

Zakład Kompatybilności
Elektromagnetycznej
ul. Swojczycka 38
51-501 Wrocław
tel.: [+48 71] 36 99 803
fax: [+48 71] 37 28 878
e-mail:wroclaw@il-pib.pl
www.il-pib.pl



ul.Szachowa 1
04-894 Warszawa
tel.: [+48 22] 512 81 00
fax: [+48 22] 512 86 25
e-mail: info@il-pib.pl
www.il-pib.pl

Bezprzewodowe przyłącza telekomunikacyjne

Raport nr Z21/21.10.10.111.5/052/2025



Projekt finansowany ze środków Ministerstwa Cyfryzacji



Nr pracy : 21.10.10.111.5

Nazwa pracy : Bezprzewodowe przyłącza telekomunikacyjne

Zleceniodawca : Ministerstwo Cyfryzacji, Departament
Telekomunikacji

Data rozpoczęcia : Marzec 2025

Data zakończenia : Grudzień 2025

Wykonawcy pracy : Zespół Z-21

Data : 31.12.2025 r.

Miejscowość : Wrocław

Praca wykonana w Pracowni Gospodarki i Inżynierii Widma
Zakładu Kompatybilności Elektromagnetycznej
Instytutu Łączności – PIB we Wrocławiu.

Spis treści

1. Wstęp	4
2. Lokalizacje testowe	5
3. Zasada działania urządzenia pomiarowego Whitebox 8+	12
4. Analizowane wskaźniki	14
4.1. Wstęp i definicje pojęć	14
4.2. Przegląd KPI	16
5. Ocena jakości transmisji	22
5.1. QoS (Quality of Service)	23
5.2. QoE (Quality of Experience)	24
5.3. Przyjęte progi	24
6. Przebieg pomiarów	28
7. Wyniki pomiarów	29
7.1. Gry online	29
7.2. DNS	33
7.3. Pomiar przepływności w łączy	38
7.4. Netflix	44
7.5. ICMP Ping	49
7.6. Protokół UDP	53
7.7. Media społecznościowe	59
7.8. VoIP UDP jitter	63
7.9. Wideokonferencja	69
8. Koszt wdrożenia	73
9. Podsumowanie	74

1. Wstęp

Niniejsze opracowanie przygotowano zostało przez Zakład Kompatybilności Elektromagnetycznej Instytutu Łączności – Państwowego Instytutu Badawczego w ramach umowy dotacji celowej 1/DT/2025, zawartej pomiędzy Instytutem Łączności – Państwowym Instytutem Badawczym, a Ministerstwem Cyfryzacji.

Zapewnienie szerokopasmowego dostępu do Internetu na obszarach tzw. białych plam pozostaje jednym z kluczowych wyzwań związanych z rozwojem infrastruktury telekomunikacyjnej w Polsce. Mimo znaczących postępów w rozbudowie sieci światłowodowych, wskazanych m.in. w raporcie Instytutu Łączności – PIB pt. „Polska w zasięgu stacjonarnego dostępu do Internetu”¹, nadal istnieją istotne luki w zasięgu Internetu szerokopasmowego. Zgodnie z tym opracowaniem, spośród ponad 9 mln punktów adresowych w Polsce, w zasięgu sieci szerokopasmowej znalazło się 83%, a około 67% miało dostęp do przepływności na poziomie 1 Gb/s. Dane te pokazują, że mimo intensywnej rozbudowy infrastruktury światłowodowej, wciąż pozostaje znaczna liczba lokalizacji, w których realizacja przyłącza przewodowego jest utrudniona, kosztowo nieefektywna lub wręcz niemożliwa. Bariery te wynikają m.in. z rozproszonej własności gruntów, problemów proceduralnych, niechęci właścicieli do udostępnienia terenu, czy też ograniczeń związanych z zbyt dużą zabudową oraz infrastrukturą drogową.

W 2024 roku przeprowadzono analizę dostępnych na rynku rozwiązań bezprzewodowych pracujących w pasmach nielicencjonowanych, które mogą stanowić alternatywę dla przyłączy światłowodowych w takich lokalizacjach. Przedstawiono uwarunkowania regulacyjne, dostępne urządzenia w pasmach nielicencjonowanych oraz wstępne modele propagacyjne określające potencjał przyłączy radiowych w zakresie 5 GHz i 60 GHz. Wskazano, że techniki te, mimo ograniczeń wynikających z charakterystyki propagacji fal radiowych, mogą zapewnić parametry transmisji zbliżone do medium światłowodowego, szczególnie przy zastosowaniu kierunkowych anten o wysokim zysku energetycznym i szerokich kanałach transmisyjnych.

Niniejsza praca jest praktyczną weryfikacją analizy teoretycznej wykonanej w roku 2024. Jej celem jest realizacja wdrożeń testowych w co najmniej 10 wytypowanych lokalizacjach oraz prowadzenie długoterminowych pomiarów jakości transmisji przez okres sześciu miesięcy. Do testów wykorzystane zostały urządzenia radiowe dostępne na polskim rynku, działające w pasmach nielicencjonowanych zgodnie z obowiązującymi regulacjami. Instalacje zostały tak zaplanowane, aby objąć trzy kluczowe dla potrzeb Ministerstwa Cyfryzacji przedziały długości tras radiowych: krótkie odcinki (w zakresie 10 – 20 m), średnie odcinki (w zakresie 50 – 100 m) oraz odcinki długie (powyżej 150 m).

¹ Instytut Łączności – PIB, Polska w zasięgu stacjonarnego dostępu do Internetu, III kwartał 2024, <https://www.gov.pl/web/cyfryzacja/juz-jest-sprawdz-nowy-raport-polska-w-zasiegu-z-danymi-z-internetgovpl> (dostęp: 01.09.2025)

Istotnym elementem realizacji podzadania były porozumienia z hurtowym operatorem telekomunikacyjnym, który udostępnił infrastrukturę światłowodową, dokonał instalacji urządzeń oraz świadczył wsparcie techniczne w przypadku awarii. Osoby fizyczne oraz podmioty, które otrzymały dostęp do Internetu w ramach prowadzonych badań wyraziły zgodę na monitorowanie parametrów przyłączy. Kluczowym elementem wdrożenia jest wykorzystanie urządzeń pomiarowych Whitebox 8+ udostępnionych przez Urząd Komunikacji Elektronicznej (UKE). Ich praca pozwala na automatyczną, cykliczną rejestrację danych pomiarowych, a następnie na analizę szeregu metryk, które po zestawieniu tworzą zdefiniowany zestaw kluczowych wskaźników efektywności (Key Performance Indicator, KPI) do oceny jakości transmisji.

Praca miała charakter badawczo-wdrożeniowy i dostarczyła unikalnych danych dotyczących stabilności i dostępności przyłączy w długim okresie, zmienności parametrów sieciowych w czasie, takich jak przepływność, opóźnienia czy utrata pakietów. Ponadto praca pozwoliła na ocenę praktycznych możliwości wykorzystania pasm nielicencjonowanych do zapewnienia usług szerokopasmowych na obszarach, gdzie realizacja przyłączy przewodowych jest problematyczna pod względem inwestycyjnym.

Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę, na ile bezprzewodowe przyłącza telekomunikacyjne pracujące w pasmach nielicencjonowanych mogą stać się realną i powtarzalną alternatywą dla łączy światłowodowych, a także wskażą uwarunkowania techniczne ich potencjalnego wdrożenia na szerszą skalę.

2. Lokalizacje testowe

W ramach podzadania przygotowano i uruchomiono 10 przyłączy bezprzewodowych działających w pasmach nielicencjonowanych 5 GHz oraz 60 GHz. Lokalizacje przyłączy zostały dobrane w taki sposób, aby możliwe było zweryfikowanie różnych scenariuszy wdrożeniowych, z uwzględnieniem trzech przedziałów długości łącza przyjętych, zgodnie z potrzebami Ministerstwa Cyfryzacji, w następujący sposób:

- krótkie odcinki 10 – 20 m,
- średnie odcinki 50 – 100 m,
- długie odcinki > 150 m.

Każde z przyłączy zostało wyposażone w urządzenia radiowe dostępne na polskim rynku Ubiquiti serii GBE-Plus, NBE-5AC-Gen2, PBE-5AC-Gen2 oraz AF60-LR, a także w urządzenia pomiarowe Whitebox 8+ udostępnione przez UKE. Instalacje obejmowały zarówno lokalizacje mieszkaniowe, jak i obiekty przedsiębiorstw oraz instytucji.

Przygotowane przyłącza radiowe różniły się zarówno pod względem zastosowanych urządzeń, jak i parametrów technicznych wynikających z obowiązujących regulacji dla pasm nielicencjonowanych. W tabelach zestawiono wymagania projektowe oraz specyfikacje sprzętowe, które stanowiły podstawę do realizacji wdrożenia.

W ramach przygotowania przyłączy określono podstawowe parametry techniczne obejmujące zakresy częstotliwości, maksymalne moce promieniowane, długości przyłączy oraz zakładane przepływności dla łącza w górę i łącza w dół. Były to pierwotne założenia projektowe, które następnie zostały zweryfikowane w trakcie rzeczywistych pomiarów.

Zgodność urządzeń z wymaganiami określonymi dla urządzeń klasy 1 została zapewniona zgodnie z Decyzją Komisji 2000/299/EC². W wykazie urządzeń³ określono takie parametry jak m.in. sposób wykorzystania zakresów częstotliwości, parametry anten czy maksymalna zastępcza moc promieniowania izotropowo (effective isotropic radiated power, EIRP).

Tabela 1. Wymagania dla projektowanych przyłączy radiowych

Nr przyłącza	Typ przyłącza	Długość łącza [m]	Zakres częstotliwości [MHz]	Oczekiwana przepływność w łączu w dół [Mb/s]	Oczekiwana przepływność w łączu w górę [Mb/s]
1,2	PTP	10 - 20	57000 – 71000	300	100
3,4	PTP	50 – 100	5470 – 5725	300	100
5,6	PTP	50 – 100	57000 – 71000	300	100
7,8	PTP	> 150	5470 – 5725	300	100
9,10	PTP	> 150	57000 – 71000	300	100

Tabela 2. Wybrane wymagania dla urządzeń klasy 1

Zakres częstotliwości [GHz]	Podklasa	Moc EIRP [dBm]	Gęstość mocy EIRP [dBm/MHz]	Parametry anteny	Norma referencyjna
5,470 – 5,725	54	≤ 30	≤ 17	-	ETSI EN 301 893 ⁴
57 – 71	142	≤ 40	≤ 23	Maksymalna moc na zaciskach anteny ≤ 27 dBm	ETSI EN 302 567 ⁵
57 – 71	143	≤ 55	≤ 38	Zysk energetyczny ≥ 30 dBi	ETSI EN 302 567 ⁶

² 2000/299/EC: Decyzja Komisji z dnia 6 kwietnia 2000 r. ustanawiająca wstępną klasyfikację urządzeń radiowych i końcowych urządzeń telekomunikacyjnych oraz związanych z nimi znaków identyfikacyjnych

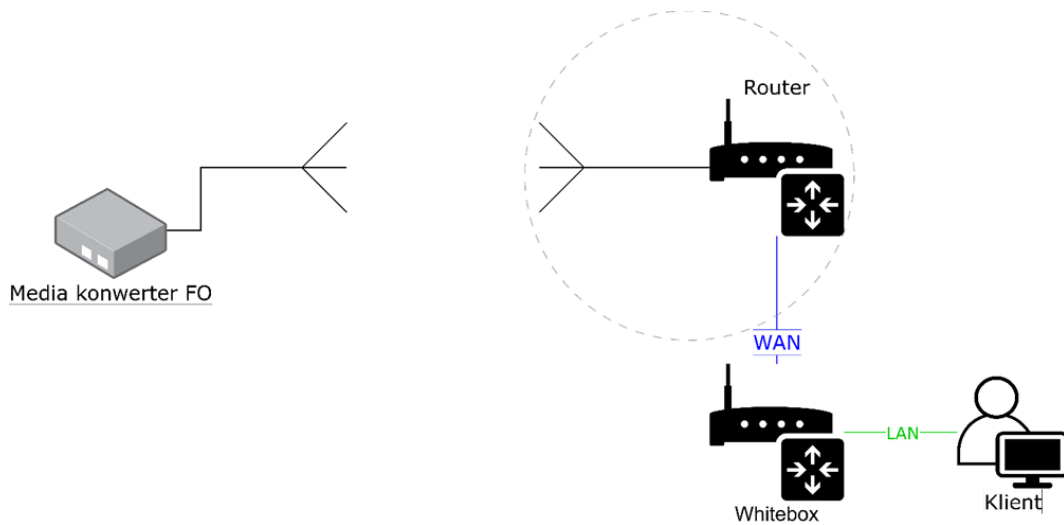
³ Komisja Europejska, Publikacja zgodnie z Artykułem 1(3) Decyzji Komisji 2000/299/EC (indykatory i otwarty wykaz wersja ze stycznia 2020), <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/40361> (dostęp: 22.12.2025)

⁴ ETSI EN 301 893 V2.2.1 5 GHz WAS/RLAN; Harmonised Standard for access to radio spectrum, 11.2024

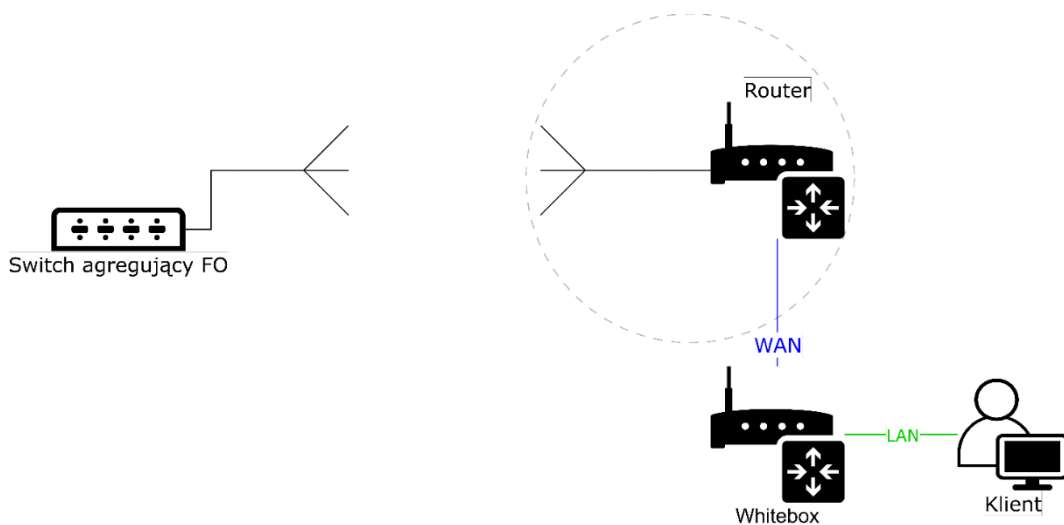
⁵ ETSI EN 302 567 V2.2.1, Multiple-Gigabit/s radio equipment operating in the 60 GHz band; Harmonised Standard for access to radio spectrum, 07.2021

⁶ ETSI EN 302 567 V2.1.1, ETSI EN 302 567 V2.1.1 Multiple-Gigabit/s radio equipment operating in the 60 GHz band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU, 07.2017

Architektura zestawionych przyłączy została oparta na konfiguracji punkt–punkt pomiędzy infrastrukturą operatora a lokalizacjami użytkowników końcowych. Po stronie operatora przyłącza były integrowane z siecią szkieletową lub dostępową poprzez infrastrukturę światłowodową (fiber optic, FO), obejmującą konwertery mediów lub przełączniki agregacyjne, stanowiące punkt wyprowadzenia ruchu do warstwy radiowej. Bezprzewodowy odcinek przyłącza realizowany był z wykorzystaniem urządzeń radiowych wyposażonych w anteny kierunkowe. Po stronie użytkownika końcowego zainstalowane zostało urządzenie pomiarowe Whitebox 8+, które włączono w układ w celu prowadzenia długoterminowych testów jakościowych. Schematy połączeń przedstawione na rysunkach 1-2 obrazują sposób zestawiania przyłączy radiowych i mogą być traktowane jako modelowe rozwiązanie dla podobnych wdrożeń w przyszłości.



Rysunek 1. Schemat podłączenia I typu



Rysunek 2. Schemat podłączenia II typu



Rysunek 3. Widok na przykładowe instalacje anten i urządzeń Whitebox 8+ zainstalowanych u użytkowników końcowych

Przyłącze nr 1

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.101787, 17.031904; 51.102119, 17.031963,
- Urządzenia: Ubiquiti GBE-Plus (2 szt.),
- Przedział długości: 10 – 20 m,
- Długość łącza: 15 m,
- Pasmo pracy: 57 – 71 GHz,
- Szerokość kanału: 2160 MHz,
- Częstotliwość: 64800 MHz,
- EIRP: 51 dBm,
- Zysk anteny: 35 dBi,
- Data aktywacji: 10.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:12:a7.

Przyłącze nr 2

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.084532, 17.012793; 51.084532, 17.012793,
- Urządzenia: Ubiquiti GBE-Plus (2 szt.),
- Przedział długości: 10 – 20 m,
- Długość łącza: 11 m,
- Pasmo pracy: 57 – 71 GHz,
- Szerokość kanału: 2160 MHz,
- Częstotliwość: 64800 MHz,
- EIRP: 51 dBm,
- Zysk anteny: 35 dBi,
- Data aktywacji: 13.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:20:7b.

Przyłącze nr 3

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.102119, 17.031963; 51.1018, 17.0319,
- Urządzenia: NBE-5AC-Gen2 (2 szt.),
- Przedział długości: 50 – 100 m,
- Długość łącza: 55 m,
- Pasmo pracy: 5 GHz (5150 – 5875 MHz),
- Szerokość kanału: 40 MHz (od 8 lipca zmieniono na 80 MHz),
- Częstotliwość: 5555 MHz,
- EIRP: 30 dBm,
- Zysk anteny: 25 dBi,
- Data aktywacji: 10.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:15:e3.

Przyłącze nr 4

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.1014, 17.0524; 51.1007, 17.0531,
- Urządzenia: NBE-5AC-Gen2 (2 szt.),
- Przedział długości: 50 – 100 m,
- Długość łącza: 74 m,
- Pasmo pracy: 5 GHz,
- Szerokość kanału: 40 MHz (od 25 lipca zmieniono na 80 MHz),
- Częstotliwość: 5675 MHz (5150 – 5875 MHz),
- EIRP: 30 dBm,
- Zysk anteny: 25 dBi,
- Data aktywacji: 12.06.2025 r.,

- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:13:91.

Przyłącze nr 5

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.102119, 17.031963; 51.101687, 17.032383,
- Urządzenia: Ubiquiti GBE-Plus (2 szt.),
- Przedział długości: 50 – 100 m,
- Długość łącza: 67,
- Pasmo pracy: 57 – 71 GHz,
- Szerokość kanału: 2160 MHz,
- Częstotliwość: 648000 MHz,
- EIRP: 51 dBm,
- Zysk anteny: 35 dBi,
- Data aktywacji: 10.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:12:38.

Przyłącze nr 6

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.100965, 17.051615; 51.101363, 17.052404,
- Urządzenia: Ubiquiti GBE-Plus (2 szt.),
- Przedział długości: 50 – 100 m,
- Długość łącza: 55 m,
- Pasmo pracy: 57 – 71 GHz,
- Szerokość kanału: 2160 MHz,
- Częstotliwość: 64800 MHz,
- EIRP: 51 dBm,
- Zysk anteny: 35 dBi,
- Data aktywacji: 12.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:12:53.

Przyłącze nr 7

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.1014, 17.0524; 51.1021, 17.032,
- Urządzenia: PBE -5AC-Gen2 (2 szt.),
- Przedział długości: > 150 m,
- Długość łącza: 205 m,
- Pasmo pracy: 5 GHz,
- Szerokość kanału: 40 MHz (od 25 lipca zmieniono na 80 MHz),
- Częstotliwość: 5540 MHz,
- EIRP: 30 dBm,
- Zysk anteny: 25 dBi,
- Data aktywacji: 12.06.2025 r.,

- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:28:58.

Przyłącze nr 8

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.1014, 17.0524; 51.1021, 17.032,
- Urządzenia: PBE -5AC-Gen2 (2 szt.),
- Przedział długości: > 150 m,
- Długość łącza: 582,
- Pasmo pracy: 5 GHz,
- Szerokość kanału: 40 MHz (od 25 lipca zmieniono na 80 MHz),
- Częstotliwość: 5510 MHz,
- EIRP: 30 dBm,
- Zysk anteny: 25 dBi,
- Data aktywacji: 10.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:18:f5.

Przyłącze nr 9

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.10143, 17.052381; 51.102846, 17.052962,
- Urządzenia: AF60-LR (2 szt.),
- Przedział długości: > 150 m,
- Długość łącza: 190 m,
- Pasmo pracy: 57 – 71 GHz,
- Szerokość kanału: 2160 MHz,
- Częstotliwość: 68040 MHz,
- EIRP: 55 dBm,
- Zysk anteny: 40 dBi,
- Data aktywacji: 13.06.2025 r.,
- Whitebox MAC: 24:0b:88:0a:12:e6.

Przyłącze nr 10

- Lokalizacja urządzeń radiowych: 51.113087, 17.004872; 51.112604, 17.000313,
- Urządzenia: AF60-LR (2 szt.),
- Przedział długości: > 150 m,
- Długość łącza: 300 m,
- Pasmo pracy: 57 – 71 GHz,
- Szerokość kanału: 2160 MHz,
- Częstotliwość: 68040 MHz,
- EIRP: 55 dBm,
- Zysk anteny: 40 dBi,
- Data aktywacji: 13.06.2025 r.,

- Whitebox MAC: 24:0b:88:08:60:8a.

3. Zasada działania urządzenia pomiarowego Whitebox 8+

Whitebox 8+ wykorzystany w niniejszej pracy to dedykowana platforma pomiarowa opracowana przez firmę SamKnows, przeznaczona do prowadzenia długoterminowych i powtarzalnych badań jakości usług szerokopasmowych w sieci. W Polsce sprzęt ten jest udostępniany przez Urząd Komunikacji Elektronicznej (UKE) w ramach krajowego Systemu Monitorowania Jakości Internetu (SMJI)⁷, którego celem jest niezależna weryfikacja jakości usług dostępu do Internetu oraz ocena zgodności parametrów rzeczywistych z deklaracjami operatorów. UKE, korzystając z platformy SamKnows, prowadzi na ich podstawie ogólnokrajowe badania jakości sieci, a w ramach niniejszego zadania urządzenia zostały wypożyczone i wykorzystane jako element środowiska testowego.

Whitebox 8+ wyposażony jest w zestaw interfejsów sieciowych (4 × LAN 1 Gb/s, 1 × WAN 1 Gb/s), dwurdzeniowy procesor 880 MHz, 128 MB pamięci RAM oraz zmodyfikowany system operacyjny bazujący na dystrybucji OpenWrt Linux. Urządzenie zostało wyposażone w moduły radiowe Wi-Fi (2,4 i 5 GHz, obsługujące standardy 802.11a/b/g/n/ac).

Oprogramowanie zostało przygotowane przez SamKnows i działa w trybie zamkniętym, użytkownik końcowy nie ma możliwości modyfikacji konfiguracji, ani ingerencji w harmonogram testów. Zarządzanie odbywa się centralnie poprzez komunikację z chmurą SamKnows i serwerami pomiarowymi UKE. Urządzenie cyklicznie pobiera konfigurację testową oraz aktualizacje oprogramowania, korzystając z protokołu IETF LMAP (Internet Engineering Task Force Large-Scale Measurement of Broadband Performance) i szyfrowanej komunikacji TLS 1.2. Proces ten zapewnia spójność konfiguracji i bezpieczeństwo przesyłanych danych.

Warto podkreślić, że metodologia pomiarowa realizowana przez urządzenia Whitebox 8+ jest zgodna z międzynarodowymi zaleceniami. System SMJI opiera się na Zaleceniu ITU-T Y.1540⁸, które definiuje podstawowe metryki wydajności transmisji pakietów IP takie jak opóźnienia (IP Packet Transfer Delay, IPTD), zmienność opóźnień tzw. jitter (IP Packet Delay Variation, IPDV), wskaźniki utraty pakietów (IP Packet Loss Ratio, IPLR) czy błędów pakietowych (IP Packet Error Ratio, IPER). Dzięki temu pomiary realizowane w ramach SMJI, a więc także w niniejszej pracy mogą być interpretowane w kontekście jednoznacznych (szczegółowo opisanych w rozdziale 5) progów jakościowych uznanych na arenie międzynarodowej i służą jako wiarygodne narzędzie oceny jakości usług szerokopasmowych.

⁷ Urząd Komunikacji Elektronicznej, Informacje o Projekcie SMJI, https://uke.gov.pl/gfx/uke/userfiles/public/informacje_o_projekcie_smji.pdf (dostęp: 02.09.2025 r.)

⁸ ITU-T Y.1540, Internet protocol data communication service –IP packet transfer and availability performance Parameters, 12.2019

Podczas pomiarów realizowanych przez Whitebox 8+ kluczowe znaczenie ma uwzględnienie ruchu krzyżowego (cross-traffic). Jest to każdy ruch w sieci generowany przez użytkowników końcowych lub urządzenia w sieci domowej, który współdzieli łącze z ruchem testowym. Może to być m.in. przeglądanie Internetu, transmisja wideo, gra online, rozmowa VoIP, aktualizacja systemu i oprogramowania czy działanie urządzeń IoT. Ponieważ tego typu ruch konkuruje z pakietami generowanymi przez Whitebox 8+, prowadzi do przekłamania wyników, najczęściej w postaci zaniżonych wartości przepływności oraz zawyżonych opóźnień i jittera. Aby temu zapobiec, Whitebox został wyposażony w mechanizm monitorowania ruchu na interfejsie WAN. Jeżeli w momencie planowanego testu aktywność przekroczy zdefiniowany próg ok. 200 kb/s w obu kierunkach pomiar zostaje wstrzymany do czasu kolejnej próby wynikającej z zaplanowanego harmonogramu. Dzięki temu wyniki zbierane są w warunkach okresu o względnym braku aktywności w sieci, co pozwala uzyskać wiarygodne i porównywalne dane. Mechanizm ten ma podwójne znaczenie z jednej strony gwarantuje spójność i poprawność zbieranych wyników, eliminując pomiary zniekształcone przez aktywność użytkownika, a z drugiej ogranicza wpływ samego procesu testowania na komfort korzystania z Internetu, ponieważ pomiary nie nakładają się na normalne korzystanie z sieci. Z drugiej strony podejście to prowadzi do zróżnicowanej liczby wyników rejestrowanych dla różnych przyłączy, ponieważ liczba wykonanych pomiarów zależy od intensywności ich wykorzystania.

