenia prywatnych sieci 5G. Dotyczyć to może w szczególności środowisk przemysłowych (Przemysł 4.0/Industry 4.0) wymagających wysokiej niezawodności i niewielkich opóźnień w reakcji na realizowane procesy technologiczne. Przykładem sieci prywatnej jest także sieć PL-5G.

Z 5G wiąże się jednak bardzo skomplikowana infrastruktura nadawczo-odbiorcza oraz informatyczno-programistyczna, ponadto jak wspomniano, pełną programową realizacją usług i funkcjonalności systemowych. Mówimy bowiem w przypadku 5G o tzw. *Service Based Architecture*, oferującej pełną wirtualizację zasobów, czyli możliwość logicznego podziału i wydzielania zasobów zgodnie z potrzebami, nawet pojedynczych użytkowników (tzw. *Network Slicing*), a także wszystko, co jest potrzebne do optymalnego funkcjonowania sieci.

Z tymi, zdecydowanie już technicznymi spojrzeniami na 5G wiąże się oczywiście bardzo szeroka współpraca naukowców, producentów, organizacji standaryzacyjnych i rządów, w tym ich regulatorów (jak w naszym przypadku UKE). Dodajmy, że wiele powiązań się zaciebia, gdyż w prace różnych organizacji standaryzacyjnych zaangażowane są gigantyczne korporacje. Wdrażanie sieci 5G to z kolei domena operatorów sieci komórkowych, lokalnych i globalnych, co wymaga współpracy i zawierania przez nich wieloletnich umów z regulatorami. Dorzucmy

do tego także wsparcie ze strony nie mniej ważnych producentów urządzeń końcowych, czyli wytwórców modemów, routerów i telefonów 5G.

Ciekawostką związaną z 5G jest wykorzystanie w tej sieci do różnych zadań trzech zakresów pasm: pierwszego z nich związanego z częstotliwościami poniżej 1 GHz (np. 700 MHz), drugiego i jednocześnie podstawowego z przedziałem częstotliwości poniżej 6 GHz oraz pasma wyższego (mikrofalowego), o częstotliwościach 26–28 GHz. Różne właściwości propagacji fal radiowych w różnych zakresach częstotliwości powodują, że zakresy te są, w sieciach komórkowych, używane do obsługi abonentów w odmiennych środowiskach. Niższe częstotliwości, poniżej 6 GHz, są powszechnie stosowane w warunkach zewnątrzbudynkowych, przy czym im niższa częstotliwość, tym większe są możliwości do uzyskania zasięgi komunikacji. Z kolei pasmo mikrofalowe, choć pozwala na osiągnięcie znacznie większych przepływności transmisji danych, cechuje się ograniczonymi zasięgami i bywa stosowane do zapewnienia dostępu na małych obszarach, w tym w środowiskach wewnątrzbudynkowych.

Ponieważ, jak już wspomniano, w przypadku systemów 5G przekazy danych na najwyższych częstotliwościach (26–28 GHz) będą realizowane w tzw. piko- i mikrokomórkach, czyli na niewielkie odległości oraz z ograniczonymi mocami, przetwarzanie takich danych będzie często miało miejsce bliżej urządzeń końcowych. Taki scenariusz, minimalizujący opóźnienia, będzie zwykle związany z przetwarzaniem brzegowym (czyli *Edge Computing*). W znacznej mierze będą to przeróżne implementacje aplikacji rozszerzonej (*Augmented Reality*) i wirtualnej rzeczywistości (*Virtual Reality*) wykorzystywanych jako wsparcie dla medycyny, procesów technologicznych, a także pracy służb mundurowych czy obronności państwa.

Technologia 5G to nie tylko duże sieci operatorskie, ale także sieci kampusowe, czyli prywatne, niedostępne dla osób z zewnątrz (i taka będzie i nasza sieć). Rozwiązania takie są (i będą) wdrażane przez uczelnie czy też duże firmy, np. na terenach kompleksów fabrycznych, portowych czy kopalnianych, do usprawnienia procesów produkcji i logistycznych, nadzoru kamer przemysłowych i obsługi dronów. Taki charakter ma też uruchamianie Krajowe laboratorium PL-5G.

## Projekt PL-5G

Zgodnie z wnioskiem projektowym oraz założeniami zawartymi w Studium Wykonalności i Agendzie Badawczej dla PL-5G celem projektu było zaprojektowanie i budowa infrastruktury badawczej zgodnej z architekturą sieci 5G SA (*Standalone*).

Infrastruktura wdrożona w ramach projektu PL-5G została podzielona na trzy powiązane ze sobą grupy: Laboratorium sieci 5G, Laboratorium symulatorów i aparatury pomiarowej 5G i Laboratorium otoczenia 5G, które zostaną szerzej opisane w drugiej części niniejszego artykułu.

Znaczenie projektu PL-5G dla dynamicznego rozwoju technologii jest bardzo istotne. Operatorzy coraz powszechniej wdrażają rozwiązania 5G w krajowych sieciach operatorskich, co w niedalekiej przyszłości umożliwi rozwój nowoczesnych i niedostępnych dotąd usług. Chociaż w większości przypadków uruchamiane obecnie przez dużych operatorów publicznych rozwiązania 5G to systemy 5G NSA (*Non-Standalone* – wykorzystujące do celów sygnalizacji systemy LTE 4G), to należy oczekiwać, iż większość nowo uruchamianych systemów prywatnych wykorzystywać będzie niezależną od LTE architekturę 5G SA (*Standalone*).

Przewiduje się dynamiczny wzrost liczby wspomnianych powyżej prywatnych sieci 5G, które będą w kolejnych latach budowane przez firmy oraz jednostki samorządowe.

Tym samym laboratorium 5G Politechniki Gdańskiej pozwoli z wyprzedzeniem przeprowadzać szereg testów, badań i analiz istotnych zarówno z punktu widzenia operatora, jak i użytkownika końcowego – związanych z parametrami sieci 5G, w tym z warunkami propagacyjnymi, opóźnieniami w dostarczaniu i przetwarzaniu danych, szybkościami transferu danych, ale także możliwością wykorzystania algorytmów sztucznej inteligencji czy współpracy interoperacyjnej między różnymi typami sieci czy odmiennymi instalacjami rdzeniowymi sieci 5G.

Szczegółowe założenia projektu PL-5G oraz możliwości badawcze oferowane przez zaprojektowaną i zrealizowaną przez zespół wykonawców z WETI infrastrukturę sieciową zaprezentowane zostaną w drugiej części artykułu, w kolejnym wydaniu „Pisma PG”.