W dokumencie przekazanym przez UKE⁹ przedstawiono przykładowe wartości wykorzystania danych dla dwóch wariantów przepływności łącza:

- 100 Mb/s pobierania i 20 Mb/s wysyłania,
- 300 Mb/s pobierania i 100 Mb/s wysyłania.

Wartości te zostały zestawione w ujęciu tygodniowym i wynoszą odpowiednio około 25,6 GB/tydzień dla profilu 100/20 oraz 84,6 GB/tydzień dla profilu 300/100. Po przeliczeniu na skalę miesięczną oznacza to odpowiednio około 100 GB na miesiąc oraz ponad 300 GB na miesiąc. Należy jednak podkreślić, że są to wartości maksymalne, zakładające pełną realizację harmonogramu testów i brak aktywności użytkowników w tle.

W praktyce rzeczywiste zużycie danych jest zauważalnie niższe, część testów nie zostaje uruchomiona w okresach występowania ruchu krzyżowego. Tabela 3 stanowi punkt odniesienia przy ocenie obciążenia łącza wynikającego z pracy urządzenia pomiarowego i wskazuje górne granice generowanego ruchu.

⁹ Odpowiedź na pismo znak: DT.WIT.401.5.2025.KS z dnia 6 marca 2025 r.

Tabela 3. Wybrane metryki pomiarowe

Aplikacja	Częstość	Średnie zużycie na tydzień (profil przyłącza 100/20 Mb/s) [GB]	Średnie zużycie na tydzień (profil przyłącza 300/100 Mb/s) [GB]
Pomiar przepływności w łączu w dół	Co godzinę	15,3	46
Pomiar przepływności w łączu w górę	Co godzinę	3	15,3
VoIP UDP Jitter	Co godzinę	Nieznaczące	Nieznaczące
Protokół UDP	Ciągle	Nieznaczące	Nieznaczące
DNS	Co godzinę	Nieznaczące	Nieznaczące
ICMP Ping	Co godzinę	Nieznaczące	Nieznaczące
Netflix	Raz na 6 godzin	7	21
Media społecznościowe	Co godzinę	Nieznaczące	Nieznaczące
Gry online	Co godzinę	Nieznaczące	Nieznaczące
Wideokonferencja	Co godzinę	Nieznaczące	Nieznaczące

4. Analizowane wskaźniki

4.1. Wstęp i definicje pojęć

Wskaźniki KPI stanowią zdefiniowane, parametry jakości transmisji, które pozwalają na ocenę parametrów łącza w sposób spójny i dają możliwość ich bezpośredniego porównania. W projekcie wykorzystano dane zebrane przez urządzenia Whitebox 8+, które mierzą podstawowe parametry jakości sieci (Quality of Service, QoS) i jakości doświadczenia użytkownika (Quality of Experience, QoE), zgodnie z Zaleceniami ITU-T Y.1540, ITU-T Y.1541 oraz wytycznymi IETF IPPM¹⁰.

Celem wykorzystania KPI jest uproszczenie dużych zbiorów metryk pomiarowych do wskaźników przystępnych do analizy i interpretacji tak, aby możliwe było porównanie jakości transmisji pomiędzy lokalizacjami, w czasie, a także w odniesieniu do przyjętych progów jakości. Zastosowanie KPI umożliwia także ocenę stabilności łącza oraz identyfikację problemów w kontekście usług takich jak wideo, gry online, komunikacja głosowa czy usługi chmurowe.

¹⁰ Urząd Komunikacji Elektronicznej, Informacje o Projekcie SMJI https://uke.gov.pl/gfx/uke/userfiles/_public/informacje_o_projekcie_smji.pdf (dostęp: 02.09.2025 r.)

Dla prawidłowej interpretacji wskaźników KPI konieczne jest przyjęcie podstawowych pojęć matematycznych oraz miar statystycznych, które zostały opisane w dalszej części raportu. Średnia (arytmetyczna) to suma wszystkich wartości podzielona przez ich liczbę. Obrazuje ogólny poziom badanego parametru, ale może być wrażliwa na wartości skrajne (odbiegające od reszty prób). Przykładem jest średnia opóźnień, która może zostać zawyżona przez pojedynczy pomiar z bardzo wysoką wartością opóźnienia, np. skutek chwilowej utraty łączności.

Mediana to wartość środkowa w uporządkowanym zbiorze danych. Pokazuje „typowy” poziom, lepiej niż średnia oddaje realne doświadczenie, gdy w danych pojawiają się skrajności. Przykładowo mediana przepływności oddaje bardziej realistyczne wrażenie użytkownika niż średnia, jeśli wśród wyników znalazły się sporadyczne pomiary o nienaturalnie niskiej wartości, wynikające np. z chwilowego obciążenia sieci, zakłóceń radiowych albo przeciążenia serwera testowego.

Percentyl (np. 10. – dziesiąty percentyl, 90. – dziewięćdziesiąty percentyl) inaczej zwany kwantylem rzędu $k/100$, gdzie $k = 1, \dots, 99$. Jest to wartość graniczna w uporządkowanym zbiorze danych, która dzieli wyniki na określone części. Percentyl pokazuje, jaki odsetek wszystkich pomiarów znajduje się poniżej danego progu. W niniejszym opracowaniu, w zależności od rodzaju parametru sieciowego wykazywany jest 10. lub 90. percentyl. 10. percentyl oznacza, że 10% zmierzonych wartości znajduje się poniżej wskazanego progu. Natomiast 90. percentyl oznacza, że 90% zmierzonych wartości mieści się poniżej wskazanego progu. To wskaźnik, który pozwala zobaczyć, jakie wartości osiągnęły w większości przypadków, pomijając skrajne wyniki. Percentyle są stosowane, ponieważ sama średnia czy mediana nie dają pełnego obrazu wyników.

10. i 90. percentyl służą do oceny stabilności mierzonych parametrów. Dla wskaźników, które powinny być jak najwyższe (np. przepływność), 10. percentyl pokazuje najniższe wartości osiągnęte w mniej sprzyjających warunkach, takich jak przeciążenie sieci, natomiast 90. percentyl odzwierciedla najlepsze wyniki. Z kolei dla parametrów, które powinny być jak najniższe (np. opóźnienie), interpretacja jest odwrotna — 10. percentyl pokazuje najlepsze, a 90. percentyl najgorsze warunki pracy łącza. Dzięki temu otrzymujemy obraz zakresu wyników od sytuacji najgorszych do najlepszych co jest szczególnie istotne w ocenie jakości usług internetowych, gdzie stabilność ma dla użytkownika równie duże znaczenie jak same wartości średnie.

Rozrzut (zakres wartości od maksymalnej do minimalnej) to różnica między największą i najmniejszą wartością. Pokazuje, jak bardzo parametry zmieniają się w czasie. Przykładem jest rozrzut opóźnienia w sesjach gier online, który wskazuje, jak stabilne było łącze, duży rozrzut oznacza wyraźne skoki opóźnienia odczuwalne dla gracza podczas rozgrywki.

Wskaźnik sukcesu oznacza udział udanych prób pomiarowych w całej liczbie prób. To informacja jaki procent prób zakończył się powodzeniem.

Dzięki tym podstawowym operacjom można analizować jakość usług w wielu wymiarach, zarówno typowe zachowanie łącza, jak i jego stabilność czy ekstremalne przypadki.

4.2. Przegląd KPI

Ze względu na dużą liczbę testowanych aplikacji i usług w ramach pomiarów łącza konieczne było wprowadzenie podziału na grupy tematyczne. Kryterium stanowiły wspólne metryki pomiarowe oraz podobny charakter ruchu sieciowego generowanego przez daną usługę. Przykładowo, wszystkie gry online zostały ujęte w jednej kategorii, ponieważ kluczowe KPI są dla nich takie same, tj. opóźnienia, stabilność transmisji i wskaźnik utraty pakietów. Z kolei serwisy wideo (Netflix, YouTube) posiadają zbiór podobnych metryk, gdyż ich jakość najlepiej opisują czasy inicjalizacji, przepływność po buforowaniu oraz liczba zdarzeń przerwania (stall events).

Dzięki takiemu podejściu możliwe było ograniczenie powtarzalności wskaźników oraz skupienie się na tym, co w danej kategorii jest najbardziej istotne z punktu widzenia jakości doświadczenia użytkownika. Podział na grupy ułatwia także interpretację wyników.

Poniżej przedstawiono kategorie, które zostały przetestowane w ramach pomiarów.

4.2.1. Gry online

Gry online (Among Us, Apex Legend, Battlefield V, Call of Duty, Diablo 3, DOTA2, FIFA21, Fortnite, Gears of War 5, Halo Infinite, Hearthstone, Heroes of the Storm, League of Legends, Overwatch, Playerunknown's Battlegrounds, Playerunknown's Battlegrounds Mobile, Rainbow 6: Siege, Roblox, Rocket League, Starcraft 2, Valorant, World of Warcraft)

W przypadku gier online KPI skupiają się na opóźnieniach i stabilności transmisji, które mają największy wpływ na gry. Dla kategorii gry online analizowano poniższe KPI.

- Średnia i mediana opóźnień, czyli parametry określające czas potrzebny na przesłanie pakietu danych od urządzenia użytkownika do serwera oraz otrzymanie odpowiedzi zwrotnej, dostarczają informacji o typowym poziomie opóźnień. Wartości powyżej 100 ms są dla graczy zauważalne jako tzw. lag, czyli opóźnienie w reakcji gry.
- 10. i 90. percentyl opóźnienia stanowią miarę stabilności połączenia. 10. percentyl pokazuje opóźnienie, którego nie przekracza 10% pomiarów — ilustruje więc sytuację w najbardziej korzystnych warunkach sieciowych (np. gdy nie występuje przeciążenie przyłącza ani zakłócenia w warstwie fizycznej). Z kolei 90. percentyl wskazuje opóźnienie, którego nie przekracza 90% pomiarów, co obrazuje warunki najmniej sprzyjające, np. podczas godzin szczytu, przy dużym obciążeniu sieci lub zakłóceniach radiowych. Zestawienie wartości 10. i 90. percentyla pozwala określić zakres zmienności opóźnień i ocenić stabilność łącza. W grach online różnica między tymi wartościami pokazuje, jak często gracz doświadcza warunków odbiegających od typowych.

- Rozrzut opóźnień to różnica między największym a najmniejszym zmierzonym opóźnieniem. Jest to bezpośredni wskaźnik stabilności połączenia w czasie testu. Niski rozrzut oznacza, że opóźnienia były dość stałe, a gracz mógł cieszyć się płynną rozgrywką. Wysoki rozrzut wskazuje na występowanie nagłych skoków opóźnień, które są szczególnie uciążliwe — mogą powodować zatrzymywanie się postaci, opóźnione reakcje sterowania lub gwałtowne przeskoki obiektów w grze.

4.2.2. DNS

System DNS odpowiada za tłumaczenie czytelnych dla człowieka nazw domen (np. *www.gov.pl*) na odpowiadające im adresy IP serwerów. Każde otwarcie strony WWW, uruchomienie aplikacji online czy odtworzenie wideo w serwisie streamingowym rozpoczyna się od zapytania DNS. Z tego powodu opóźnienia lub błędy w działaniu systemu DNS bezpośrednio wpływają na czas ładowania usług i komfort użytkownika. Dla kategorii DNS analizowano poniższe KPI.

- Średni czas tłumaczenia domeny oznacza średnią wartość wszystkich pomiarów opóźnienia DNS. Pokazuje ogólny poziom szybkości działania systemu, jednak może być zafałszowany przez pojedyncze, skrajnie wysokie wartości (np. w przypadku chwilowego braku odpowiedzi lub przeciążenia serwera).
- Mediana czasu tłumaczenia domeny pokazuje typowy czas, w jakim serwer DNS odpowiada na zapytanie. Niska wartość (np. poniżej 50 ms) oznacza szybkie działanie, natomiast wyższa może powodować zauważalne opóźnienia w otwieraniu stron lub aplikacji. Nawet przy wysokiej przepływności w łączy zbyt długi czas odpowiedzi DNS sprawia, że użytkownik ma wrażenie wolnego działania połączenia, ponieważ strony otwierają się z opóźnieniem.
- 10. i 90. percentyl czasu tłumaczenia domeny pozwalają określić zakres zmienności opóźnień. 10. percentyl pokazuje najlepsze warunki – czas odpowiedzi w 10% najszybszych przypadków, natomiast 90. percentyl wskazuje, jak wyglądały najwolniejsze odpowiedzi. Oznacza to, że w 10% przypadków opóźnienie było wyższe niż wartość 90. percentyla.
- Wskaźnik sukcesu określa odsetek poprawnie zakończonych zapytań DNS. Wartość zbliżona do 100% świadczy o wysokiej niezawodności systemu, natomiast spadek wskaźnika oznacza problemy z tłumaczeniem nazw domen, które mogą przekładać się na brak dostępu do stron internetowych lub usług online.

4.2.3. Test przepływności przyłącza (wielowątkowy)

Ten test odpowiada popularnym narzędziom do pomiaru prędkości Internetu i został zaprojektowany w celu oceny maksymalnego potencjału łącza internetowego w obu kierunkach: pobierania (DL) i wysyłania (UL) danych. Dla kategorii test przepływności przyłącza analizowano poniższe KPI.

- Średnia przepływność łącza to arytmetyczna średnia wartości uzyskanych podczas testu. Pokazuje ogólny poziom wydajności łącza, jednak może być zawyżona lub zaniżona przez pojedyncze anomalie w działaniu sieci lub w komunikacji z serwerem pomiarowym.
- Mediana przepływności DL/UL to wartość najczęściej występująca (średkowa w zbiorze wyników), lepiej odzwierciedlająca typowe prędkości osiągane w trakcie testów. Jest mniej podatna na skrajne przypadki (np. chwilowe spadki prędkości). Wysoka mediana potwierdza, że użytkownicy zazwyczaj mogą liczyć na prędkość deklarowaną przez operatora.
- 10. i 90. percentyl przepływności przedstawiają zakres zmienności prędkości. 10. percentyl oznacza minimalny poziom wydajności, który występuje w 10% najgorszych prób — pokazuje, jak bardzo prędkość pobierania lub wysyłania może spaść w niekorzystnych warunkach (np. w godzinach szczytu). Niski 10. percentyl wskazuje, że w najgorszych momentach wydajność łącza znacząco spada, a użytkownicy mogą doświadczać problemów z buforowaniem wideo w wysokiej rozdzielczości lub wysyłaniem dużych plików. 90. percentyl to wartość, poniżej której mieści się 90% wyników; odzwierciedla on prędkość osiąganą w typowych, dobrych warunkach sieciowych, często zbliżoną do maksymalnych możliwości łącza.
- Wskaźnik sukcesu określa odsetek testów, które zakończyły się powodzeniem. Wysoka wartość świadczy o niezawodności łącza i braku błędów podczas transmisji danych.

4.2.4. Netflix

Streaming wideo, zwłaszcza w serwisach takich jak *Netflix*, jest jednym z najbardziej wymagających scenariuszy z punktu widzenia jakości łącza. Użytkownik oczekuje, że materiał rozpocznie się szybko i będzie odtwarzany płynnie, bez przerw ani spadków jakości. Dlatego KPI z tej grupy odnoszą się nie tylko do przepływności, ale także do wskaźników bezpośrednio opisujących doświadczenie użytkownika (QoE). Dla kategorii Netflix analizowano poniższe KPI.

- Mediana czasu inicjalizacji wideo określa czas potrzebny do pobrania wstępnej ilości danych (bufora) i rozpoczęcia odtwarzania. Niska wartość oznacza, że film lub serial startuje niemal natychmiast, co przekłada się na pozytywne wrażenie użytkownika, natomiast wysoka wartość wskazuje, że użytkownik musi czekać od kilku do kilkunastu sekund na rozpoczęcie odtwarzania.
- Średnia i mediana przepływności po fazie buforowania to wskaźniki obrazujące stabilność transmisji po rozpoczęciu odtwarzania. Wysokie wartości wskazują, że łącze bez problemu obsługuje wybrany profil jakości (np. Full HD lub 4K). Mediana lepiej odzwierciedla typowe doświadczenie użytkownika, natomiast średnia pokazuje ogólny poziom, lecz jest bardziej wrażliwa na pojedyncze spadki.
- 10. percentyl przepływności po fazie buforowania wskazuje, jakie były warunki w 10% najgorszych przypadków. Niski wynik oznacza, że w pewnych momentach prędkość

spadała do poziomu grożącego zatrzymaniem odtwarzania lub wymuszeniem obniżenia jakości (np. przełączenia z 1080p do 480p).

- 90. percentyl przepływności po fazie buforowania to wartość, poniżej której mieści się 90% pomiarów — tylko 10% wyników było lepszych od tej wartości. Wysoki poziom 90. percentyla świadczy o tym, że w większości prób prędkość pobierania pozwalała na komfortowe oglądanie materiałów w wysokiej jakości (np. Full HD lub 4K). Jeżeli jednak 90. percentyl znacząco odbiega od mediany, może to oznaczać, że sporadycznie występują bardzo dobre warunki transmisji (np. przy chwilowym braku obciążenia), które nie odzwierciedlają codziennego doświadczenia użytkownika.
- Liczba zdarzeń zatrzymania odtwarzania (stall events) określa sytuacje, w których wideo zostało przerwane i musiało ponownie się buforować. Jest to jeden z najważniejszych KPI dla jakości doświadczenia użytkownika (QoE), ponieważ odbiorcy są szczególnie wrażliwi na widoczne „zacięcia” lub przerwy w odtwarzaniu obrazu.

4.2.5. ICMP Ping

Test ICMP Ping to podstawowe narzędzie diagnostyczne w sieciach IP. Działa na zasadzie wysyłania pakietów ICMP Echo Request do serwera i oczekiwania na odpowiedź. Na tej podstawie mierzone są opóźnienia w komunikacji oraz wykrywana ewentualna utrata pakietów. Wyniki testu Ping stanowią podstawę oceny jakości łącza — niskie i stabilne wartości oznaczają szybką i niezawodną komunikację, natomiast ich wzrost lub duża zmienność sygnalizują problemy z przepływnością, przeciążenie sieci lub zakłócenia na trasie transmisji.

- Średnia i mediana opóźnień określają przeciętny i typowy czas odpowiedzi. Niskie wartości świadczą o dobrej jakości połączenia. Wysokie lub zmienne wartości wskazują na niepoprawne sieci lub zakłócenia w trasie.
- 10. i 90. percentyl opóźnienia pokazują zakres zmian czasu odpowiedzi od najlepszych (10. percentyl) po najgorsze (90. percentyl) warunki. Dają pełniejszy obraz stabilności łącza niż pojedyncza wartość mediany, ponieważ uwzględniają zarówno optymalne, jak i niekorzystne sytuacje sieciowe.
- Rozrzut opóźnień to różnica między minimalnym a maksymalnym czasem odpowiedzi. Duży rozrzut wskazuje na występowanie nagłych „skoków pinga” i wahania jakości połączenia, które mogą być zauważalne w aplikacjach czasu rzeczywistego (np. w grach online lub połączeniach VoIP).
- Wskaźnik utraty pakietów (Packet Loss Rate) określa procent pakietów ICMP, które nie dotarły do celu lub nie otrzymały odpowiedzi. Nawet niewielkie wartości mogą świadczyć o problemach z dostępnością sieci lub przeciążeniem na trasie transmisji.

4.2.6. Protokół UDP

Test oparty na protokole UDP pozwala mierzyć opóźnienia i utratę pakietów w warunkach bardziej zbliżonych do działania aplikacji interaktywnych (VoIP, wideokonferencje, gry online),

które również wykorzystują ten protokół. W przeciwieństwie do ICMP, pakiety UDP nie mają wbudowanego mechanizmu potwierdzania odbioru, dzięki czemu test lepiej odzwierciedla rzeczywiste problemy z jakością transmisji, takie jak jitter czy utrata pakietów. Wysoka wartość utraty pakietów lub duża zmienność opóźnień w tym teście bezpośrednio wskazuje na potencjalne zakłócenia podczas korzystania z aplikacji czasu rzeczywistego. Dla kategorii protokół UDP analizowano poniższe KPI.

- Średnia i mediana opóźnień określają czas transmisji pakietów UDP, który lepiej niż w przypadku ICMP odzwierciedla rzeczywiste warunki w usługach interaktywnych, takich jak VoIP, wideokonferencje czy gry online.
- 10. i 90. percentyl opóźnienia pokazują rozkład wyników — od najlepszych warunków (10. percentyl) po najgorsze przypadki (90. percentyl). Dzięki temu można ocenić stabilność transmisji i określić, jak bardzo opóźnienie zmienia się w czasie rzeczywistej sesji.
- Wskaźnik utraty pakietów (Packet Loss Rate) określa udział utraconych pakietów UDP w stosunku do wszystkich przesłanych pakietów. Utrata jest szczególnie istotna, ponieważ może prowadzić do zrywania dźwięku w rozmowach VoIP, zakłóceń w wideokonferencjach lub np. gwałtownych przeskoków postaci w grach online.

Wyniki testu UDP mają większe znaczenie praktyczne niż test ICMP, ponieważ odzwierciedlają działanie usług, które faktycznie wykorzystują ten protokół. Wysokie wartości utraty pakietów lub duże wahania opóźnień bezpośrednio przekładają się na obniżenie jakości aplikacji czasu rzeczywistego.

4.2.7. Media społecznościowe

Test dla aplikacji typu przeglądanie mediów społecznościowych (social media browsing) ma na celu odwzorowanie warunków, w jakich użytkownik korzysta z popularnych serwisów społecznościowych (np. Facebook, Instagram, Twitter). Charakterystyka tego rodzaju aplikacji opiera się na szybkim pobieraniu treści — obrazów, animacji (GIF) czy materiałów wideo. Z tego powodu kluczowe znaczenie mają przede wszystkim opóźnienia w komunikacji oraz niezawodność połączenia, które wpływają na czas ładowania strony i czas odpowiedzi aplikacji. Dla kategorii media społecznościowe analizowano poniższe KPI.

- Mediana opóźnienia określa, jak szybko nawiązywane jest połączenie z serwerem aplikacji. Niska wartość mediany oznacza szybkie ładowanie treści i zadowalający czas odpowiedzi interfejsu, natomiast wysoka może wskazywać na opóźnienia w reakcji aplikacji. Średnia opóźnień z kolei pokazuje ogólny poziom jakości, lecz może być zafałszowana przez skrajne wartości (np. chwilowe problemy z siecią).
- 10. i 90. percentyl opóźnień pozwalają określić rozkład wyników — od najlepszych warunków (10. percentyl) po najgorsze przypadki (90. percentyl). 10. percentyl pokazuje sytuacje, w których strona ładowała się wyjątkowo szybko, natomiast 90. percentyl

wskazuje, jak wyglądały najwolniejsze odpowiedzi serwera, np. gdy połączenie było przeciążone lub niestabilne.

- Rozrzut opóźnień to różnica między najdłuższym a najkrótszym czasem odpowiedzi. Duży rozrzut może oznaczać, że ładowanie treści jest raz płynne, a raz zauważalnie spowolnione, co użytkownik odbiera jako losowe „zacięcia” aplikacji.
- Wskaźnik sukcesu określa udział poprawnie zakończonych prób w całkowitej liczbie testów. Jeśli wskaźnik spada poniżej 100%, oznacza to problemy z dostępnością usług — np. część treści nie ładuje się w ogóle lub ładuje się z błędem.

Niska mediana i wysoki 90. percentyl opóźnień świadczą o tym, że treści społecznościowe wczytują się szybko i stabilnie. Natomiast duży rozrzut opóźnień lub niska wartość 10. percentyla pokazują, że w części przypadków użytkownicy mogą doświadczać znacznego spowolnienia działania aplikacji — np. zdjęcia lub komentarze ładują się z dużym opóźnieniem.

4.2.8. VoIP / UDP Jitter

VoIP (Voice over Internet Protocol) to technologia transmisji głosu w czasie rzeczywistym za pomocą protokołu IP. Jakość rozmów głosowych zależy przede wszystkim od niskich opóźnień, stabilności transmisji oraz braku utraty pakietów. Dla użytkownika wszelkie zakłócenia objawiają się jako opóźnienia w dialogu, zniekształcenia dźwięku lub zrywanie połączenia.

- UDP Jitter to test określający zmienność opóźnień w transmisji pakietów UDP. Jest on ściśle powiązany z VoIP, ponieważ większość usług głosowych i wideokonferencyjnych wykorzystuje ten protokół do przesyłania danych. Nawet przy niskich średnich opóźnieniach wysoki poziom jittera powoduje, że pakiety docierają w nieregularnych odstępach czasu, co w skrajnych przypadkach może prowadzić do zrywania rozmów.
- Średnia i mediana opóźnień określają czas podróży pakietu w obie strony. W przypadku usług VoIP wartości przekraczające 150 ms stają się zauważalne dla użytkownika jako opóźnienie w rozmowie.
- Mediana jittera (UL/DL) pokazuje, jak bardzo zmienia się czas dostarczenia kolejnych pakietów w kierunku wysyłania (UL) i pobierania (DL). Już wartości powyżej 30 ms mogą prowadzić do zakłóceń dźwięku i obniżenia zrozumiałości rozmowy.
- Wskaźnik utraty pakietów (Packet Loss Rate) określa udział pakietów, które nie dotarły do celu. W transmisjach czasu rzeczywistego (VoIP, wideokonferencje, gry) brak retransmisji jest celowy, aby uniknąć opóźnień — utracone dane są jedynie częściowo kompensowane przez kodowanie korekcyjne.
- Współczynnik jakości rozmowy MOS (Mean Opinion Score) to subiektywny wskaźnik oceniający jakość dźwięku lub wizji w skali od 1 do 5, obliczany na podstawie opóźnień, jittera i utraty pakietów.

4.2.9. Wideokonferencja

Wideokonferencje łączą w sobie elementy transmisji głosu oraz obrazu wideo w czasie rzeczywistym. Jakość tej usługi zależy zarówno od stabilnych opóźnień i niskiego jittera, jak i od odpowiedniej przepływności, która pozwala utrzymać transmisję obrazu w wysokiej rozdzielczości. Każde zakłócenie w transmisji pakietów — opóźnienia lub utrata pakietów — wpływa bezpośrednio na doświadczenie uczestnika konferencji, powodując pogorszenie płynności obrazu, utratę synchronizacji dźwięku i obrazu lub chwilowe przerwy w transmisji.

- Średnia i mediana opóźnień przedstawiają typowy poziom opóźnień podczas wideokonferencji. Mediana lepiej odzwierciedla rzeczywiste warunki, ponieważ nie jest zniekształcana przez pojedyncze skrajnie wysokie wartości. Średnia natomiast pokazuje ogólny poziom, lecz może być zawyżona w przypadku wystąpienia anomalii.
- 10. percentyl opóźnień pokazuje opóźnienie osiągnięte w najlepszych warunkach, czyli w 10% najszybszych próbach. Niska wartość tego wskaźnika świadczy o dobrej wydajności sieci w optymalnych warunkach, co przekłada się na wysoką jakość rozmów w części sesji.
- 90. percentyl opóźnień przedstawia poziom opóźnień w najgorszych 10% przypadków. Wysoka wartość tego wskaźnika oznacza pogorszenie jakości połączenia w najbardziej obciążonych momentach, np. w godzinach szczytu, kiedy wideokonferencje mogą stawać się trudne do prowadzenia.
- Rozrzut opóźnień to różnica między najniższym a najwyższym zmierzonym opóźnieniem w danej serii testów. Duży rozrzut oznacza niestabilność połączenia i może powodować nienaturalne „skoki” obrazu lub dźwięku.
- Wskaźnik sukcesu określa procent udanych prób zestawienia i utrzymania połączenia wideokonferencyjnego. Wysoka wartość świadczy o niezawodności usługi i dobrej jakości infrastruktury sieciowej.

5. Ocena jakości transmisji

Do oceny jakości transmisji wykorzystano zarówno wskaźniki jakości usług (Quality of Service, QoS), jak i wskaźniki jakości doświadczenia użytkownika (Quality of Experience, QoE).

Każdy z parametrów został przeanalizowany pod kątem spełniania progów jakościowych określonych w obowiązujących normach i zaleceniach międzynarodowych, takich jak ITU oraz BERC.

5.1. QoS (Quality of Service)

Zgodnie z Zaleceniem ITU-T E.800¹¹, jakość usług (Quality of Service, QoS) definiuje się jako całość cech usługi telekomunikacyjnej, które wpływają na jej zdolność do spełniania określonych i domniemanych potrzeb użytkownika tej usługi.

Poziomy QoS określają konkretne wymagania jakościowe, jakie powinna spełniać dana usługa, aby zapewnić użytkownikowi oczekiwane doświadczenie. W przypadku przyłączy bezprzewodowych stosuje się poziomy odniesione do parametrów, jakie powinna osiągać sieć o bardzo dużej przepustowości (Very High Capacity Network, VHCN).

Zgodnie z definicją przyjętą przez Organ Europejskich Regulatorów Łączności Elektronicznej (Body of European Regulators for Electronic Communications, BEREC), sieć VHCN to sieć łączności elektronicznej, która:

- składa się w całości z elementów światłowodowych co najmniej do punktu dystrybucyjnego przy lokalizacji użytkownika, lub
- jest w stanie zapewnić w typowych warunkach szczytowego obciążenia podobną jakość działania pod względem dostępnej przepustowości (pobierania i wysyłania), odporności, parametrów błędów oraz opóźnienia i jego zmienności.

Dla takich sieci BEREC określił w przewodniku¹² zestaw minimalnych oczekiwanych wartości parametrów, które stanowią punkt odniesienia dla oceny jakości przyłączy. W przypadku sieci bezprzewodowych wartości te obejmują między innymi:

- przepływność w kierunku pobierania danych ≥ 350 Mb/s,
- przepływność w kierunku wysyłania danych ≥ 50 Mb/s,
- wskaźnik utraty pakietów IP (mierzony zgodnie z Zaleceniem ITU-T Y.1540) $\leq 0,01\%$,
- opóźnienie pakietu IP w obie strony (mierzone zgodnie z IETF RFC 2681) ≤ 18 ms,
- zmienność opóźnienia pakietów IP (mierzona zgodnie z IETF RFC 3393) ≤ 5 ms,
- dostępność usługi IP (mierzona zgodnie z Zaleceniem ITU-T Y.1540) $\geq 99,9\%$ w skali roku.

Parametry te wyznaczają minimalne wartości QoS, które sieć powinna osiągać, aby mogła zostać zakwalifikowana jako sieć o bardzo wysokiej przepustowości.

Te progi zostali wybrane jako odnośniki do oceny i porównania jakości transmisji dla każdego przyłącza. W niniejszych pomiarach wartości te zostały zmapowane na odpowiadające im wskaźniki KPI w poszczególnych kategoriach testów:

- opóźnienie pakietu IP odniesiono do wyników testów ICMP Ping,
- zmienność opóźnienia oceniono w kategorii VoIP UDP jitter,

¹¹ ITU, Zalecenie ITU-T E.800, Definitions of terms related to quality of service, 09/2008

¹² BEREC, Guidelines on Very High Capacity Networks, BoR (23) 164

- wskaźniki utraty pakietów uwzględniono w testach protokołu UDP,
- przepływność w kierunku pobierania i wysyłania została oceniona w testach pomiaru przepływności w łączy.

5.2. QoE (Quality of Experience)

ITU definiuje jakość doświadczenia (QoE) jako stopień zadowolenia użytkownika aplikacji lub usługi. Oznacza to, że QoE opisuje subiektywne postrzeganie jakości przez użytkownika, wynikające z tego, w jakim stopniu usługa spełnia jego oczekiwania pod względem użyteczności, komfortu oraz przyjemności korzystania.

Na jakość doświadczenia wpływa wiele czynników, takich jak typ i charakterystyka aplikacji, warunki użytkowania, oczekiwania użytkownika, a także czynniki psychologiczne, emocjonalne i społeczne. W praktyce jednak QoE często jest szacowane na podstawie obiektywnych parametrów technicznych, takich jak opóźnienie, przepływność czy utrata pakietów.

5.3. Przyjęte progi

5.3.1. Gry Online

W kategorii gry online zmierzono parametry, które w największym stopniu wpływają na jakość rozgrywki, przede wszystkim opóźnienie transmisji. Jest to kluczowy wskaźnik decydujący o płynności i responsywności interakcji pomiędzy graczem a serwerem. Nawet niewielkie różnice w opóźnieniu mogą wpływać na wrażenia użytkownika — od pełnej kontroli nad postacią po widoczne lagi i opóźnione reakcje.

Zostały przyjęte następujące progi jakości doświadczenia (QoE) dla gier sieciowych (Zgodnie z: Latency Thresholds for Usability in Games: A Survey¹³):

- < 50 ms – idealne warunki (brak wpływu na grę),
- 50 – 100 ms – zauważalne, ale jeszcze akceptowalne,
- 100 – 150 ms – wpływa negatywnie na doświadczenie gracza,
- >150 ms – w grach zręcznościowych (np. FPS, wyścigi) powoduje utratę płynności i precyzji.

Należy jednak zauważyć, że akceptowalny poziom opóźnienia może różnić się w zależności od rodzaju gry.

¹³ Kjetil Raaen, Latency Thresholds for Usability in Games: A Survey, NIK-2014, 2014 r.

5.3.2. DNS

W kategorii DNS (Domain Name System) oceniano czas tłumaczenia nazw domen na odpowiadające im adresy IP. Parametr ten ma bezpośredni wpływ na czas rozpoczęcia ładowania stron internetowych i aplikacji, a tym samym na ogólne wrażenie szybkości działania usług sieciowych. Nawet przy wysokiej przepustowości łącza długi czas odpowiedzi DNS może powodować wrażenie wolnego połączenia.

Zostały przyjęte następujące progi jakości doświadczenia (QoE) dla usług DNS¹⁴:

- < 120 ms – dobra jakość, odpowiedzi DNS są szybkie, strony ładują się natychmiastowo,
- 120 ms – 300 ms – jakość zadowalająca, opóźnienia mogą być zauważalne, ale nie wpływają znacząco na komfort korzystania z Internetu,
- > 300 ms – jakość niezadowalająca, użytkownik odczuwa wyraźne spowolnienie ładowania stron lub aplikacji.

5.3.3. Pomiar przepływności w łączu

W kategorii pomiar przepływności łącza oceniono przepływność w kierunku pobierania i wysyłania danych, które są kluczowymi wskaźnikami QoS. Parametry te określają rzeczywistą wydajność łącza i mają bezpośredni wpływ na komfort korzystania z usług wymagających dużej transmisji danych.

Pomiary realizowano w warstwie transportowej z wykorzystaniem protokołu TCP, który zapewnia niezawodny transfer danych. Test obejmował również krótką fazę rozgrzewki połączenia, po której mierzono ustabilizowaną przepływność.

Zgodnie z zaleceniami BEREC (BoR (23) 164) dla sieci o bardzo dużej przepustowości, progi QoS są następujące:

- przepływność w łączu w dół ≥ 350 Mb/s,
- przepływność w łączu w górę ≥ 50 Mb/s .

5.3.4. Netflix

W kategorii Netflix oceniano przepływność wymaganą do utrzymania stabilnej jakości odtwarzania materiałów wideo w różnych rozdzielczościach. Parametr ten bezpośrednio wpływa na jakość doświadczenia użytkownika — zbyt niska prędkość pobierania skutkuje buforowaniem, obniżeniem jakości obrazu lub przerwaniem transmisji.

¹⁴ IO River, Virtual Edge Solution, <https://www.ioriver.io/terms/dns-lookup-time> (dostęp: 05.11.2025 r.)

Zgodnie z zaleceniami Netflix¹⁵:

- wysoka rozdzielczość (HD, 720p) – wymaga przepływności co najmniej 3 Mb/s,
- pełna rozdzielczość (Full HD, 1080p) – wymaga przepływności co najmniej 5 Mb/s,
- ultra wysoka rozdzielczość (UHD, 4K) – wymaga przepływności co najmniej 15 Mb/s.

Przeptywność poniżej tych wartości powoduje automatyczne obniżenie jakości obrazu lub buforowanie, co znacząco pogarsza jakość doświadczenia użytkownika.

5.3.5. ICMP Ping

W kategorii ICMP Ping mierzono opóźnienie pakietu IP w obie strony (round-trip IP packet delay) zgodnie z RFC 2681. Parametr ten określa czas potrzebny na przesłanie pakietu z punktu pomiarowego do serwera i otrzymanie odpowiedzi.

Zgodnie z wytycznymi BEREC (BoR (23) 164) dla sieci o bardzo dużej przepustowości, wartość tego wskaźnika powinna spełniać następujące kryterium:

- opóźnienie pakietu (mierzone zgodnie z IETF RFC 2681) ≤ 18 ms.

Wartość ta stanowi referencyjny próg opóźnienia dla sieci klasy VHCN, pozwalający na zachowanie wysokiej jakości usług w aplikacjach czasu rzeczywistego i transmisjach interaktywnych.

5.3.6. Protokół UDP

W przypadku testu UDP pomiary realizowano zgodnie z zaleceniami BEREC, które określają zalecane metody oceny parametrów warstwy IP.

W odniesieniu do sieci o bardzo dużej przepustowości, zgodnie z Zaleceniem ITU-T Y.1540, poziom jakości transmisji powinien spełniać kryterium:

- wskaźnik utraty pakietów $\leq 0,01\%$.

Test UDP umożliwia bezpośredni pomiar tego wskaźnika, dlatego jest stosowany do oceny stabilności i niezawodności transmisji w sieciach o wysokiej przepustowości.

5.3.7. Media społecznościowe

W kategorii Media społecznościowe kluczowym parametrem oceny jest opóźnienie (latency), które wpływa na czas ładowania treści — zdjęć, filmów, komentarzy i elementów interfejsu aplikacji. Niskie wartości opóźnienia oznaczają szybkie i płynne działanie aplikacji, natomiast

¹⁵ Netflix, Szybkość Internetu zalecana przez Netflix, <https://help.netflix.com/pl/node/306> (dostęp: 30.10.2025 r.)

wysokie mogą powodować zauważalne opóźnienia w reakcji serwera lub długie czasy wczytywania treści.

Zgodnie z przyjętymi progami jakości:

- ≤ 150 ms – opóźnienie wystarczająco niskie,
- > 150 ms – niezadowalające opóźnienie.

5.3.8. VoIP UDP Jitter

W kategorii VoIP jakość transmisji głosu oceniana jest na podstawie parametrów technicznych definiowanych zarówno przez ITU-T, jak i Cisco Systems. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w przewodniku¹⁶ opracowanym przez Cisco, połączenia głosowe powinny spełniać następujące wymagania:

- jitter ≤ 30 ms – zapewnia stabilny odstęp między pakietami głosowymi,
- utrata pakietów $\leq 1\%$ – powyżej tej wartości pojawiają się zniekształcenia dźwięku.

Dodatkowo jakość rozmowy głosowej może być wyrażona za pomocą wskaźnika MOS (Mean Opinion Score), zdefiniowanego w Zaleceniu ITU-T P.800¹⁷, który opisuje subiektywną ocenę jakości dźwięku w skali od 1 (bardzo słaba) do 5 (doskonała). W praktyce:

- wartość MOS $\geq 4,0$ uznaje się za dobrą jakość rozmowy.

Należy jednak zaznaczyć, że system pomiarowy Whitebox nie dokonuje bezpośredniego pomiaru opóźnienia w ramach testów VoIP.

5.3.9. Wideokonferencja

W przypadku wideokonferencji szczególne znaczenie ma opóźnienie jednostronne (one-way delay), które wpływa na płynność komunikacji oraz synchronizację dźwięku z obrazem. Zgodnie z Zaleceniem ITU-T G.1010, wartości tego parametru klasyfikują się następująco:

- ≤ 150 ms – opóźnienie bardzo dobre, zapewniające naturalny przebieg rozmowy i brak zauważalnych przerw w interakcji między uczestnikami,
- 150–400 ms – opóźnienie akceptowalne, lecz mogące powodować lekkie opóźnienia w dialogu,
- > 400 ms – opóźnienie zbyt wysokie dla komunikacji w czasie rzeczywistym, prowadzące do zauważalnych trudności w rozmowie.

¹⁶ Cisco, Enterprise QoS Solution Reference Network Design Guide, 2005

¹⁷ ITU, Zalecenie ITU-T P.800 : Methods for subjective determination of transmission quality, 08/1996

6. Przebieg pomiarów

Pomiary jakości transmisji zostały przeprowadzone w szerokim przedziale czasowym, w okresie od 13 czerwca do 15 grudnia 2025 r. i obejmowały wszystkie analizowane wskaźniki KPI związane z jakością usług sieciowych. Pomiary realizowane były przez urządzenia Whitebox 8+ cyklicznie, w stałych odstępach czasu, z wykorzystaniem jednolitej metodyki pomiarowej dla wszystkich przyłączy, co zapewniło porównywalność wyników pomiędzy lokalizacjami oraz kategoriami długości przyłączy.

Na potrzeby realizacji pomiarów opracowano dedykowane oprogramowanie pomiarowo-analityczne, które agregowało udostępniane co 24 godziny zestawy danych pomiarowych z urządzeń Whitebox 8+. Z wykorzystaniem dedykowanych narzędzi analitycznych wyznaczono kluczowe parametry statystyczne dla każdego wskaźnika KPI, a także obliczono wskaźniki jakościowe. Na podstawie przetworzonych danych system generował wykresy czasowe i zestawienia statystyczne, które stanowiły podstawę dalszej analizy jakości łączy. Rozwiązanie takie pozwoliło na podejmowanie szybkich działań naprawczych po stwierdzeniu awarii któregoś z przyłączy.

W całym okresie pomiarowym odnotowano kilkanaście drobnych awarii. Dotyczyły one głównie problemów z osprzętem dodatkowym, tj. awaria zasilacza, awaria kabla antenowego, poluzowanie się złączy antenowych wskutek wiatru, brak zasilania. Większość problemów zidentyfikowano w ciągu kolejnego dnia roboczego od ich wystąpienia, dzięki codziennym analizom wyników z ostatniej doby. Problemy były rozwiązywane niezwłocznie po zgłoszeniu do podwykonawcy.

W pierwszych tygodniach pomiarów osiągnęte wyniki nie we wszystkich przypadkach spełniały przyjęte kryteria jakościowe. Po przeprowadzeniu analiz wykazano, że 6 z 10 przyłączy charakteryzowało się ograniczoną przepływnością, co jak ustalono, wynikało z błędu konfiguracji. Po znalezieniu przyczyny, problem niezwłocznie usunięto.

W początkowym okresie realizacji pomiarów przyłącza pracujące w paśmie 5 GHz były skonfigurowane z szerokością kanału 40 MHz. Uzyskane przepływności były jednak niższe od zakładanych progów (300/100 Mb/s odpowiednio w łączy w dół i w łączy w górę), dlatego w lipcu 2025 r. podjęto decyzję o rekonfiguracji i rozszerzeniu szerokości kanału do 80 MHz. Zmiana ta została przeprowadzona w następujących terminach:

- przyłącze nr 3 – 8 lipca 2025 r.
- przyłącza nr 4, 7 i 8 – 25 lipca 2025 r.

Działanie to miało na celu przywrócenie zakładanych parametrów jakościowych i stanowi ważny element praktycznych doświadczeń zdobytych podczas realizacji wdrożenia.

W związku z przebiegiem pomiarów, podjęto decyzję o ograniczeniu raportowania wyników do okresu od 27 lipca do końca trwania pomiarów, tj. do dnia 15 grudnia 2025 r.

7. Wyniki pomiarów

W rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów dla poszczególnych kategorii w okresie od 27 lipca do 15 grudnia 2025 r. Dane zaprezentowano w formie tabel zawierających wybrane wskaźniki KPI oraz wykresów ilustrujących uśrednione dzienne wartości pomiarów, co umożliwia bardziej przejrzystą analizę zmian w czasie.

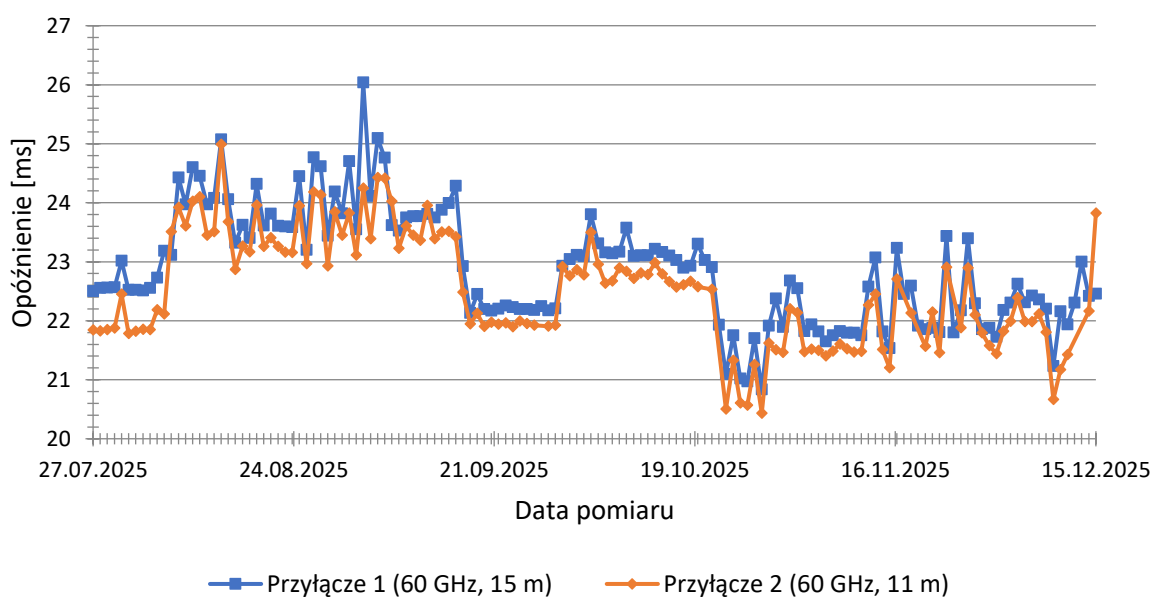
W przypadku kategorii takich jak gry online, usługi CDN oraz wideokonferencje, uwzględniono wyniki uzyskane od wszystkich dostawców.

7.1. Gry online

7.1.1. Przyłącza 10-20 m

Tabela 4. Wyniki pomiarów dla kategorii gry online

	Przyłącze	1	2
	Okres	27.07-15.12	
Gry online	Mediana opóźnień [ms]	24	24
	Średnia opóźnień [ms]	23	22
	10. percentyl opóźnienia [ms]	10	9
	90. percentyl opóźnienia [ms]	29	29
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100



Rysunek 4. Średnia dobową opóźnień dla kategorii gry online

Na podstawie progów oceny jakości przyjętych w rozdziale 5, odnoszących się do analizowanych parametrów, istotnych dla gier online oraz parametrów technicznych analizowanych połączeń stwierdzono, że oba przyłącza bezprzewodowe pracujące w paśmie 60 GHz, o długości łącza równej 15 m oraz 11 m (rozumianej jako odległość od anteny nadawczej do odbiornika), zapewniają bardzo wysoką jakość transmisji. Zarejestrowane wartości opóźnień w całym okresie pomiarowym charakteryzują się medianą 24 ms dla obu przyłączy, przy czym nawet wartości odpowiadające 90. percentylowi nie przekraczają 29 ms. Oznacza to, że opóźnienia w całym analizowanym okresie pozostają wyraźnie poniżej progu 50 ms, który definiuje idealne warunki dla gier online.

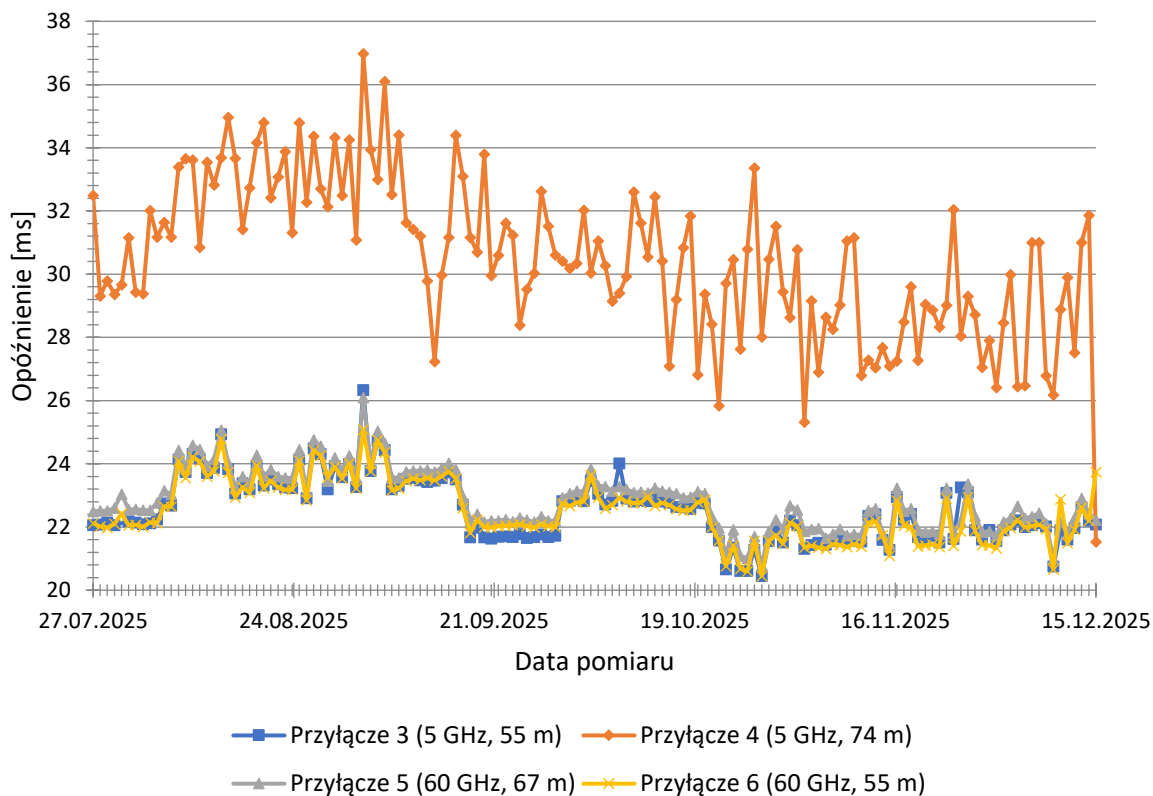
Dla dobowych wartości średnich nie odnotowano przekroczeń progów akceptowalnych, a wskaźnik sukcesu równy 100% potwierdza stabilną pracę łączy. Wykorzystanie pasma milimetrowego 60 GHz, charakteryzującego się wyższą wrażliwością na warunki propagacyjne, nie miało istotnego wpływu na jakość transmisji dla tak krótkiej trasy radiowej. Ponadto różnica długości łączy pomiędzy 11 m a 15 m nie ma wpływu na spełnienie przyjętych kryteriów jakościowych.

W konsekwencji analizowane przyłącza spełniają wymagania jakościowe dla gier online w sposób ciągły i mogą zostać jednoznacznie zakwalifikowane jako zapewniające idealne warunki rozgrywki, bez zauważalnego wpływu opóźnień na płynność i precyzję sterowania.

7.1.2. Przyłącza 50-100 m

Tabela 5. Wyniki pomiarów dla kategorii gry online

		Przyłącze	3	4	5	6
		Okres	27.07-15.12			
Gry online	Mediana opóźnień [ms]		24	24	24	24
	Średnia opóźnień [ms]		23	31	23	22
	10. percentyl opóźnienia [ms]		10	9	10	10
	90. percentyl opóźnienia [ms]		29	36	29	29
	Wskaźnik sukcesu [%]		100	100	100	100



Rysunek 5. Średnia dobowa opóźnień dla kategorii gry online

Dla wszystkich przyłączy mediana opóźnień wynosi 24 ms, co oznacza, że typowe wartości czasu przesłania pakietu od nadawcy do odbiorcy i z powrotem (Round Trip Time, RTT) pozostają poniżej progu 50 ms, definiującego idealne warunki dla gier online. W przypadku przyłączy 3, 5 i 6 średnie opóźnienia mieszczą się w zakresie 22–23 ms, a 90. percentyl nie przekracza 29 ms, co jednoznacznie kwalifikuje te łącza jako idealne do zapewnienia idealnych warunków rozgrywki w całym okresie pomiarowym.

Odmianą charakterystyką cechuje się przyłącze 4 pracujące w paśmie 5 GHz na dystansie 74 m. Średnie opóźnienie wynosi tu 31 ms, a 90. percentyl osiąga 36 ms, co nadal pozostaje poniżej granicy 50 ms, jednak wskazuje na nieco wyższy poziom opóźnień w porównaniu z pozostałymi przyłączami. Zgodnie z przyjętymi progami wartości te wciąż mieszczą się w zakresie idealnych warunków dla gier online, choć z mniejszym marginesem.

W całym analizowanym okresie nie odnotowano przekroczeń progów akceptowalnych dla żadnego z przyłączy, a wskaźnik sukcesu równy 100% potwierdza stabilną pracę połączeń. Wyniki wskazują, że zarówno przyłącza 60 GHz na dystansach do 67 m, jak i przyłącza 5 GHz na krótszych dystansach, zapewniają bardzo dobrą jakość transmisji dla gier online, natomiast jedno z przyłączy w paśmie 5 GHz cechowało się wyższymi opóźnieniami, choć nadal bez wpływu na komfort rozgrywki.

7.1.3. Przyłącza >150m

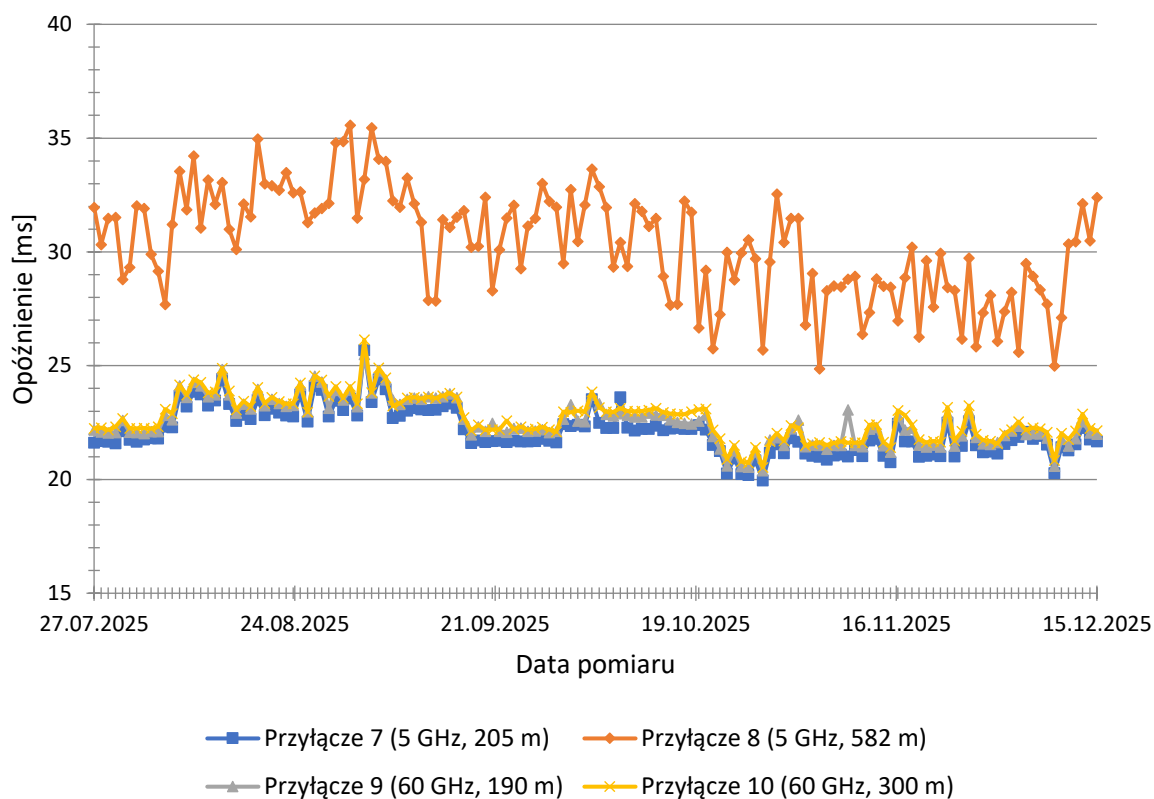
Tabela 6. Wyniki pomiarów dla kategorii gry online

Przyłącze		7	8	9	10
Okres		27.07-15.12			
Gry online	Mediana opóźnień [ms]	23	24	24	24
	Średnia opóźnień [ms]	22	30	23	23
	10. percentyl opóźnienia [ms]	9	9	10	10
	90. percentyl opóźnienia [ms]	28	36	29	29
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100	100	99,99

Wartości opóźnień obserwowane w całym okresie pomiarowym wskazują, że dominujący poziom RTT dla wszystkich analizowanych przyłączy utrzymuje się na bardzo niskim poziomie. Mediany mieszczące się w zakresie 23–24 ms potwierdzają, że spełniono kryterium dopuszczalnych wartości opóźnień < 50 ms, odpowiadające idealnym warunkom dla gier online. Dla przyłączy 7, 9 i 10 zarówno wartości średnie, jak 90. percentyl pozostają poniżej 30 ms, co świadczy o niewielkiej zmienności opóźnień i stabilnym charakterze połączeń mimo znacznych długości łączy.

Wyższe wartości opóźnień odnotowano dla przyłącza 8, pracującego w paśmie 5 GHz na dystansie 582 m. W tym przypadku średnie opóźnienie wzrasta do 30 ms, a 90. percentyl osiąga 36 ms, co jednak nadal jest wynikiem satysfakcjonującym. Mimo obserwowanego wzrostu, wartości te nadal mieszczą się w przedziale uznawanym za idealny dla gier online, jednak wskazują na zmniejszenie marginesu jakościowego wraz ze wzrostem długości łączy w paśmie 5 GHz.

Analiza całego okresu pomiarowego nie wykazała przekroczeń progów jakościowych dla żadnego z połączeń. Bardzo wysoki wskaźnik sukcesu, wynoszący 100% (przyłącza 7, 8, 9) oraz 99,99% (przyłącze 10), potwierdza ciągłość i niezawodność transmisji. Uzyskane wyniki pokazują, że nawet w przypadku łączy o długości kilkuset metrów możliwe jest spełnienie wymagań gier online.



Rysunek 6. Średnia dobowa opóźnień dla kategorii gry online

7.2. DNS

7.2.1. Przyłącza 10-20 m

Tabela 7. Wyniki pomiarów dla kategorii DNS

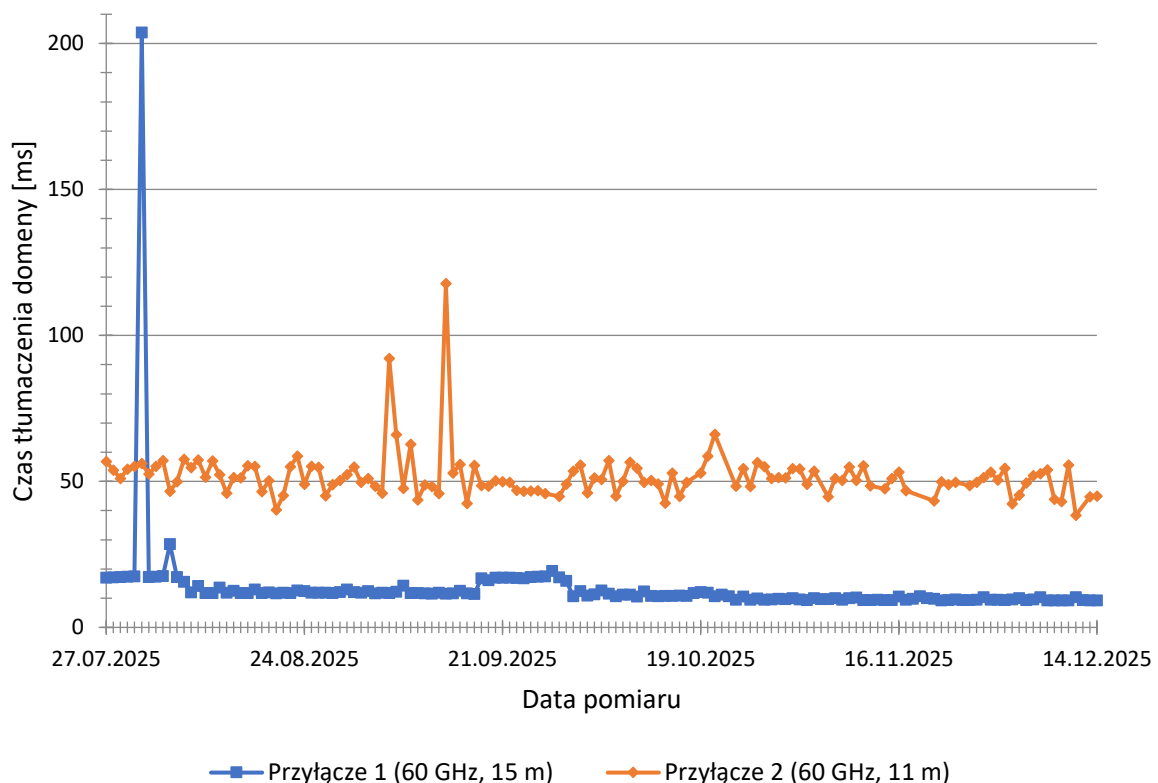
		Przyłącze	
		1	2
Okres		27.07-15.12	
DNS	Średnia czasu tłumaczenia domeny [ms]	13	52
	Mediana czasu tłumaczenia domeny [ms]	11	48
	10. percentyl czasu tłumaczenia domeny [ms]	9	13
	90. percentyl czasu tłumaczenia domeny [ms]	17	79
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,98	99,94

Na podstawie przyjętych kryteriów jakościowych dla usługi DNS przeprowadzono ocenę dwóch bezprzewodowych przyłączy pracujących w paśmie 60 GHz, o długościach 15 m oraz 11 m. W przypadku przyłącza 1 wartości czasu tłumaczenia nazw domen, opisywana medianą

na poziomie 11 ms oraz 90. percentylem równym 17 ms, są wyraźnie niższe od granicznego progu 120 ms. Oznacza to, że jakość realizacji usługi DNS dla tego przyłącza mieści się w zakresie uznawanym za dobrą. Na wykresie poniżej widoczny jest jeden dzień w całym okresie pomiarowym, kiedy średni czas odpowiedzi DNS przekracza wartość 200 ms, co wskazuje na krótkotrwałe przekroczenie zakresu dobrej jakości oraz osiągnięcie poziomu opóźnień potencjalnie odczuwalnych dla użytkownika.

W przypadku przyłącza 2 średnie i medianowe czasy tłumaczenia domeny wynoszą odpowiednio 52 ms i 48 ms, a 90. percentyl osiąga 79 ms, co mieści się w przedziale < 120 ms i kwalifikuje jakość usługi jako dobrą. Na wykresie obserwowane są dwa dni w całym okresie pomiarowym, kiedy średnie opóźnienie zbliża się do wartości 120 ms, a pojedyncze przekroczenia wskazują na chwilowe pogorszenie jakości. Nie są one długotrwałe i nie dominują w całym okresie pomiarowym.

Uwzględniając cały okres obserwacji oraz wskaźniki sukcesu na poziomie 99,98% i 99,94%, oba przyłącza spełniają wymagania jakościowe dla usługi DNS zgodnie z przyjętymi progami. Należy jednak zaznaczyć, że obecność pojedynczych zdarzeń z opóźnieniami przekraczającymi wartość 120 ms, a w jednym przypadku sięgających około 200 ms, wskazuje na incydentalne pogorszenia jakości, które mogą być krótkotrwałe odczuwalne przez użytkownika, choć nie wpływają na ogólną klasyfikację jakości usługi.



Rysunek 7. Średnia dobowa czasu tłumaczenia domeny dla kategorii DNS

7.2.2. Przyłącza 50-100 m

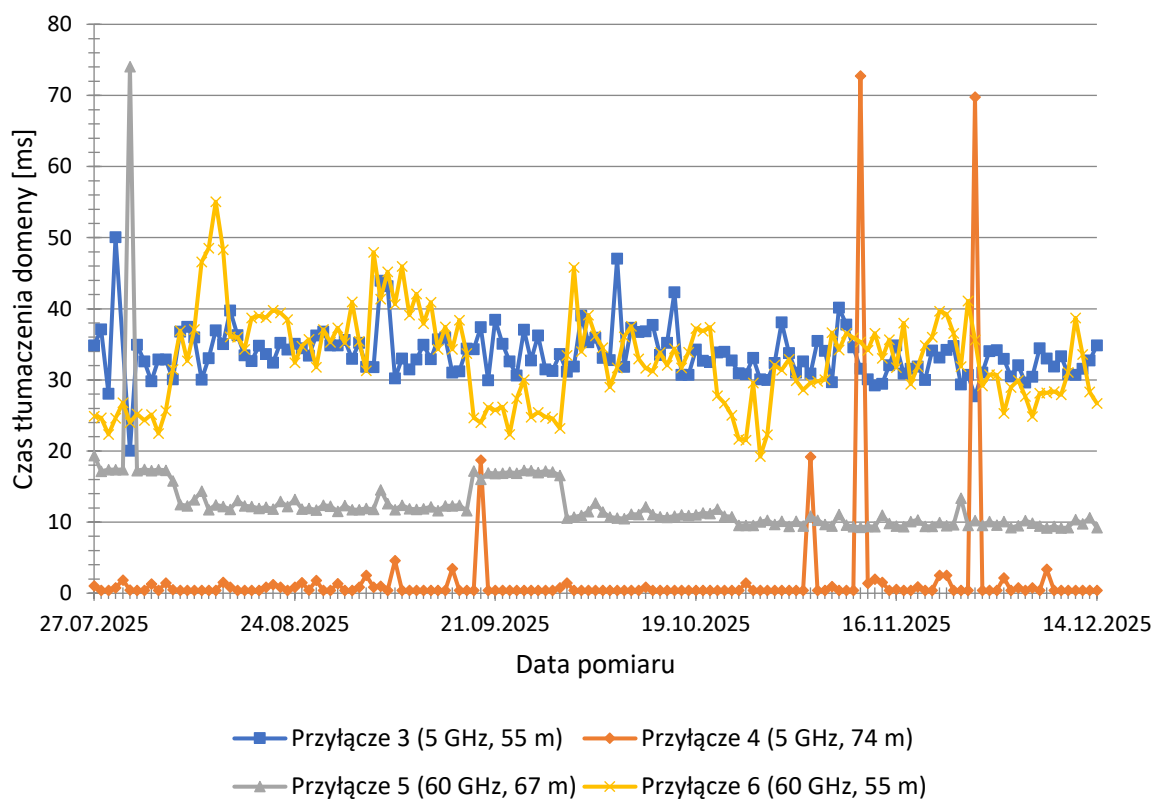
Tabela 8. Wyniki pomiarów dla kategorii DNS

Przyłącze		3	4	5	6
Okres		27.07-15.12			
DNS	Średnia czasu tłumaczenia domeny [ms]	34	2	12	33
	Mediana czasu tłumaczenia domeny [ms]	23	0	11	1
	10. percentyl czasu tłumaczenia domeny [ms]	9	0	9	1
	90. percentyl czasu tłumaczenia domeny [ms]	70	1	17	80
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,73	100	99,97	100

Dla przyłącza 3 (5 GHz, 55 m) mediana czasu tłumaczenia domeny wynosi 23 ms, a 90. percentyl 70 ms, co wskazuje na okresowe wzrosty opóźnień, jednak w całości mieszczące się w zakresie wartości parametrów uznawanych za prawidłowe dla usługi DNS. Przyłącze 4 (5 GHz, 74 m) charakteryzuje się bardzo niskimi wartościami typowymi, lecz na wykresie widoczne są sporadyczne wzrosty wartości średnich w dwóch dniach w całym okresie pomiaru, sięgające kilkudziesięciu milisekund. Mimo tego nie występują przekroczenia progu 120 ms.

W przypadku przyłącza 5 (60 GHz, 67 m) czasy odpowiedzi DNS są stabilne, z medianą 11 ms i 90. percentylem równym 17 ms, co jednoznacznie spełnia kryterium dobrej jakości. Przyłącze 6 (60 GHz, 55 m) wykazuje większą zmienność, czego potwierdzeniem jest 90. percentyl na poziomie 80 ms, jednak wszystkie obserwowane wartości pozostają poniżej 120 ms.

Uwzględniając cały okres pomiarowy oraz wysokie wskaźniki sukcesu, wszystkie analizowane przyłącza spełniają wymagania jakościowe dla usługi DNS, a sporadyczne krótkotrwałe wzrosty opóźnień nie wpływają na ogólną ocenę jakości tłumaczenia nazw domen.



Rysunek 8. Średnia dobową czasu tłumaczenia domeny dla kategorii DNS

7.2.3. Przyłącza >150m

Tabela 9. Wyniki pomiarów dla kategorii DNS

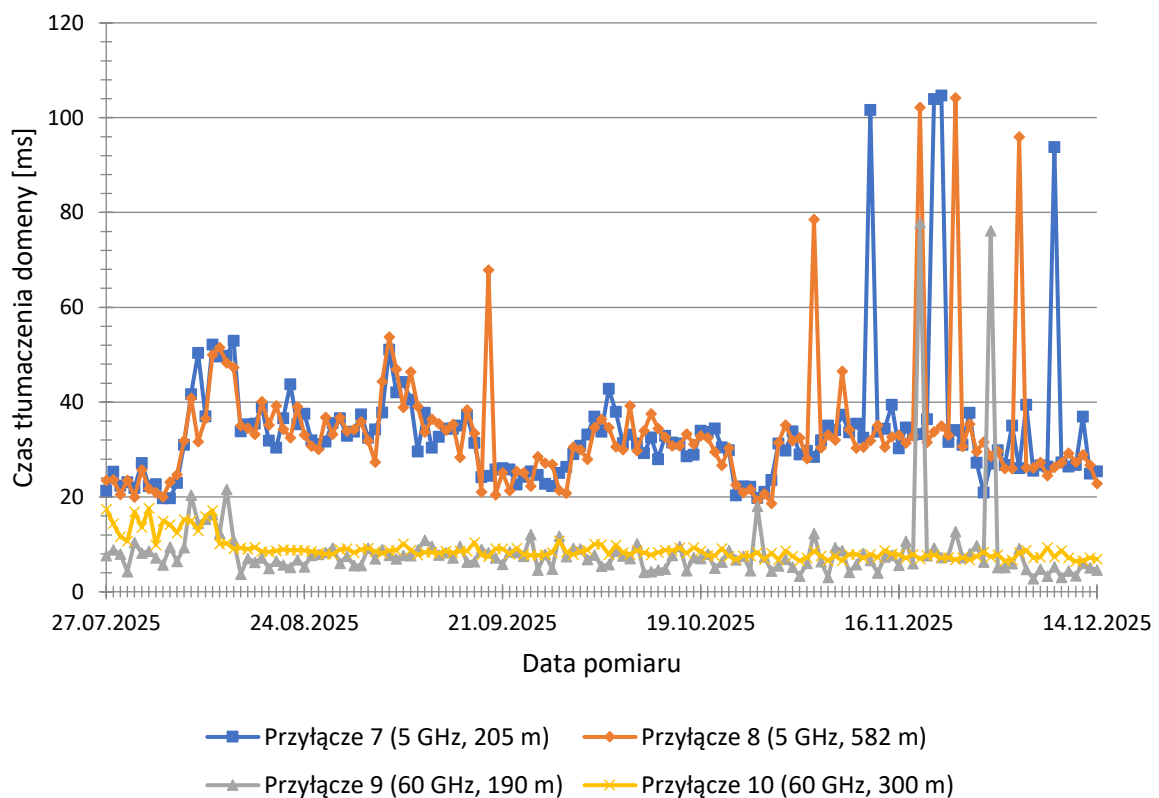
Przyłącze		7	8	9	10
Okres		27.07-15.12			
DNS	Średnia czasu tłumaczenia domeny [ms]	34	33	9	9
	Mediana czasu tłumaczenia domeny [ms]	1	1	1	10
	10. percentyl czasu tłumaczenia domeny [ms]	0	0	1	1
	90. percentyl czasu tłumaczenia domeny [ms]	80	80	13	11
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100	100	100

Dla przyłączy 7 i 8 obserwowane czasy tłumaczenia domeny charakteryzują się wyraźnie większą zmiennością niż w pozostałych przypadkach. Średnie wartości na poziomie około 33–34 ms oraz 90. percentyl równy 80 ms wskazują na występowanie krótkotrwałych epizodów podwyższonych opóźnień, co znajduje potwierdzenie w widocznych na wykresie poniżej wzroście średnich wartości sięgających do około 100 ms w wybranych dniach. Mimo tych

zdarzeń nie dochodzi do przekroczenia progu wartości 120 ms, a więc jakość usługi DNS pozostaje w zakresie uznawanym za dobrą.

Przyłącza 9 i 10 wykazują znacznie stabilniejsze zachowanie. Czasy odpowiedzi DNS utrzymują się na niskim poziomie, z wartościami charakterystycznymi rzędu kilku–kilkunastu milisekund. Rozkład uzyskanych wyników wskazuje na duży margines względem przyjętych progów jakościowych.

W całym okresie pomiarowym nie wystąpiły opóźnienia kwalifikujące usługę DNS jako niezadowalającą, a wszystkie analizowane przyłącza spełniają wymagania jakościowe.



Rysunek 9. Średnia dobową czasu tłumaczenia domeny dla kategorii DNS

7.3. Pomiar przepływności w łączy

7.3.1. Przyłącza 10-20 m

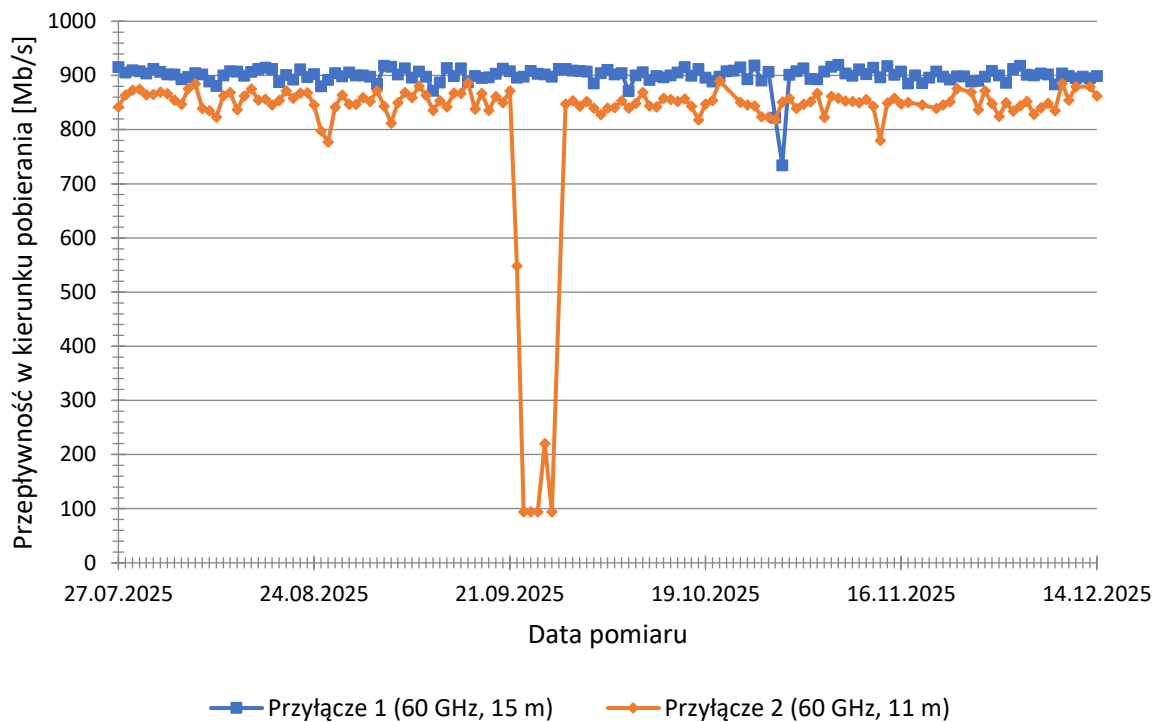
Tabela 10. Wyniki pomiarów dla kategorii test przepływności łączy

		Przyłącze	1	2
		Okres	27.07-15.12	
Pomiar przepływności łączy	Pobieranie	Średnia przepływność [Mb/s]	900	809
		Mediana przepływności [Mb/s]	921	847
		10. percentyl przepływności [Mb/s]	834	783
		90. percentyl przepływności [Mb/s]	929	910
		Wskaźnik sukcesu [%]	100	99,95
	Wysyłanie	Średnia przepływność [Mb/s]	768	722
		Mediana przepływności [Mb/s]	767	759
		10. percentyl przepływności [Mb/s]	745	732
		90. percentyl przepływności [Mb/s]	792	780
		Wskaźnik sukcesu [%]	100	99,9

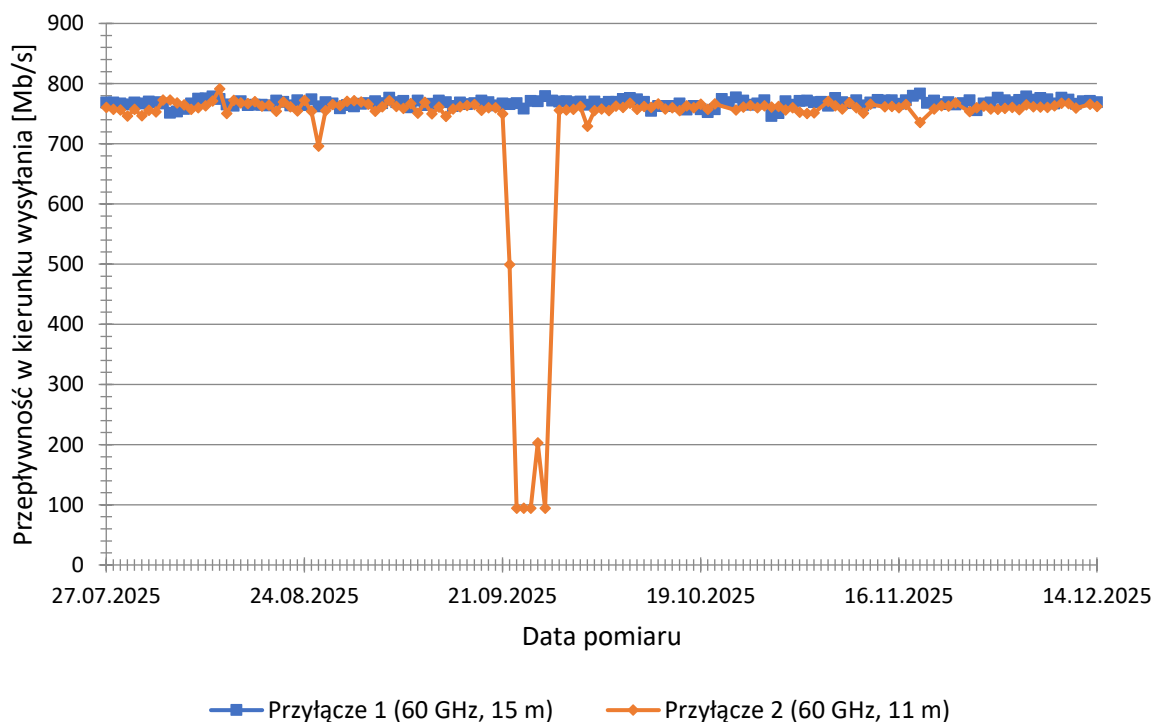
Uzyskane wyniki przepływności dla obu przyłączy potwierdzają bardzo wysoki poziom realizowanej transmisji, znacząco przekraczający progi określone przez BEREC dla sieci o bardzo dużej przepustowości. Zarówno w kierunku pobierania, jak i wysyłania typowe wartości przepływności obejmujące medianę oraz wartości charakterystyczne dla gorszych warunków transmisyjnych utrzymują się na poziomie rzędu kilkuset megabitów na sekundę.

Zaobserwowane na wykresach krótkotrwałe, głębokie spadki przepływności dla przyłącza 2 i zmniejszenie prędkości około 100 Mb/s, występują w dniach 22 – 29 września wynikają bezpośrednio z awarii kabla, która skutkowałą obniżeniem przepływności, ale nie spowodowała całkowitego rozłączenia połączenia. Po usunięciu awarii, w dniu 29 września, parametry transmisji powróciły do wcześniejszych, stabilnych wartości. Charakter tych spadków wskazuje jednoznacznie na przyczynę poza sieciową, niezwiązaną z jakością łączy radiowego.

Po wyeliminowaniu awarii przepływność w obu kierunkach ponownie utrzymuje się na poziomie znacznie przekraczającym wymagania VHCN, co potwierdzają zarówno mediany, jak i wysokie wskaźniki sukcesu (bliskie 100%). W konsekwencji obserwowane incydenty nie wpływają na końcową ocenę jakości łączy, a analizowane przyłącza 60 GHz na dystansach 11–15 m spełniają wymagania w zakresie przepływności z dużym marginesem.



Rysunek 10. Średnia dobowa przepływność łącza w dół dla kategorii test przepływności łącza



Rysunek 11. Średnia dobowa przepływność łącza w górę dla kategorii test przepływności łącza

7.3.2. Przyłącza 50-100 m

Tabela 11. Wyniki pomiarów dla kategorii test przepływności łącza

		Przyłącze	3	4	5	6
		Okres	27.07-15.10			
Pomiar przepływności łącza	Pobieranie	Średnia przepływność [Mb/s]	307	506	898	513
		Mediana przepływności [Mb/s]	309	519	918	519
		10. percentyl przepływności [Mb/s]	309	505	834	518
		90. percentyl przepływności [Mb/s]	310	519	930	519
		Wskaźnik sukcesu [%]	99,7	99,85	100	99,82
	Wysyłanie	Średnia przepływność [Mb/s]	119	203	744	207
		Mediana przepływności [Mb/s]	119	208	746	208
		10. percentyl przepływności [Mb/s]	119	208	721	208
		90. percentyl przepływności [Mb/s]	119	208	766	208
		Wskaźnik sukcesu [%]	99,7	99,97	100	99,91

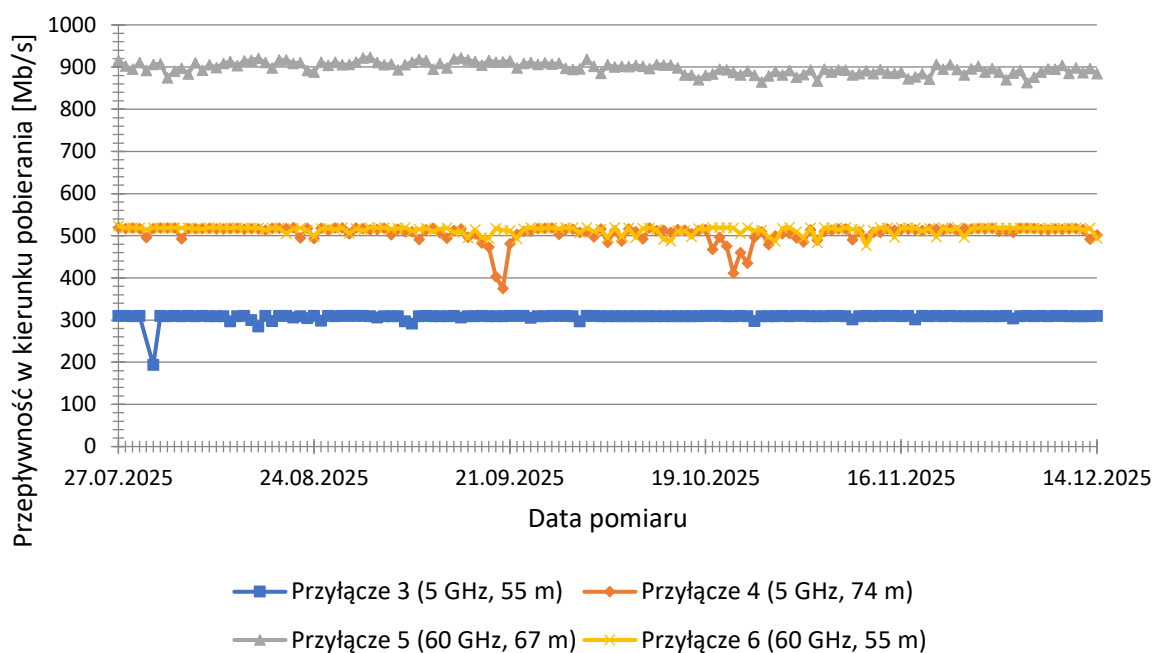
Dla przyłącza 3 (5 GHz, 55 m) wartości przepływności w łączu w dół oscylują wokół 300 Mb/s, a w łączu w górę około 120 Mb/s. Oznacza to, że w kierunku wysyłania wymagania BEREC (≥ 50 Mb/s) są spełnione z dużym zapasem, natomiast w kierunku pobierania przepływność znajduje się poniżej progu 350 Mb/s, co kwalifikuje to przyłącze jako niespełniające kryterium VHCN w łączu w dół, mimo stabilnego charakteru transmisji.

Przyłącze 4 (5 GHz, 74 m) osiąga wyższe wartości – około 500 Mb/s w łączu dół oraz 200 Mb/s w łączu w górę. Zarówno wartości median, jak i percentyle spełniają wymagania VHCN w obu kierunkach. Widoczne na wykresach krótkotrwałe spadki przepływności nie wpływają na ogólną klasyfikację, co dodatkowo potwierdzają wysokie wskaźniki sukcesu.

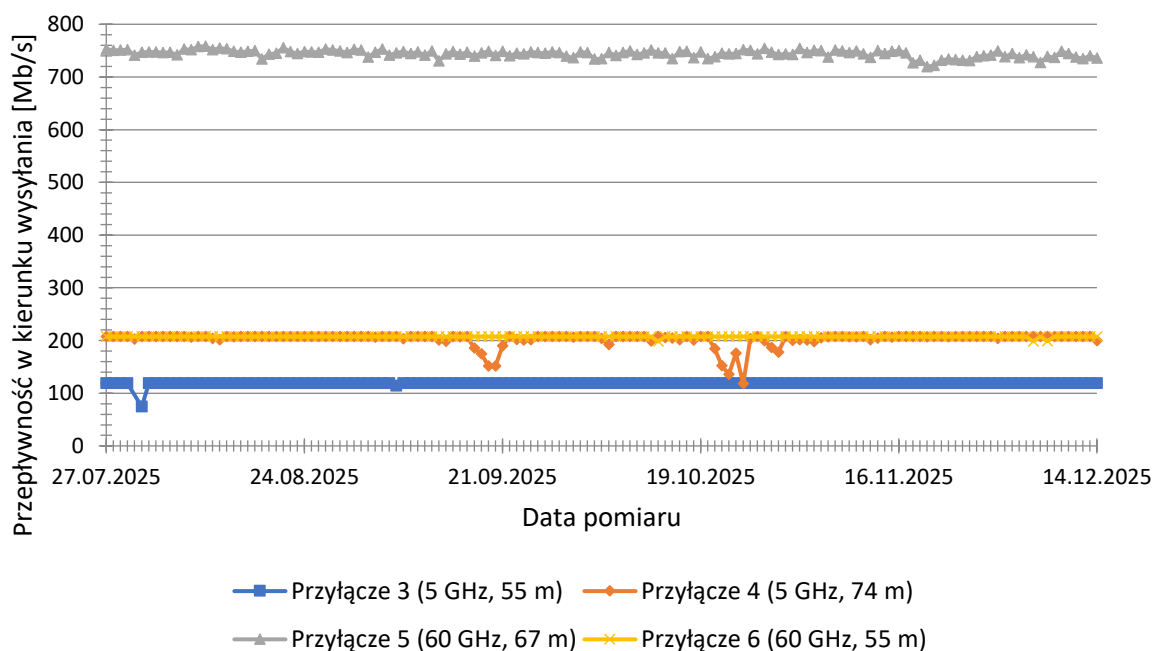
Najlepsze wyniki uzyskano dla przyłącza 5 (60 GHz, 67 m). Przepływność w łączu w dół utrzymuje się na poziomie około 900 Mb/s, a w łączu w górę około 740 Mb/s, z bardzo niską rozpiętością wartości. Cały rozkład wyników znajduje się znacząco powyżej progów BEREC, co jednoznacznie klasyfikuje to przyłącze jako spełniające wymagania VHCN z bardzo dużym marginesem.

Przyłącze 6 (60 GHz, 55 m) osiąga przepływności rzędu 510 Mb/s w łączy w dół i 200 Mb/s w łączy w górę. Parametry te również spełniają wymagania VHCN w obu kierunkach, choć z mniejszym marginesem niż w przypadku przyłącza 5. Sporadyczne obniżenia przepływności nie mają charakteru trwałego i nie wpływają na ocenę końcową.

Podsumowując, wszystkie analizowane przyłącza spełniają wymagania BEREC w zakresie wysyłania, natomiast w kierunku pobierania kryterium VHCN nie jest spełnione jedynie dla Przyłącza 3 w paśmie 5 GHz.



Rysunek 12. Średnia dobowa przepływność łączy w dół dla kategorii test przepływności łączy



Rysunek 13. Średnia dobowa przepływność łącza w górę dla kategorii test przepływności łącza

7.3.3. Przyłącza >150m

Tabela 12. Wyniki pomiarów dla kategorii test przepływności łącza

		Przyłącze	7	8	9	10
		Okres	27.07-15.12			
Pomiar przepływności łącza	Pobieranie	Średnia przepływność [Mb/s]	513	507	513	566
		Mediana przepływności [Mb/s]	519	519	519	569
		10. percentyl przepływności [Mb/s]	515	509	515	559
		90. percentyl przepływności [Mb/s]	519	519	519	572
		Wskaźnik sukcesu [%]	99,85	99,91	99,97	100
	Wysyłanie	Średnia przepływność [Mb/s]	237	197	207	570
		Mediana przepływności [Mb/s]	208	203	208	571
		10. percentyl przepływności [Mb/s]	208	179	207	568
		90. percentyl przepływności [Mb/s]	208	208	208	573
		Wskaźnik sukcesu [%]	99,94	99,82	99,94	100

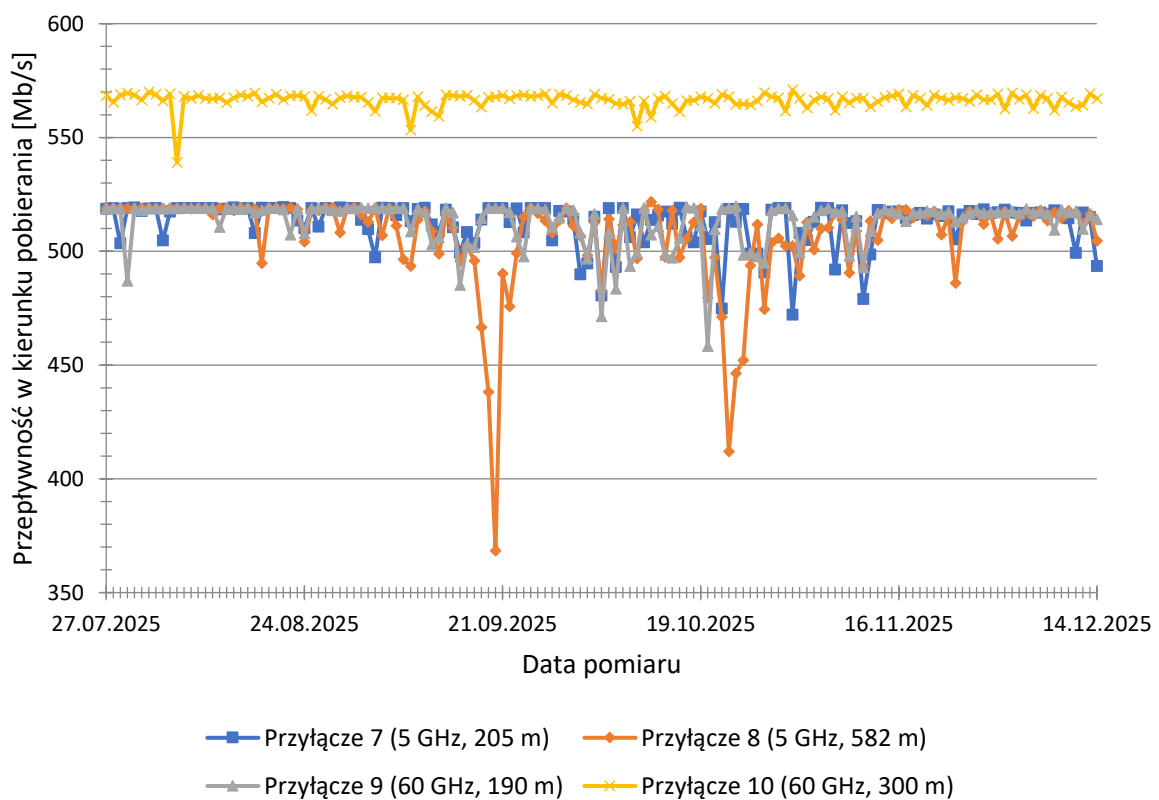
Wyniki dla przyłączy o długościach powyżej 150 m wskazują na spełnienie wymagań dla VHCN, jednak z wyraźnymi różnicami w stabilności transmisji pomiędzy poszczególnymi przyłączami.

Dla przyłączy 7 i 8 (5 GHz) przepływność w kierunku pobierania utrzymuje się na poziomie około 510–520 Mb/s, co spełnia próg 350 Mb/s. Jednocześnie na wykresach widoczne są krótkotrwałe spadki, wyraźniej zaznaczone dla przyłącza 8. W kierunku wysyłania przyłącze 7 zachowuje stabilne wartości rzędu 230–240 Mb/s, natomiast przyłącze 8 wykazuje incydentalne obniżenie przepływności poniżej 150 Mb/s, co oznacza chwilowe pogorszenie jakości transmisji w łączu w górę. Mimo tego nawet w trakcie tych zdarzeń przepływność pozostaje powyżej minimalnego progu 50 Mb/s wymaganego przez BEREC, a zdarzenia mają charakter krótkotrwały. 10. percentyl dla przyłącza 8, w kierunku łącza w górę pozostaje na poziomie 179 Mb/s, co oznacza że 90% otrzymanych wyników pomiarów było powyżej tej wartości.

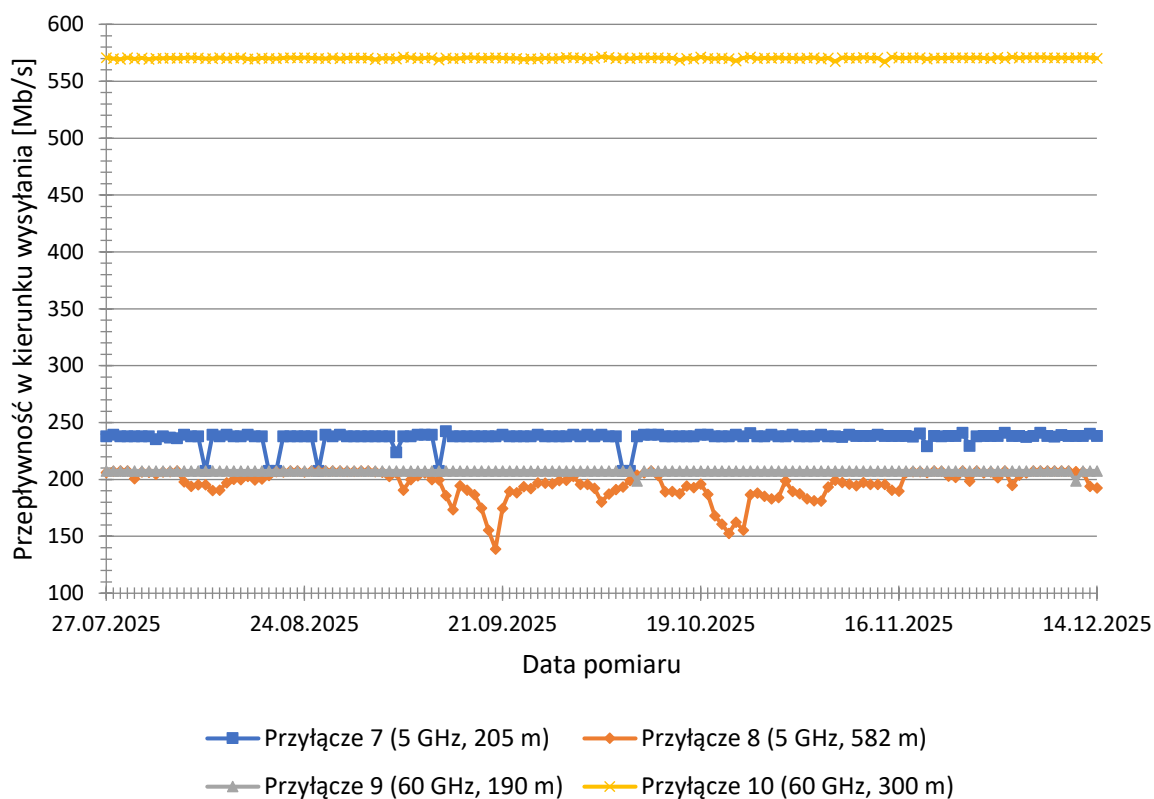
Przyłącze 9 (60 GHz, 190 m) charakteryzuje się stabilną pracą w obu kierunkach, z przepływnością około 510 Mb/s w łączu w dół oraz 200–210 Mb/s w łączu w górę, bez istotnych spadków naruszających wymagania jakościowe.

Najbardziej jednorodne wyniki uzyskano dla przyłącza 10 (60 GHz, 300 m), gdzie zarówno w kierunku pobierania, jak i wysyłania przepływność utrzymuje się na poziomie około 570 Mb/s, bez obserwowanych okresów degradacji jakości transmisji.

Podsumowując, wszystkie analizowane przyłącza spełniają wymagania BEREC w zakresie przepływności, jednak przyłącze 8 wyróżnia się największą zmiennością, w tym pojedynczymi spadkami przepływności w kierunku wysyłania poniżej 150 Mb/s, co wskazuje na mniejszy margines jakościowy w porównaniu z pozostałymi połączeniami, zwłaszcza tymi pracującymi w paśmie 60 GHz.



Rysunek 14. Średnia dobową przepływność łącza w dół dla kategorii test przepływności łącza



Rysunek 15. Średnia dobowa przepływność łącza w górę dla kategorii test przepływności łącza

7.4. Netflix

7.4.1. Przyłącza 10-20 m

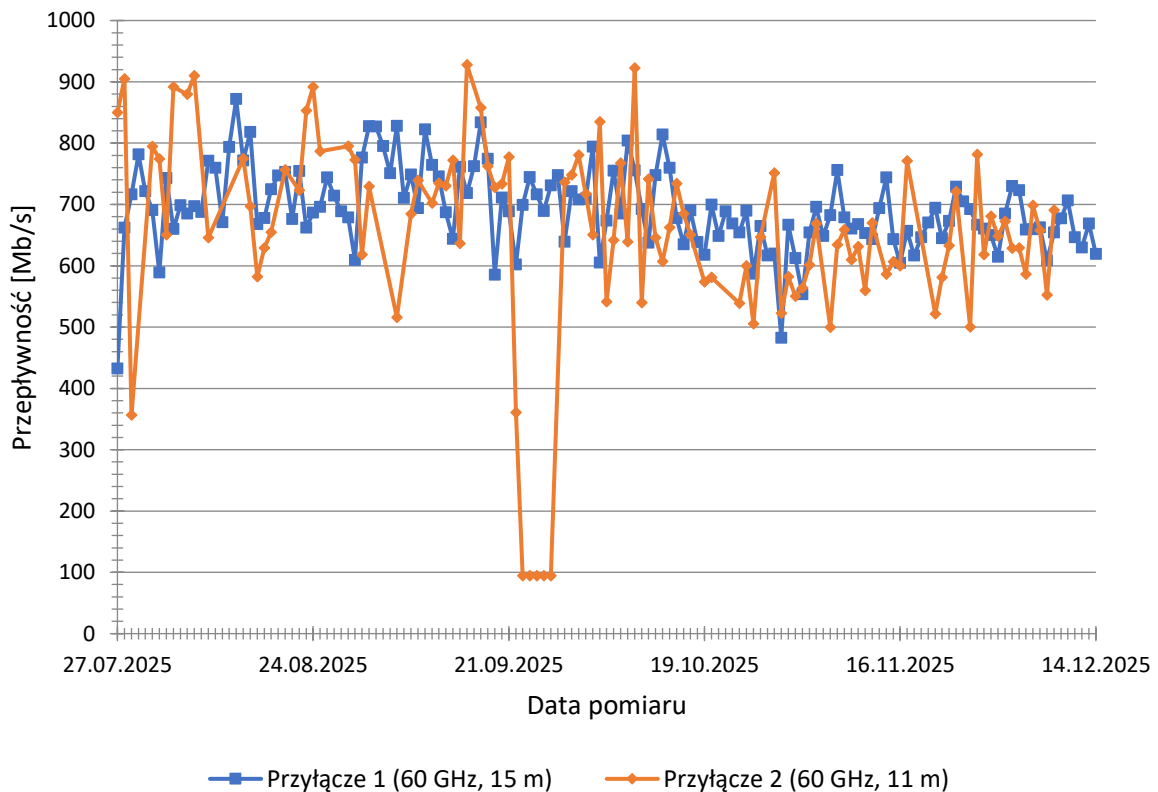
Tabela 13. Wyniki pomiarów dla kategorii Netflix

	Przyłącze	1	2
	Okres	27.07-15.12	
Netflix	Średnia przepływność [Mb/s]	693	636
	Mediana przepływności [Mb/s]	707	652
	10. percentyl przepływności [Mb/s]	500	434
	90. percentyl przepływności [Mb/s]	895	892
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100

Wyniki dla kategorii Netflix wskazują, że oba przyłącza zapewniają przepływność wielokrotnie przewyższającą wymagania dla wszystkich dostępnych rozdzielczości strumieniowania, w tym

UHD (4K). Zarówno wartości średnie, jak i mediany przepływności utrzymują się na poziomie powyżej 600 Mb/s, co oznacza bardzo duży margines względem minimalnego progu 15 Mb/s. Dla przyłącza 1 10. percentyl przepływności wynosi 500 Mb/s, natomiast dla przyłącza 2 wynosi 434 Mb/s, co potwierdza, że nawet w najmniej korzystnych warunkach przepływność pozostaje nieporównywalnie wyższa od wymagań usługi Netflix dla strumieniowania UHD. Widoczne na wykresie krótkotrwałe spadki przepływności, w tym okresowe obniżenie do poziomu około 100 Mb/s (spowodowany kilkudniową awarią) dla przyłącza 2, nie prowadzą do przekroczenia minimalnych wymagań nawet dla najwyższej jakości obrazu i mają charakter incydentalny.

W całym okresie pomiarowym wskaźnik sukcesu wynosi 100% dla obu przyłączy, co potwierdza brak przerw w dostępności usługi. W konsekwencji oba przyłącza 60 GHz na dystansach od 11 do 15 m zapewniają warunki umożliwiające płynne odtwarzanie treści Netflix w jakości UHD bez ryzyka buforowania lub obniżenia jakości obrazu, a obserwowane wahania przepływności nie wpływają na odbiór usługi.



Rysunek 16. Średnia dobową przepływność łącza w dół dla kategorii Netflix

7.4.2. Przyłącza 50-100 m

Tabela 14. Wyniki pomiarów dla kategorii Netflix

Przyłącze		3	4	5	6
Okres		27.07-15.12			
Netflix	Średnia przepływność [Mb/s]	285	447	698	474
	Mediana przepływności [Mb/s]	310	476	705	492
	10. percentyl przepływności [Mb/s]	253	352	519	401
	90. percentyl przepływności [Mb/s]	310	518	894	519
	Wskaźnik sukcesu [%]	97,03	100	100	99,81

Dla przyłączy o długościach od 50 do 100 m wszystkie analizowane połączenia zapewniają przepływność wielokrotnie przekraczającą wymagania usługi Netflix, również dla strumieniowania w jakości UHD (4K). Nawet najniższe wartości charakterystyczne pozostają z bardzo dużym zapasem względem progu 15 Mb/s.

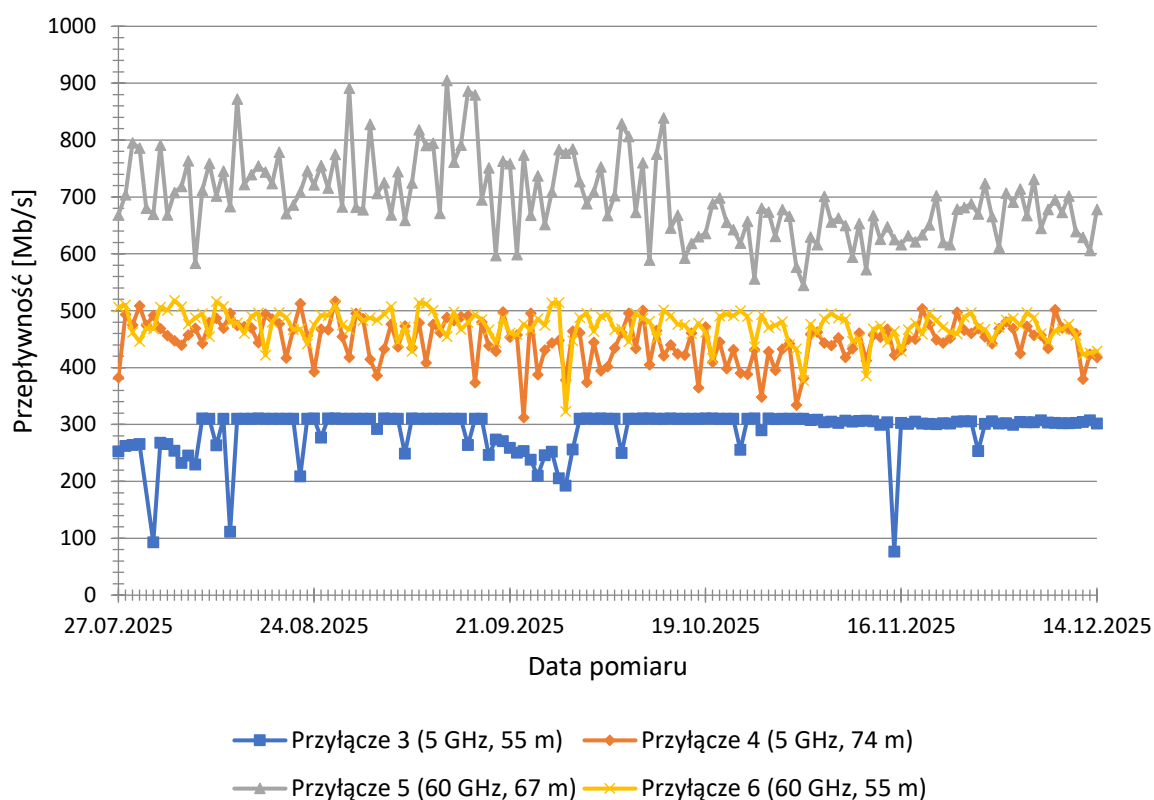
W przypadku przyłącza 3 (5 GHz, 55 m) typowa przepływność oscyluje w granicach 300 Mb/s, jednak na wykresie widoczne są sporadyczne, głębsze spadki, co znajduje odzwierciedlenie w obniżonym wskaźniku sukcesu (97,03%). Mimo tych incydentów przepływność nie zbliża się do poziomów krytycznych dla usługi Netflix, a nawet chwilowe obniżenia nie powodują ryzyka buforowania. 10. percentyl wynosi 253 Mb/s, co oznacza, że 90% zmierzonych wyników charakteryzowało się wyższą wartością przepływności.

Przyłącze 4 (5 GHz, 74 m) charakteryzuje się wyższymi i bardziej stabilnymi wartościami, z medianą bliską 480 Mb/s i pełnym wskaźnikiem sukcesu. Wahania widoczne na wykresie nie mają istotnego wpływu na ciągłość strumieniowania.

Zdecydowanie najlepsze parametry osiąga przyłącze 5 (60 GHz, 67 m), gdzie przepływność utrzymuje się głównie w przedziale 650 – 900 Mb/s, a cały rozkład wyników znajduje się daleko powyżej wymagań dla usługi Netflix. Transmisja ma charakter stabilny, bez istotnych epizodów degradacji.

Przyłącze 6 (60 GHz, 55 m) również zapewnia wysoką przepływność, z medianą bliską 500 Mb/s. Sporadyczne wahania nie wpływają na odbiór treści, co potwierdza wysoki wskaźnik sukcesu (99,81%).

Podsumowując, wszystkie przyłącza w tym zakresie odległości umożliwiają płynne odtwarzanie treści w serwisie Netflix w jakości UHD. Jedynie przyłącze 3 wyróżnia się większą zmiennością przepływności, jednak bez praktycznych konsekwencji dla jakości strumieniowania.



Rysunek 17. Średnia dobowa przepływność łącza w dół dla kategorii Netflix

7.4.3. Przyłącza >150m

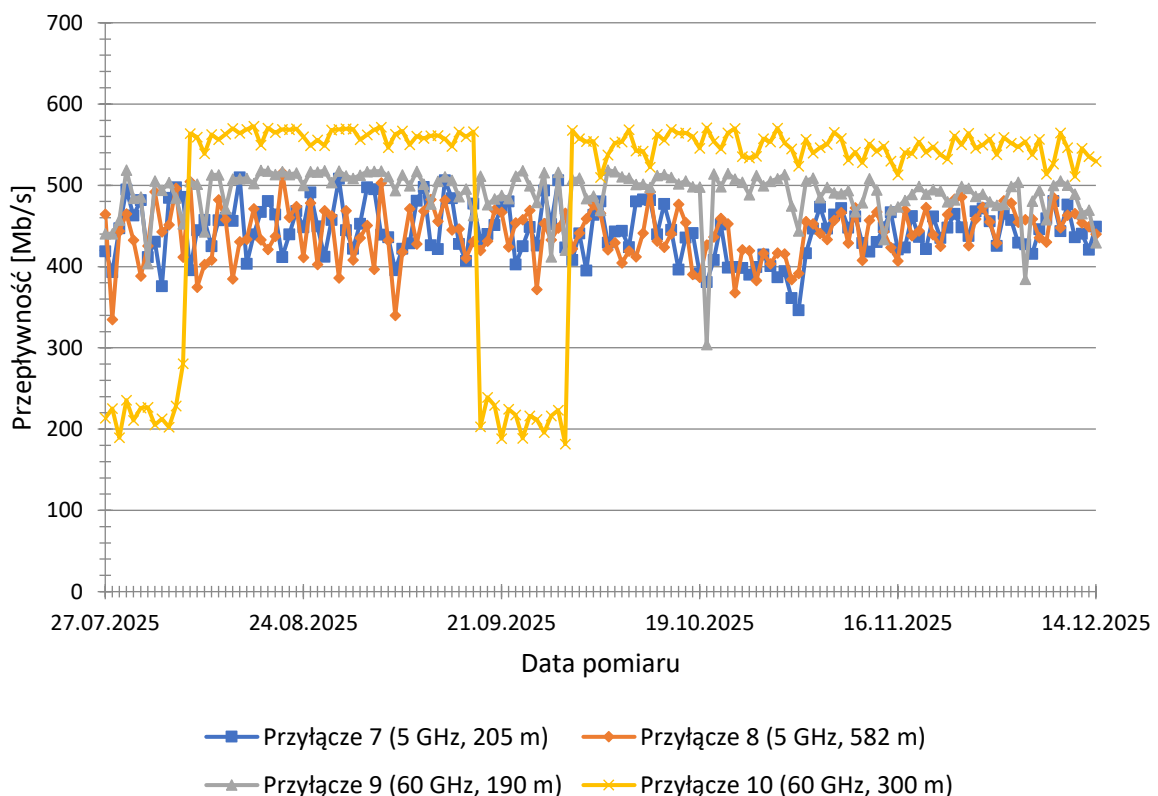
Tabela 15. Wyniki pomiarów dla kategorii Netflix

Przyłącze		7	8	9	10
Okres		27.07-15.12			
Netflix	Średnia przepływność [Mb/s]	443	441	493	491
	Mediana przepływności [Mb/s]	455	448	511	558
	10. percentyl przepływności [Mb/s]	354	356	446	215
	90. percentyl przepływności [Mb/s]	517	516	519	573
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100	100	100

W tej grupie przyłączy przepływności są na tyle wysokie, że we wszystkich przypadkach z dużym marginesem spełniają wymagania usługi Netflix dla UHD (4K) (≥ 15 Mb/s), a różnice pomiędzy 5 GHz i 60 GHz nie mają istotnego znaczenia dla oceny usługi.

Dla przyłączy 7 i 8 mediany przepływności wynoszą odpowiednio 455 Mb/s i 448 Mb/s, przy 10. percentylach w zakresie 354–356 Mb/s, co oznacza stabilne utrzymywanie przepływności wielokrotnie powyżej wymagań. Przyłącze 9 osiąga medianę przepływności 511 Mb/s i 10. percentyl 446 Mb/s, co również wskazuje na wysoki i stabilny poziom transmisji.

Największą zmienność zaobserwowano dla Przyłączy 10, dla którego mediana przepływności wynosi 558 Mb/s, natomiast 10. percentyl osiąga poziom 215 Mb/s, co odpowiada okresowym spadkom przepływności widocznym na wykresie. Mimo tego nawet w tych momentach przepływność pozostaje wielokrotnie powyżej progu 15 Mb/s, nie powodując ograniczeń jakości obrazu ani ryzyka buforowania. Wskaźnik sukcesu równy 100% dla wszystkich przyłączy potwierdza ciągłość realizacji testów i brak przerw w dostępności usługi.



Rysunek 18. Średnia dobowa przepływność łącza w dół dla kategorii Netflix

7.5. ICMP Ping

7.5.1. Przyłącza 10-20 m

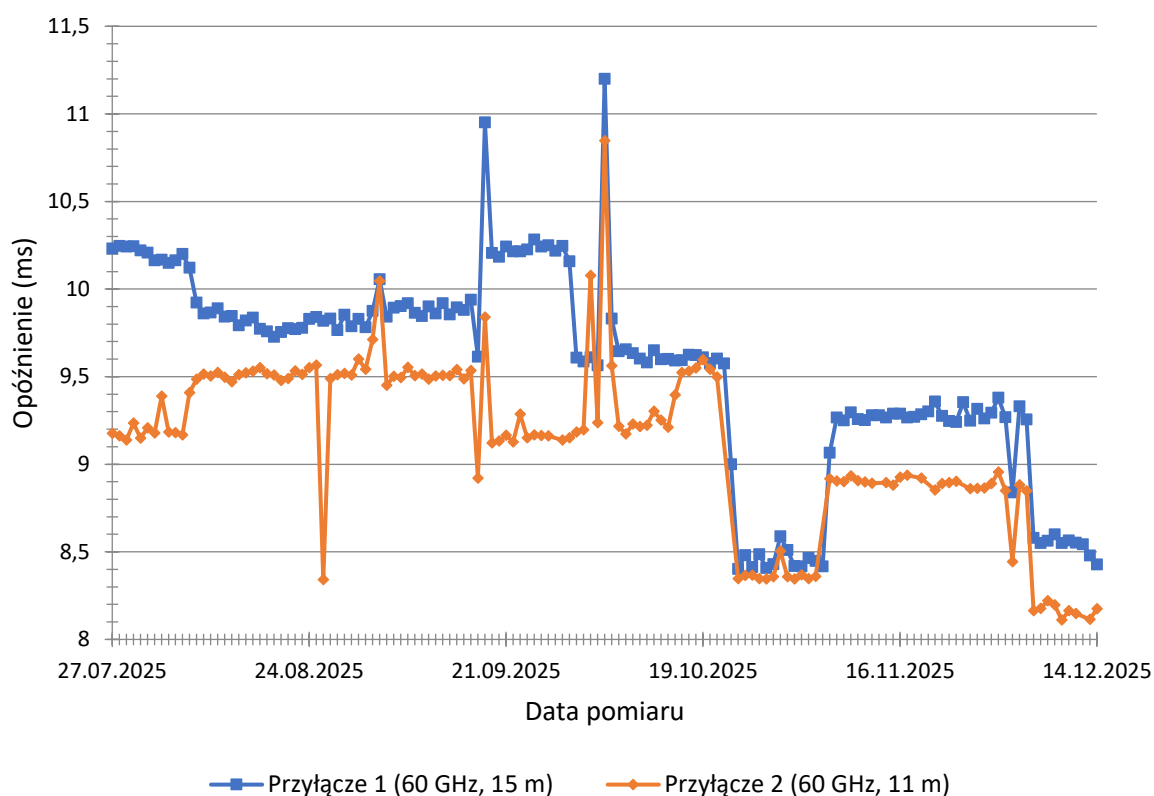
Tabela 16. Wyniki pomiarów dla kategorii ICMP Ping

	Przyłącze	1	2
	Okres	27.07-15.12	
ICMP Ping	Średnia opóźnień [ms]	10	9
	Mediana opóźnień [ms]	10	9
	10. percentyl opóźnienia [ms]	8	8
	90. percentyl opóźnienia [ms]	10	10
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	99,95

Zarejestrowane wartości opóźnień dla obu przyłączy pozostają w całym okresie pomiarowym poniżej progu 18 ms, który zgodnie z zaleceniami BEREC definiuje wymagania dla sieci o bardzo dużej przepustowości. Średnie i mediany opóźnień wynoszą odpowiednio 9 – 10 ms, a nawet wartości odpowiadające 90. percentylowi nie przekraczają 10 ms.

Widoczne na wykresie wahania oraz pojedyncze wzrosty opóźnień nie prowadzą do przekroczenia przyjętego kryterium jakościowego i mają charakter krótkotrwały. Wskaźnik sukcesu na poziomie 100% (przyłącze 1) i 99,95% (przyłącze 2) potwierdza ciągłość i stabilność realizacji pomiarów.

W konsekwencji oba przyłącza spełniają wymagania jakościowe opóźnień mierzonych protokołem ICMP, a obserwowane opóźnienia jednoznacznie kwalifikują łącza jako odpowiednie dla usług wrażliwych na opóźnienia.



Rysunek 19. Średnia dobowa opóźnień dla kategorii ICMP Ping

7.5.2. Przyłącza 50-100 m

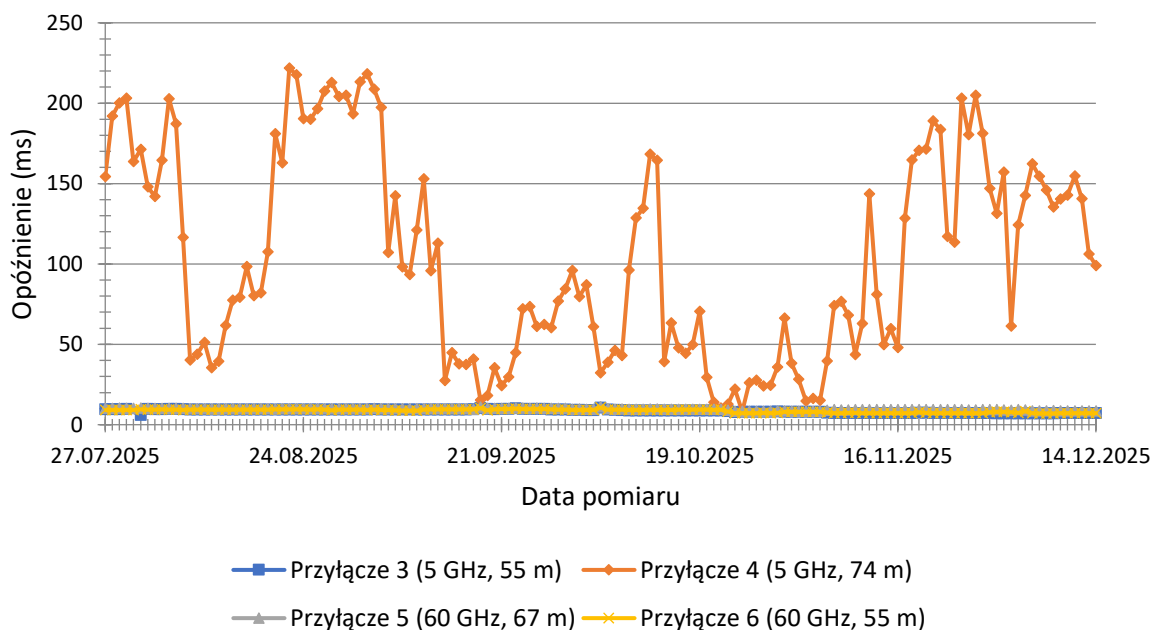
Tabela 17. Wyniki pomiarów dla kategorii ICMP Ping

Przyłącze		3	4	5	6
Okres		27.07-15.12			
ICMP Ping	Mediana opóźnień [ms]	9	104	10	9
	Średnia opóźnień [ms]	9	90	10	9
	10. percentyl opóźnienia [ms]	7	15	9	7
	90. percentyl opóźnienia [ms]	10	221	10	10
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100	100	100

Dla przyłączy 3, 5 i 6 wartości opóźnień pozostają stabilne i niskie w całym okresie pomiarowym. Mediany na poziomie 9 – 10 ms, 90. percentyle nieprzekraczające 10 ms oraz brak istotnych wahań oznaczają jednoznaczne spełnienie kryterium ≤ 18 ms określonego dla sieci o bardzo dużej przepustowości.

Odmienny charakter pracy zmierzono dla przyłącza 4, dla którego mediana opóźnień wynosi 104 ms, a średnia 90 ms, co już wskazuje na trwałe przekroczenie dopuszczalnego progu. Dodatkowo 90. percentyl na poziomie 221 ms oraz liczne, długotrwałe wzrosty opóźnień widoczne na wykresie potwierdzają, że opóźnienia w tym przypadku wielokrotnie i systematycznie przekraczają wymagania 18 ms. Oznacza to niespełnienie kryterium jakościowego dla pomiarów opóźnień protokołem ICMP, mimo wskaźnika sukcesu równego 100%.

Podsumowując, przyłącza 3, 5 i 6 spełniają wymagania jakościowe ICMP Ping z dużym zapasem, natomiast Przyłącze 4 nie spełnia wymagań BEREC, a obserwowane opóźnienia jednoznacznie dyskwalifikują je jako łącze o bardzo dużej przepustowości w tym zakresie.



Rysunek 20. Średnia dobowa wartości opóźnień dla kategorii ICMP Ping

7.5.3. Przyłącza >150m

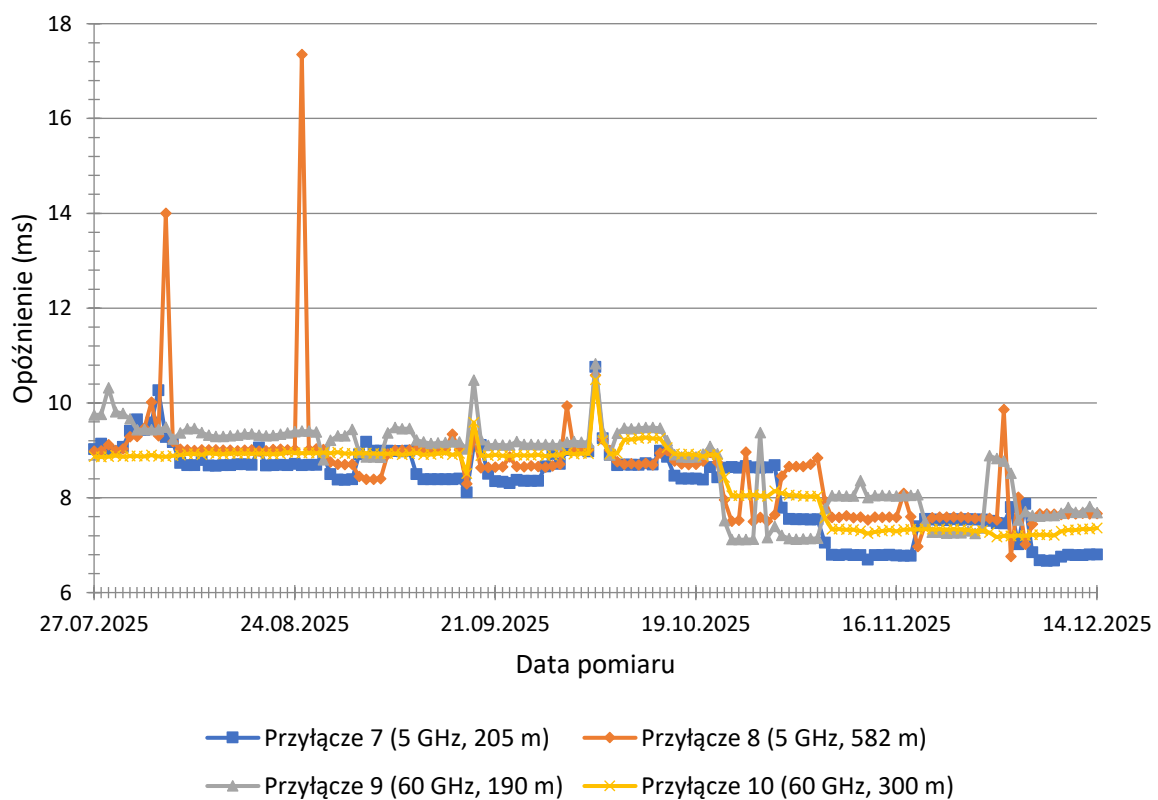
Tabela 18. Wyniki pomiarów dla kategorii ICMP Ping

Przyłącze		7	8	9	10
Okres		27.07-15.12			
ICMP Ping	Średnia opóźnień [ms]	8	9	9	8
	Mediana opóźnień [ms]	9	9	9	9
	10. percentyl opóźnienia [ms]	7	8	7	7
	90. percentyl opóźnienia [ms]	9	9	9	9
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100	100	100

Dla przyłączy 7 – 10 wartości opóźnień pozostają bardzo niskie i stabilne w całym okresie pomiarowym. Wartości średnie oraz mediany mieszczą się w przedziale 8 – 9 ms. Dodatkowo 90. percentyle nie przekraczają 9 ms. Oznacza to stałe utrzymywanie opóźnień znacznie poniżej progu 18 ms.

Na wykresie widoczne są pojedyncze, krótkotrwałe wzrosty opóźnień, w szczególności dla przyłącza 8, gdzie maksymalne wartości zbliżają się do 17 ms, jednak mają one charakter incydentalny i nie wpływają na rozkład statystyczny ani na ocenę jakościową. Brak jest długotrwałych okresów podwyższonych opóźnień.

Wszystkie analizowane przyłącza spełniają wymagania jakościowe opóźnień mierzonych protokołem ICMP z dużym zapasem, a stuprocentowy wskaźnik sukcesu potwierdza stabilność transmisji nawet przy długościach łączy przekraczających 150 m.



Rysunek 21. Średnia dobowe wartości opóźnień dla kategorii ICMP Ping

7.6. Protokół UDP

7.6.1. Przyłącza 10-20 m

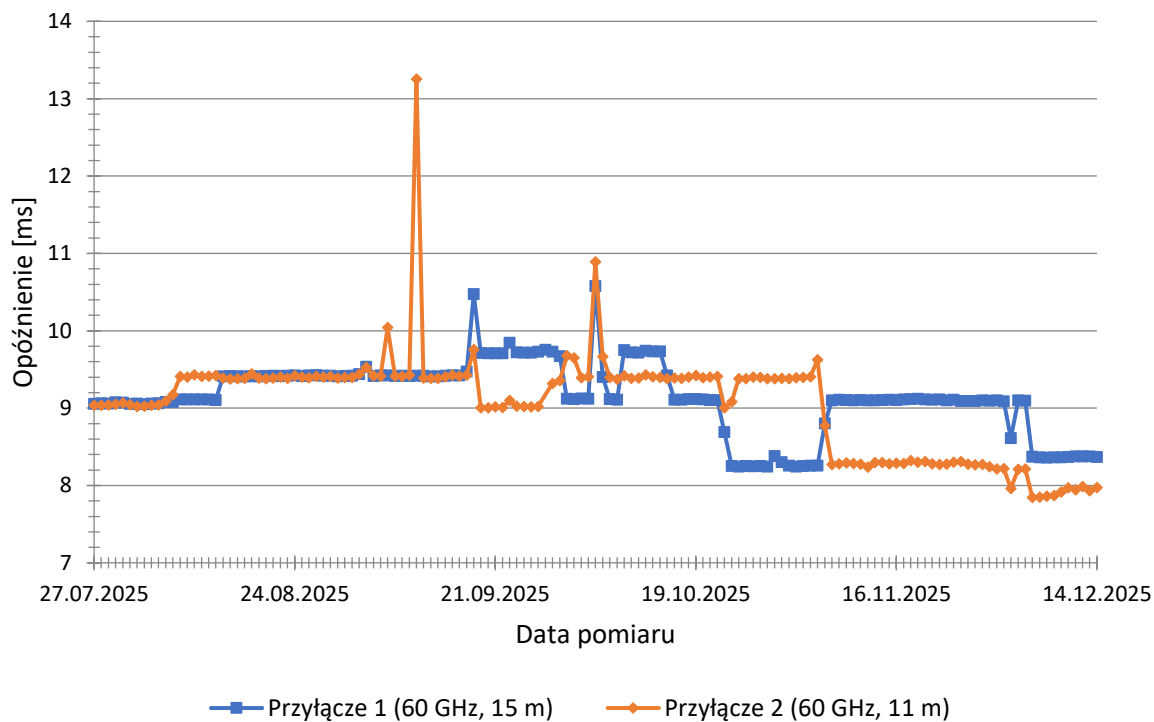
Tabela 19. Wyniki pomiarów dla kategorii UDP

	Przyłącze	1	2
	Okres	27.07-15.12	
UDP	Średnia opóźnień [ms]	9	9
	Mediana opóźnień [ms]	9	9
	10. percentyl opóźnienia [ms]	8	8
	90. percentyl opóźnienia [ms]	10	9
	Wskaźnik utraty pakietów [%]	0,01	0,02
	90. percentyl utraty pakietów [%]	0	0

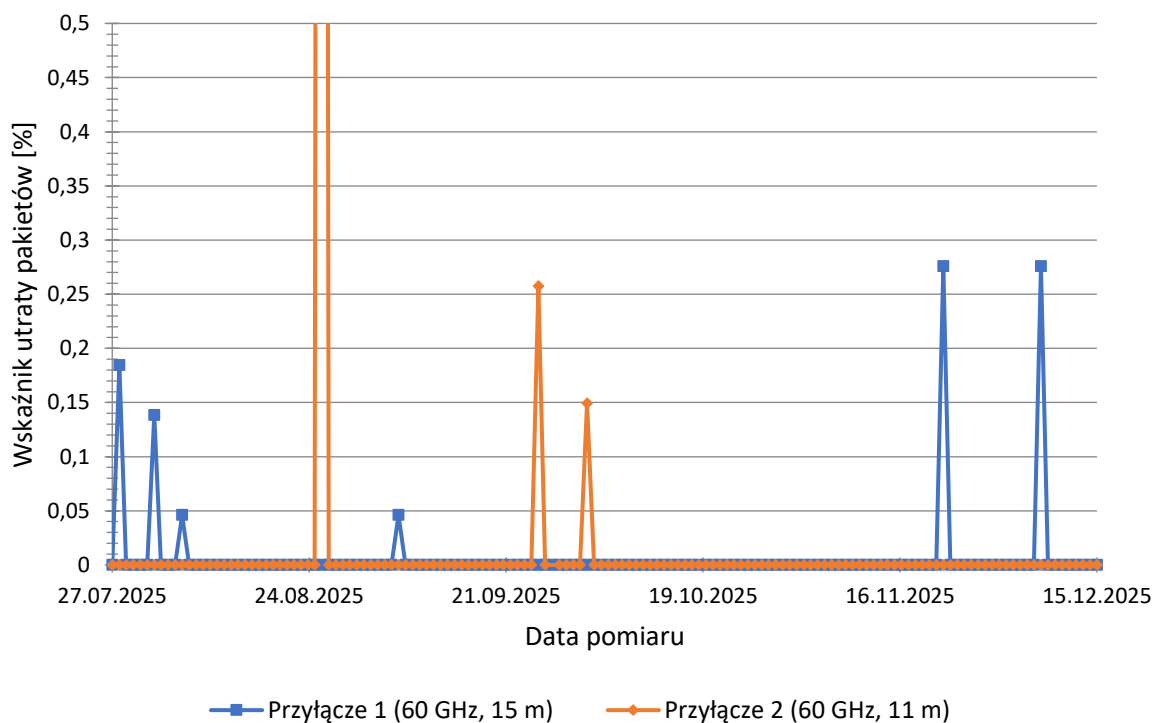
Dla obu przyłączy wartości opóźnień UDP utrzymują się na bardzo niskim i stabilnym poziomie. Średnie oraz mediany wartości opóźnień wynoszą 9 ms, a nawet wartości 90. percentyla nie przekraczają 10 ms, co potwierdza niewielką zmienność opóźnień w całym okresie pomiarowym. Widoczne na wykresie pojedyncze nagłe wzrosty wartości opóźnień mają charakter incydentalny i nie wpływają na ogólny rozkład wyników.

Kluczowym parametrem w ocenie jakości transmisji UDP jest wskaźnik utraty pakietów. Dla przyłącza 1 wynosi on 0,01%, co odpowiada kryterium jakościowemu określone w zaleceniu ITU-T Y.1540. W przypadku przyłącza 2 wartość ta osiąga 0,02%, a więc nieznacznie przekracza przyjęty próg. Dla obydwu przyłączy 90% zmierzonych wyników cechowało się utratą pakietów równą 0%.

Oznacza to, że przyłącze 1 spełnia wymagania jakościowe dla transmisji UDP w pełnym zakresie, natomiast przyłącze 2, mimo bardzo dobrych parametrów opóźnień, nie spełnia kryterium jakościowego ze względu na podwyższony poziom utraty pakietów, co może mieć znaczenie dla usług wrażliwych na straty.



Rysunek 22. Średnia dobowa wartości opóźnień dla kategorii UDP



Rysunek 23. Średnia dobowa utrata pakietów dla kategorii UDP

7.6.2. Przyłącza 50-100 m

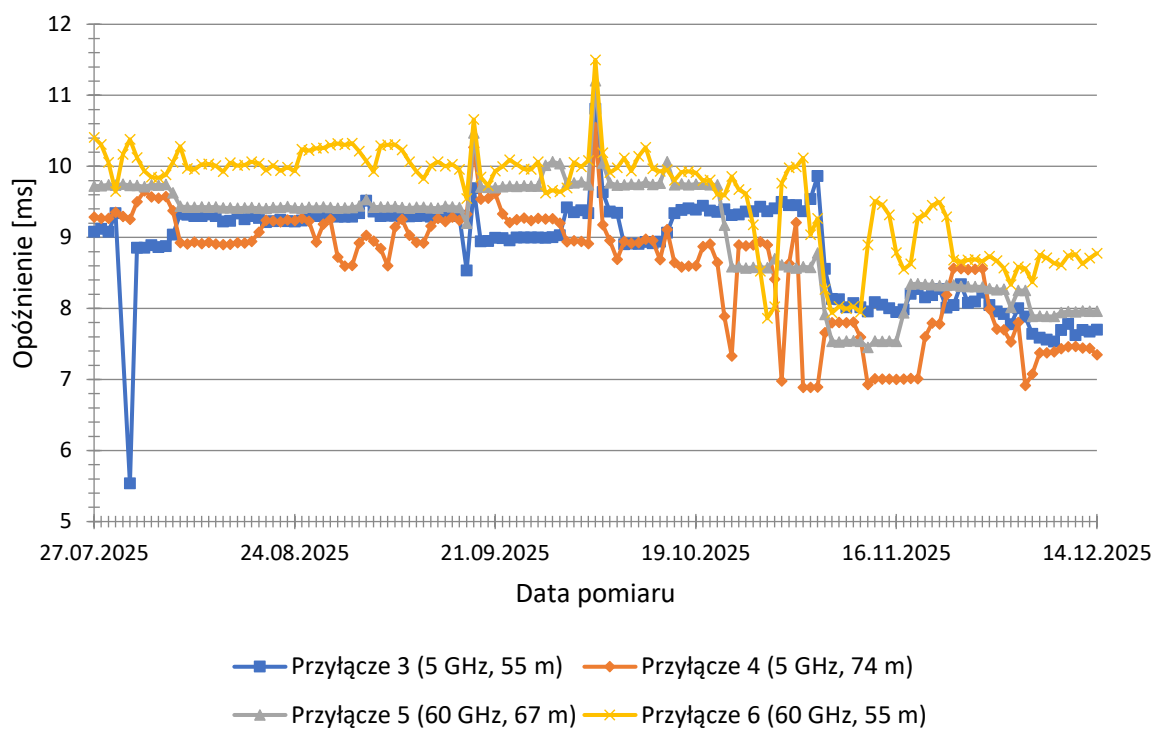
Tabela 20. Wyniki pomiarów dla kategorii UDP

Przyłącze		3	4	5	6
Okres		27.07-15.10			
UDP	Średnia opóźnień [ms]	9	9	9	10
	Mediana opóźnień [ms]	9	9	9	10
	10. percentyl opóźnienia [ms]	8	7	8	8
	90. percentyl opóźnienia [ms]	9	9	10	10
	Wskaźnik utraty pakietów [%]	0,3	0,07	0,02	0,06
	90. percentyl utraty pakietów [%]	0	0,24	0	0,23

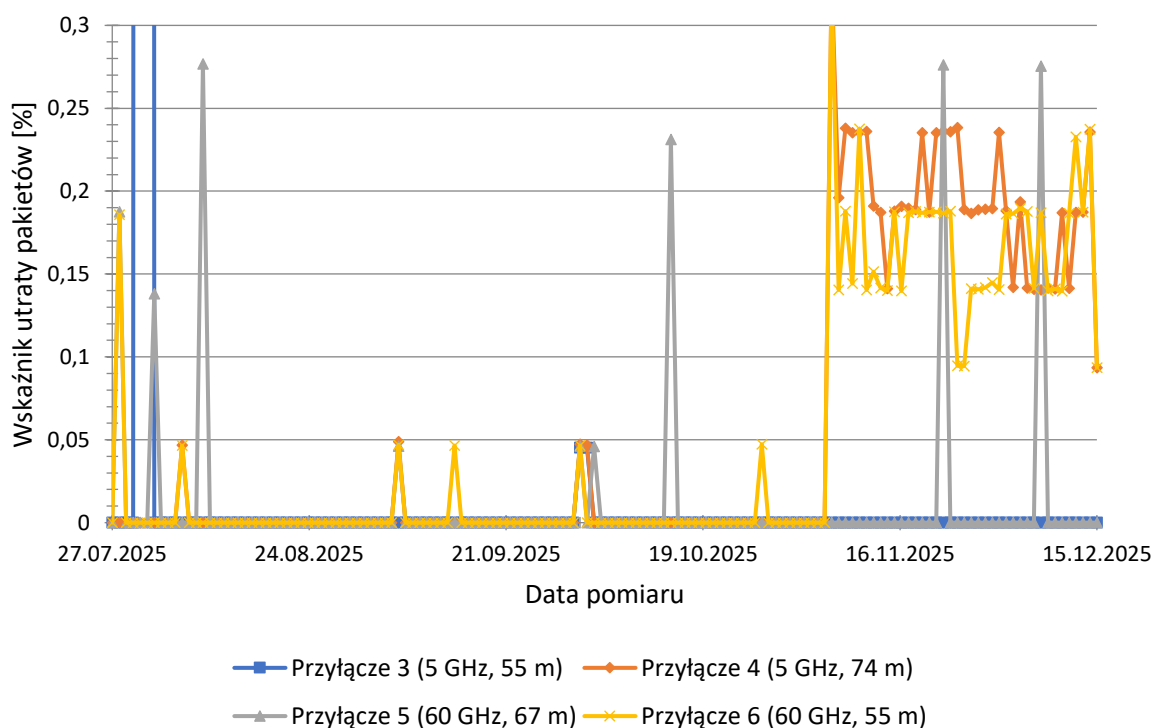
W analizowanym okresie do dnia 07.11 wszystkie przyłącza o długości od 50 do 100 m charakteryzowały się stabilnymi parametrami protokołu UDP. Średnie oraz mediany opóźnień RTT utrzymywały się na poziomie 9 – 10 ms, a wartości 10. i 90. percentyla nie wskazywały na istotne wahania. Trzy z analizowanych przyłączy spełniały jednocześnie rygorystyczny próg strat pakietów UDP na poziomie $\leq 0,01\%$, natomiast w przypadku przyłącza 3 straty miały charakter incydentalny. Pojedynczy dzień pomiarowy (01.08), w którym średnia dobową utratę pakietów dla przyłącza 3 osiągnęła poziom 40%, skutkowało istotnym podwyższeniem średniej wartości utraty pakietów z całego okresu pomiarowego do 0,3%. 90% zmierzonych wyników dla przyłącza 3 miało utratę pakietów równą 0%. Brak jest tym samym przesłanek do stwierdzenia trwałych zaburzeń transmisji w tym okresie.

Po 07.11.2025 r. obserwowana jest wyraźna zmiana charakteru pracy części przyłączy, polegająca na utrzymującym się podwyższonym poziomie strat pakietów UDP. Zjawisko to jest jednoznacznie widoczne na wykresach utraty pakietów jako długotrwały stan podwyższonych wartości, a nie pojedyncze, losowe wzrosty. Jednocześnie wzrostowi utraty pakietów nie towarzyszył istotny wzrost opóźnień.

Dla porównania, pomiary referencyjne z okresu 27.07 – 07.11 wykazały bardzo dobrą jakość transmisji UDP: średnie wartości RTT na poziomie 9 ms, mediany 9 ms, 10. percentyl 8 – 9 ms oraz 90. percentyl 9 – 10 ms, przy niskiej średniej utracie pakietów (0,01 – 0,02%). Potwierdza to, że obserwowane po 07.11 pogorszenie parametrów nie wynikało z właściwości technologii ani długości toru radiowego.



Rysunek 24. Średnia dobowa wartości opóźnień dla kategorii UDP



Rysunek 25. Średnia dobowa utrata pakietów dla kategorii UDP

7.6.3. Przyłącza >150m

Tabela 21. Wyniki pomiarów dla kategorii UDP

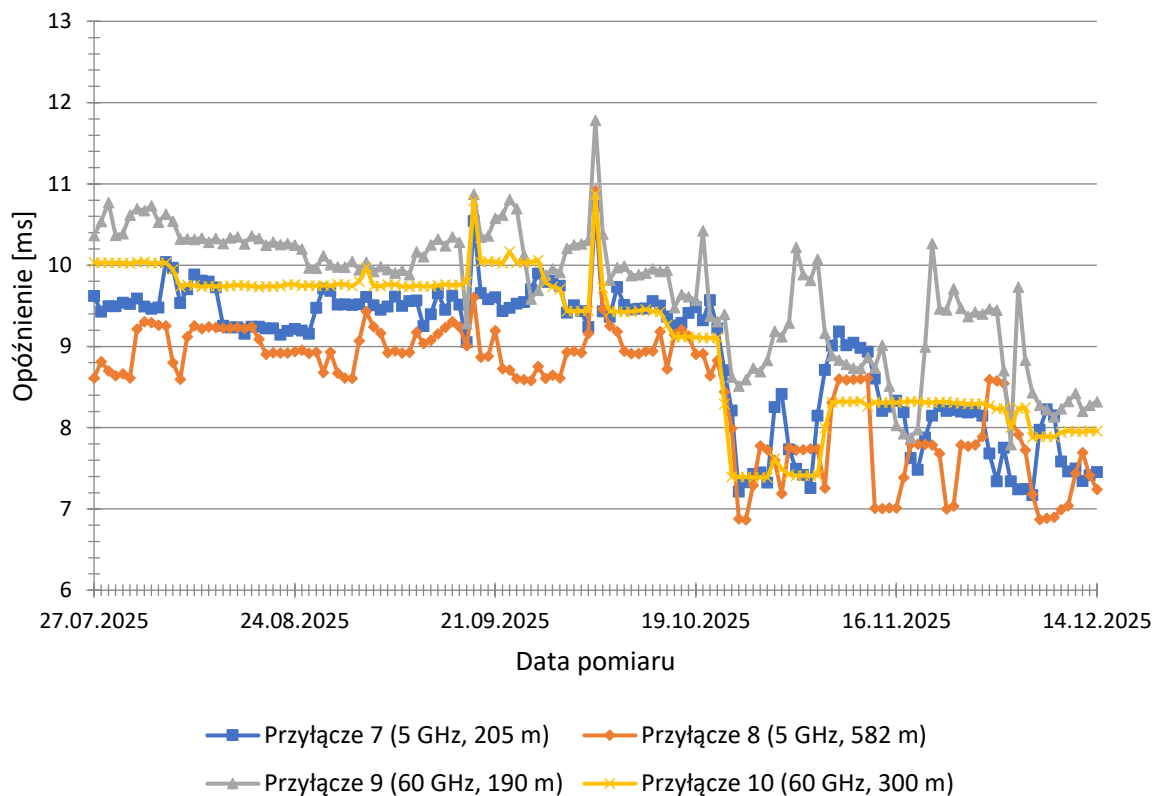
		Przyłącze	7	8	9	10
		Okres	27.07-15.12			
UDP	Mediana opóźnień [ms]		9	8	10	9
	Średnia opóźnień [ms]		9	9	10	9
	10. percentyl opóźnienia [ms]		7	7	8	8
	90. percentyl opóźnienia [ms]		10	9	11	10
	Wskaźnik utraty pakietów (%)		0,07	0,07	0,07	0,01

W przedziale czasowym 27.07–07.11 parametry protokołu UDP dla przyłączy o długości powyżej 150 m pozostawały stabilne i. Opóźnienia nie wykazywały istotnej zmienności – wartości średnie i mediana mieściły się w zakresie 9–10 ms, natomiast percentyle wskazywały na bardzo ograniczone odchylenia wartości (10. percentyl: 7–8 ms, 90. percentyl: 9–11 ms). Wartości dla uzyskanych rezultatów pozostawały z wyraźnym marginesem poniżej przyjętych progów jakościowych.

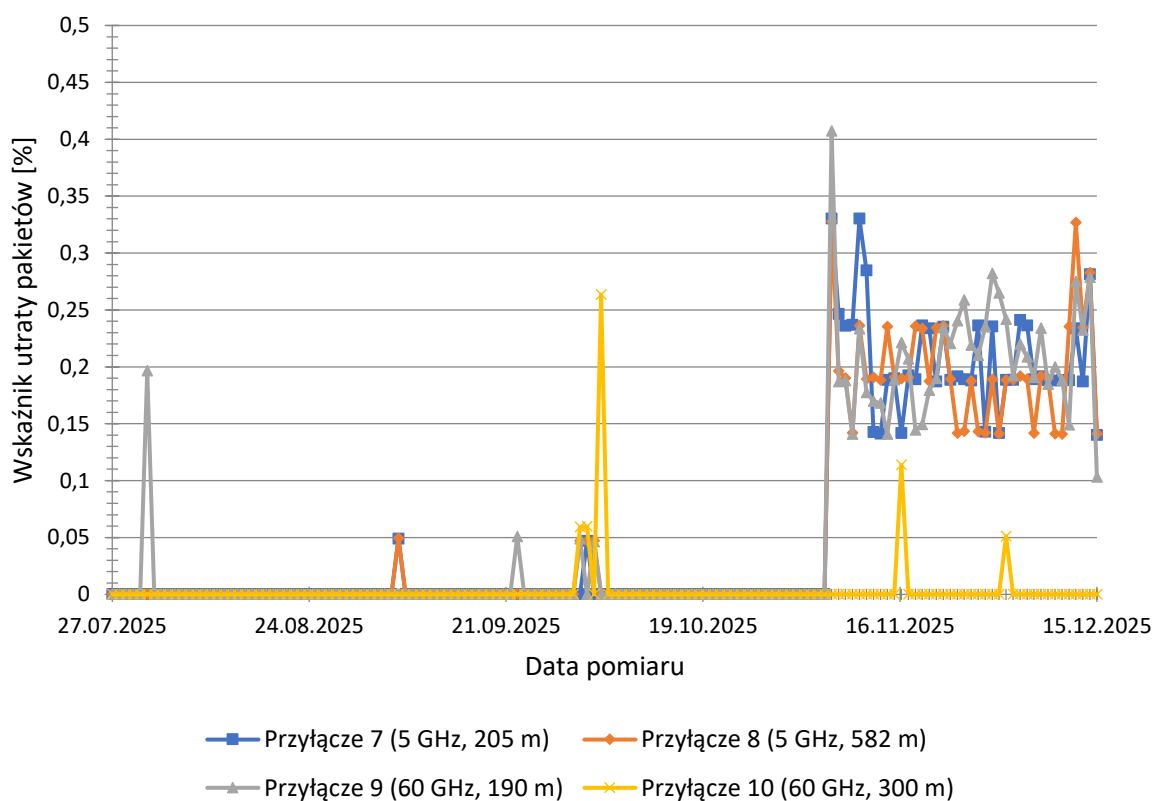
Analiza strat pakietów w tym samym okresie potwierdza bardzo dobrą jakość transmisji z wykorzystaniem protokołu UDP. Wszystkie przyłącza 7–10 spełniały wymaganie średniej utraty pakietów $\leq 0,01\%$, a wartości 90. percentyla strat nie przekraczały 0% dla przyłącza 10 i 0,05% dla przyłączy 7, 8, 9. Oznacza to, że ewentualne straty miały charakter krótkotrwałych zdarzeń punktowych i nie wpływały na ciągłość transmisji, co znajduje potwierdzenie w przebiegach czasowych.

Sytuacja uległa zmianie po dniu 07.11, kiedy na części przyłączy pojawił się utrzymujący się podwyższony poziom strat pakietów dla protokołu UDP, widoczny w sposób ciągły na wykresach. Charakter tych zaburzeń wskazuje na problemy techniczne przyłącza o długotrwałym przebiegu, niezwiązane bezpośrednio ze wzrostem opóźnień.

Z tego względu wyniki z okresu po 07.11 należy traktować jako nieodzwoiercedlające typowych warunków pracy łączy. Dla celów porównawczych i oceny technologicznej właściwym punktem odniesienia wydaje się okres 27.07 – 07.11, który w pełni spełniał przyjęte kryteria jakościowe dla transmisji UDP.



Rysunek 26. Średnia dobowa wartość opóźnień dla kategorii UDP



Rysunek 27. Średnia dobowa utraty pakietów dla kategorii UDP

7.7. Media społecznościowe

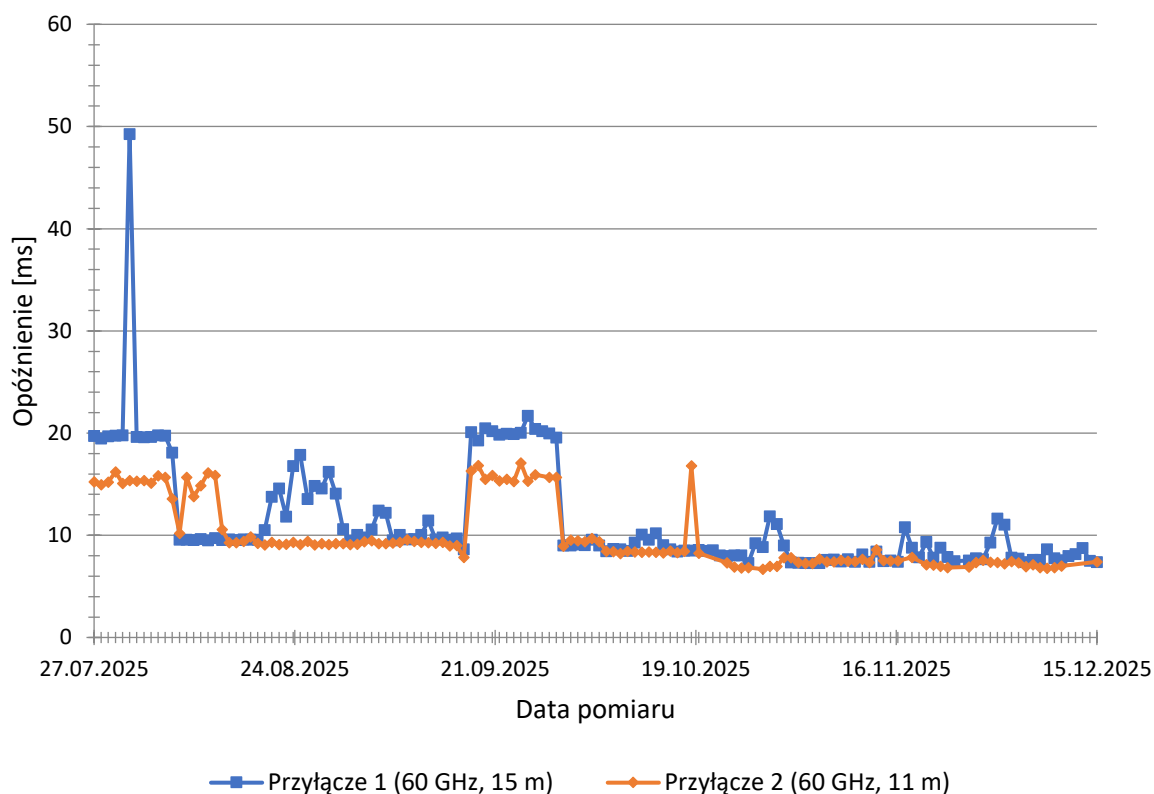
7.7.1. Przyłącza 10-20 m

Tabela 22. Wyniki pomiarów dla kategorii media społecznościowe

	Przyłącze	1	2
	Okres	27.07-15.12	
Media społecznościowe	Średnia opóźnień [ms]	12	10
	Mediana opóźnień [ms]	9	8
	10. percentyl opóźnienia [ms]	7	7
	90. percentyl opóźnienia [ms]	20	19
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,57	100

W analizowanym okresie przyłącza o długości od 10 do 20 m w kategorii media społecznościowe charakteryzowały się stabilnymi i niskimi wartościami opóźnień. Mediany opóźnień wynosiły 8 – 9 ms, a 10. percentyl 7 ms, co potwierdza bardzo dobry czas odpowiedzi w typowych warunkach pracy. Wartości dla 90. percentyla na poziomie 19 – 20 ms wskazują, że sporadyczne wzrosty opóźnień miały ograniczony zakres i nie przekraczały progów istotnych dla komfortu użytkowania tej kategorii usług. Na wykresie widoczne są pojedyncze, krótkotrwałe, nagłe wzrosty opóźnień, jednak nie mają one charakteru trwałego i nie wpływają na ogólną ocenę jakości połączeń.

Jednocześnie wskaźnik sukcesu utrzymywał się na wysokim poziomie (99,57% dla przyłącza 1 oraz 100% dla przyłącza 2), co potwierdza poprawną realizację testów i brak występowania problemów technicznych przyłącza w badanym okresie. Wyniki te wskazują, że przyłącza w tym zakresie długości spełniają wymagania jakościowe dla usług opartych na interakcjach w czasie zbliżonym do rzeczywistego.



Rysunek 28. Średnia dobowa wartości opóźnień dla kategorii media społecznościowe

7.7.2. Przyłącza 50-100 m

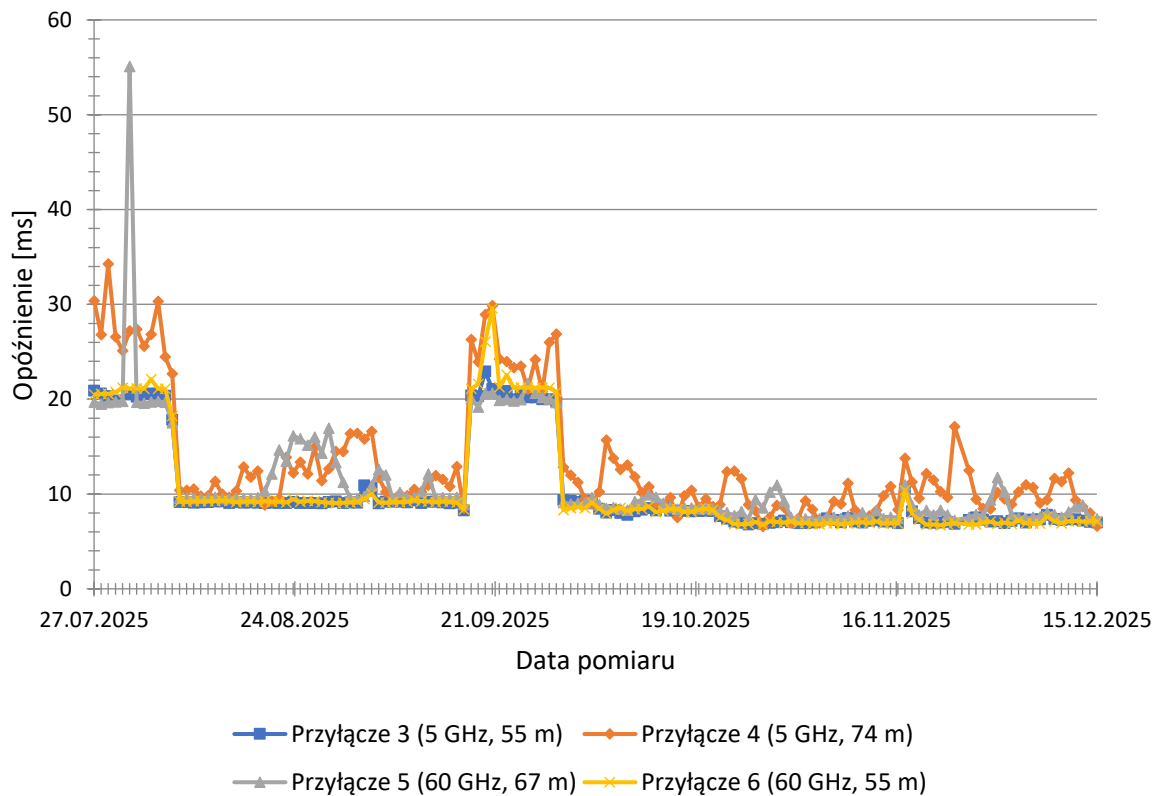
Tabela 23. Wyniki pomiarów dla kategorii media społecznościowe

Przyłącze		3	4	5	6
Okres		27.07-15.12			
Media społecznościowe	Średnia opóźnień [ms]	10	13	12	11
	Mediana opóźnień [ms]	9	9	9	9
	10. percentyl opóźnienia [ms]	6	3	7	4
	90. percentyl opóźnienia [ms]	22	22	20	22
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,56	99,57	99,57	99,56

Dla przyłączy o długości od 50 do 100 m parametry jakościowe w kategorii media społecznościowe charakteryzowały się niewielką zmiennością w całym badanym okresie. Wartości median opóźnień były identyczne dla wszystkich przyłączy i wynosiły 9 ms, natomiast średnie opóźnienia mieściły się w przedziale 10 – 13 ms, co wskazuje na sporadyczne odchylenia od poziomu bazowego, widoczne również na przebiegach czasowych.

Analiza wartości percentylowych nie wskazuje na występowanie długotrwałych degradacji parametrów. Dziewięćdziesiąty percentyl nie przekraczał 22 ms, co oznacza, że podwyższone opóźnienia miały charakter krótkotrwały i nie dominowały w strukturze pomiarów.

Wysokie wartości wskaźnika sukcesu, bliskie 99,6% dla wszystkich przyłączy, potwierdzają stabilną realizację usług w tej kategorii. Zdarzenia charakteryzujące się podwyższonym poziomem opóźnień, obserwowane lokalnie na wykresach, nie miały charakteru trwałego i nie wpływały istotnie na ogólną ocenę jakości transmisji.



Rysunek 29. Średnia dobowa wartości opóźnień dla kategorii media społecznościowe

7.7.3. Przyłącza >150m

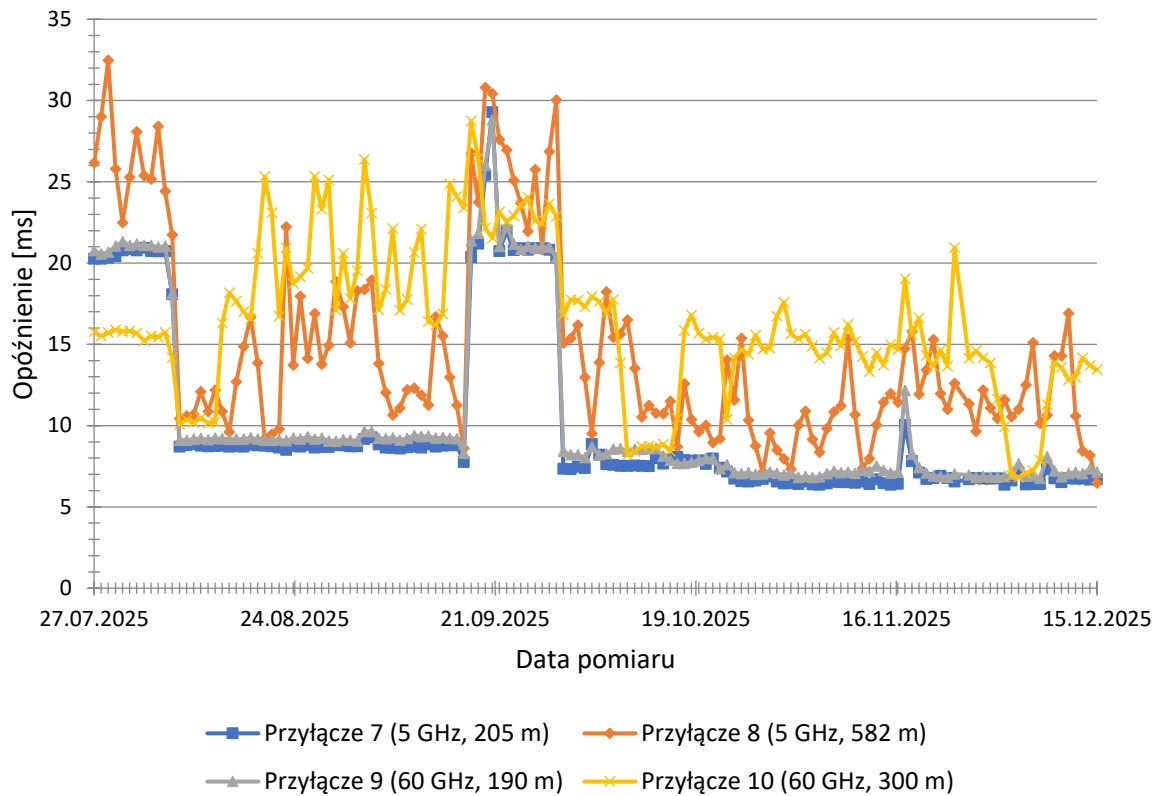
Tabela 24. Wyniki pomiarów dla kategorii media społecznościowe

Przyłącze		7	8	9	10
Okres		27.07-15.12			
Media społecznościowe	Średnia opóźnień [ms]	10	15	11	16
	Mediana opóźnień [ms]	8	9	9	10
	10. percentyl opóźnienia [ms]	3	3	4	7
	90. percentyl opóźnienia [ms]	22	22	22	41
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,56	99,58	99,56	99,49

W przypadku przyłączy o długości przekraczającej 150 m obserwowane parametry jakościowe dla kategorii mediów społecznościowych charakteryzowały się większym zróżnicowaniem niż dla łączy o krótszej długości. Średnie wartości opóźnień mieściły się w przedziale od 10 do 16 ms, przy czym wartości median pozostawały stabilne i nie przekraczały 10 ms, co wskazuje na dobrą jakość transmisji w typowych warunkach pracy.

Analiza percentyli potwierdza występowanie sporadycznych wzrostów opóźnień, szczególnie widocznych w wartościach 90. percentyla. Dla większości przyłączy nie przekraczały one poziomu 22 ms, natomiast w przypadku przyłącza 10 odnotowano wyraźnie wyższe wartości skrajne, sięgające 41 ms. Zjawisko to znajduje odzwierciedlenie na wykresach czasowych, gdzie widoczne są krótkotrwałe okresy podwyższonego poziomu opóźnień, niemające jednak charakteru trwałego.

Pomimo większej długości toru radiowego oraz obserwowanych fluktuacji opóźnień, wskaźnik sukcesu dla wszystkich analizowanych przyłączy utrzymywał się na wysokim poziomie, w zakresie 99,49 – 99,58%. Oznacza to, że nawet w najbardziej wymagającym wariancie długości trasy radiowej jakość usług związanych z mediami społecznościowymi pozostawała zgodna z przyjętymi kryteriami jakościowymi i nie powodowała zauważalnego pogorszenia doświadczeń użytkownika końcowego.



Rysunek 30. Średnia dobowa wartości opóźnień dla kategorii media społecznościowe

7.8. VoIP UDP jitter

7.8.1. Przyłącza 10-20 m

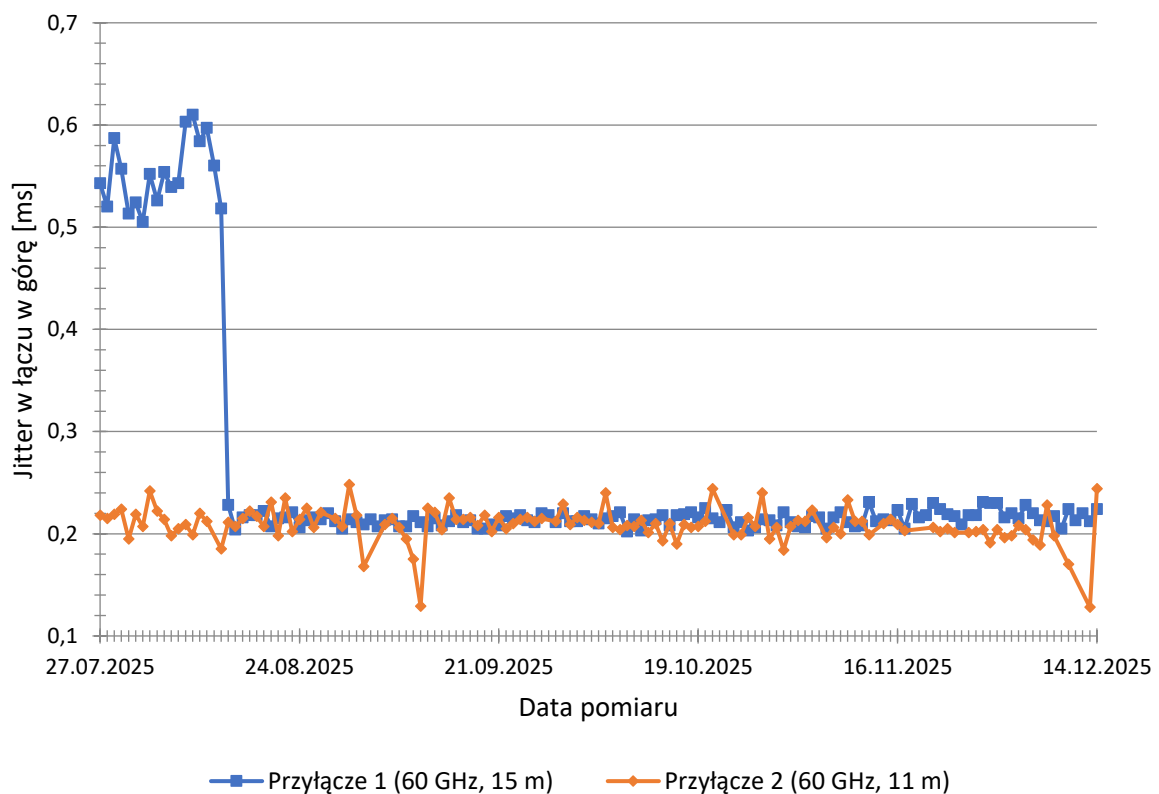
Tabela 25. Wyniki pomiarów dla kategorii VoIP UDP jitter

		Przyłącze	1	2
		Okres	27.07-15.10	
VoIP UDP jitter	Mediana jitter w łącu w dół [ms]		0,08	0,07
	Mediana jitter w łącu w górę [ms]		0,26	0,21
	Mediana MOS [ms]		4,4	4,4
	Wskaźnik sukcesu [%]		99,97	99,93

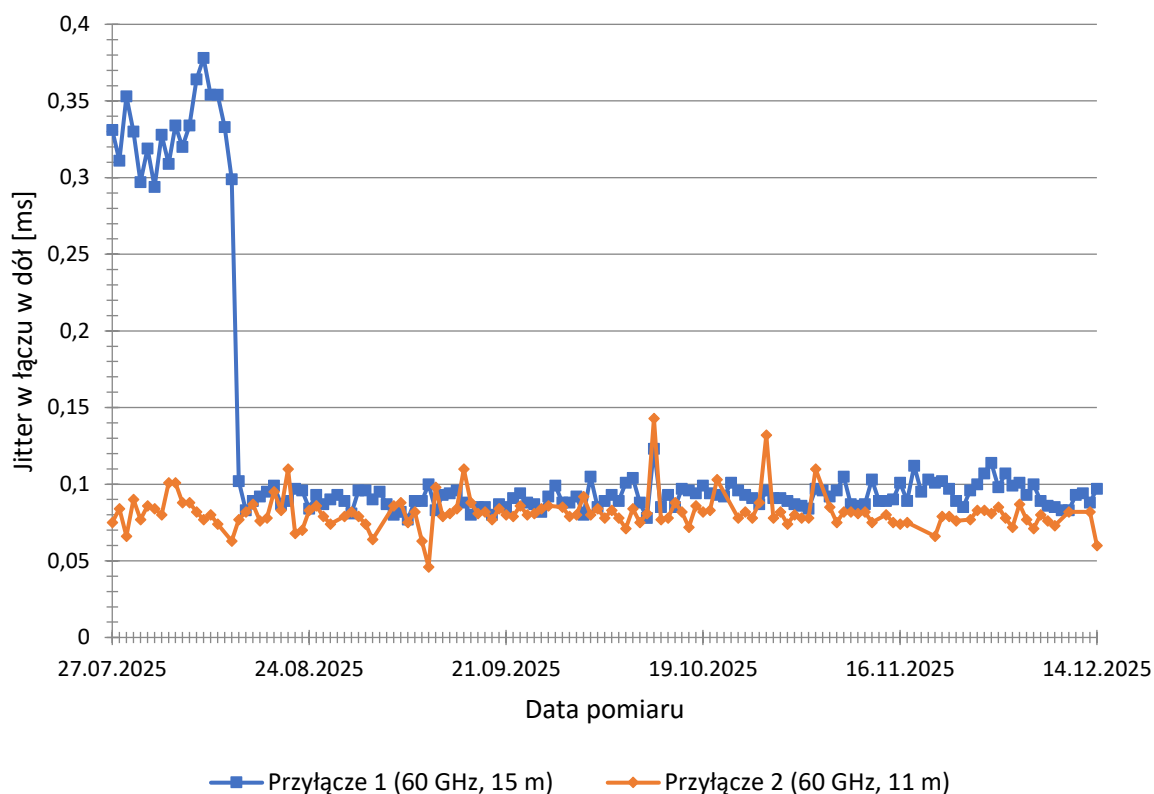
Wyniki pomiarów jittera dla obu przyłączy jednoznacznie wskazują na bardzo wysoką jakość transmisji VoIP. Zarówno w łącu w dół, jak i w górę mediany wartości jittera utrzymują się na poziomie znacznie poniżej 1 ms (od 0,07 do 0,26 ms), a więc został zachowany znaczny margines względem progu 30 ms, uznawanego za granicę stabilnej transmisji głosu.

Na wykresach widoczne są jedynie krótkotrwałe wzrosty jittera (szczególnie dla przyłącza 1) występujące do połowy sierpnia, które szybko ustępują i nie wpływają na dalszy przebieg pomiarów. W pozostałej części okresu pomiarowego wartości jittera utrzymywały się na niskim i stabilnym poziomie, bez występowania zdarzeń mogących prowadzić do niestabilności rozmów.

Wysoką jakość potwierdzają również wartości MOS = 4,4 dla obu przyłączy, które jednoznacznie kwalifikują połączenia jako zapewniające bardzo dobrą jakość rozmów głosowych, a także bardzo wysoki wskaźnik sukcesu (bliski 100%). W konsekwencji oba przyłącza w zakresie 10 – 20 m w pełni spełniają wymagania jakościowe dla usług VoIP opartych na UDP.



Rysunek 31. Mediana dobowa wartości jittera w łączu w górę dla kategorii VoIP UDP jitter



Rysunek 32. Mediana dobowa wartości jittera w łączu w dół dla kategorii VoIP UDP jitter

7.8.2. Przyłącza 50-100 m

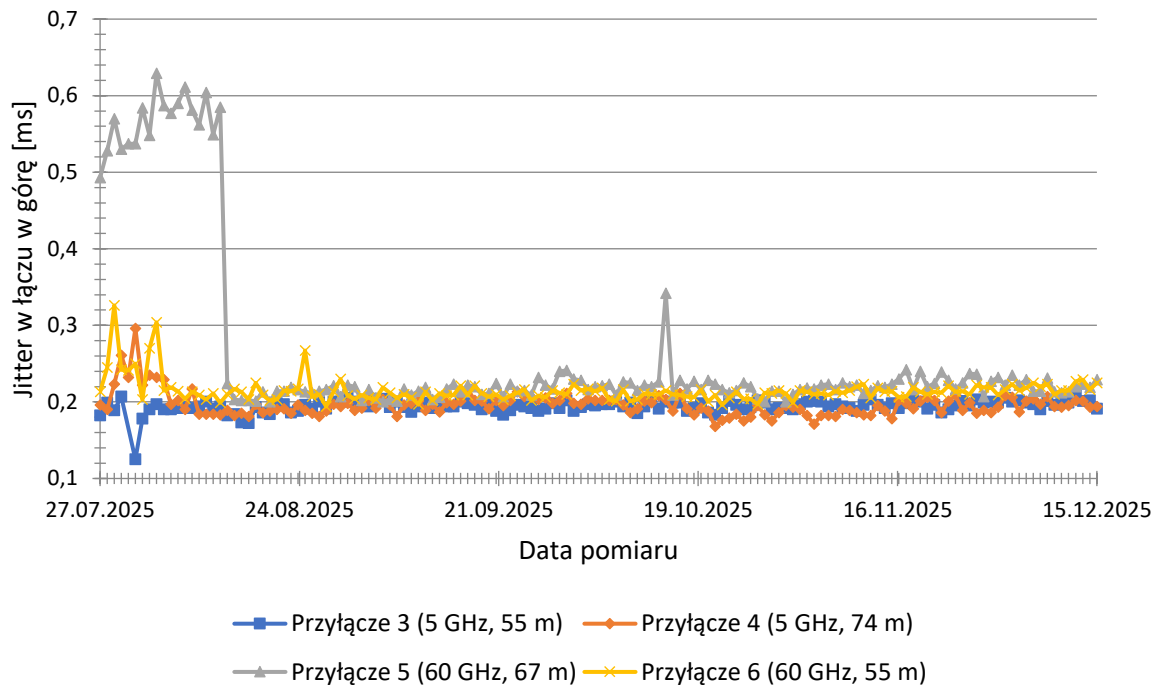
Tabela 26. Wyniki pomiarów dla kategorii VoIP UDP jitter

Przyłącze		3	4	5	6
Okres		27.07-15.12			
VoIP UDP jitter	Mediana jitter w łączu w dół [ms]	0,05	0,06	0,08	0,08
	Mediana jitter w łączu w górę [ms]	0,19	0,2	0,26	0,22
	Mediana MOS [ms]	4,4	4,4	4,4	4,4
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,73	100	100	99,97

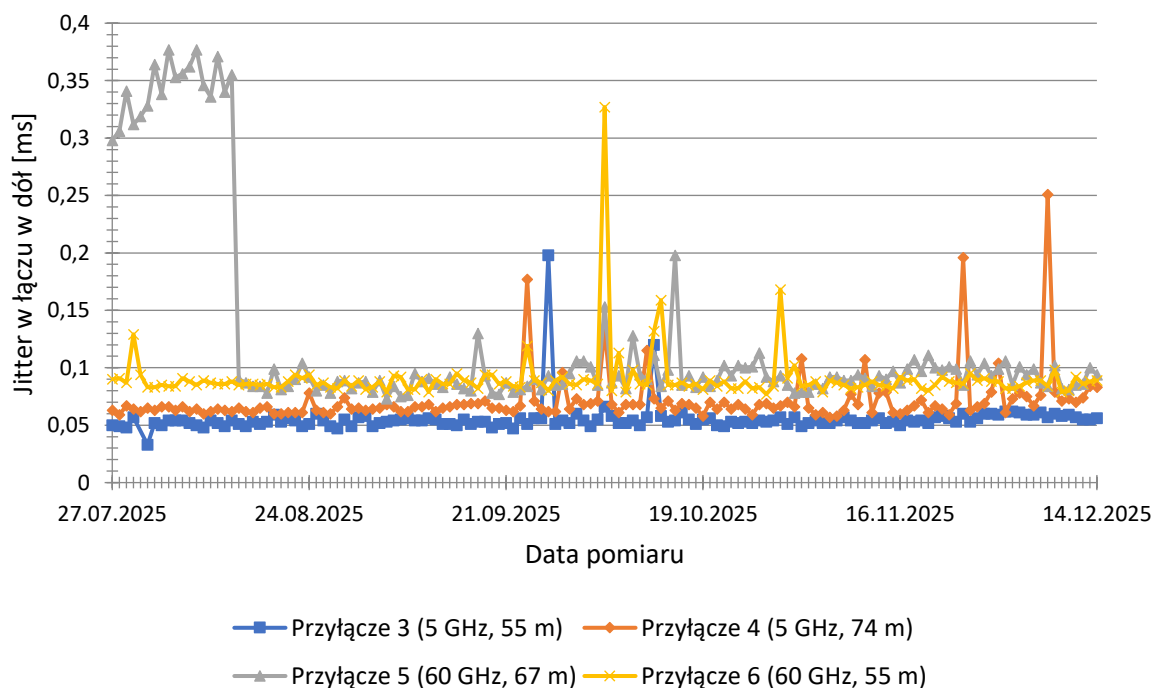
Dla przyłączy o długościach od 50 do 100 m wartości jittera pozostają bardzo niskie i stabilne zarówno w łączu w dół, jak i w górę. Mediany wartości jittera w łączu dół mieszczą się w przedziale 0,05 – 0,08 ms, natomiast w łączu w górę 0,19 – 0,26 ms, co oznacza, że został zachowany duży margines względem progu 30 ms.

Na wykresach widoczne są pojedyncze, krótkotrwałe wzrosty jittera (szczególnie dla przyłączy 4, 5 i 6), jednak mają one charakter incydentalny i nie wpływają na rozkład statystyczny ani ciągłość transmisji. Brak jest okresów utrzymującego się podwyższonego jittera.

Wartości MOS = 4,4 dla wszystkich przyłączy jednoznacznie potwierdzają bardzo dobrą jakość rozmów głosowych, a wskaźniki sukcesu bliskie 100% wskazują na stabilną realizację testów. W konsekwencji wszystkie analizowane przyłącza w zakresie 50 – 100 m w pełni spełniają wymagania jakościowe dla usług VoIP realizowanych z wykorzystaniem protokołu UDP.



Rysunek 33. Mediana dobowa wartości jittera w łączu w górę dla kategorii VoIP UDP jitter



Rysunek 34. Mediana dobowa wartości jittera w łączu w dół dla kategorii VoIP UDP jitter

7.8.3. Przyłącza >150m

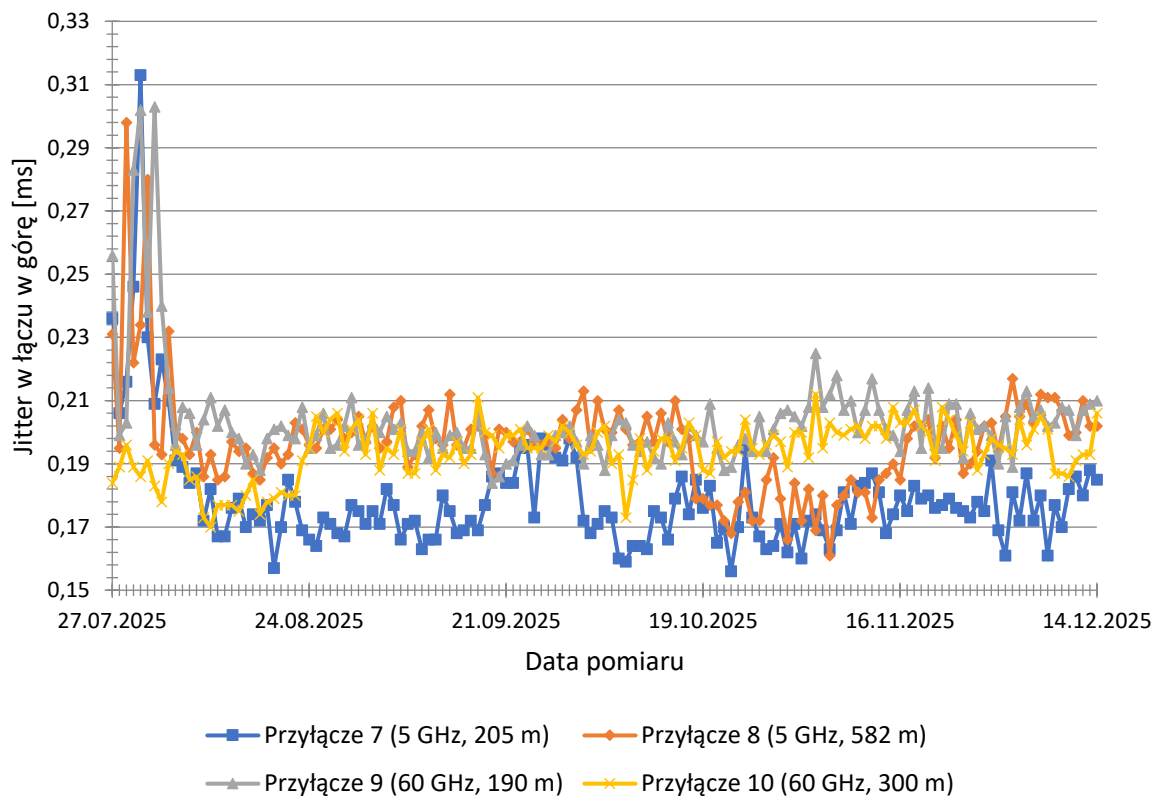
Tabela 27. Wyniki pomiarów dla kategorii VoIP UDP jitter

Przyłącze		7	8	9	10
Okres		27.07-15.12			
VoIP UDP jitter	Mediana jitter w łączu w dół [ms]	0,06	0,06	0,06	0,07
	Mediana jitter w łączu w górę [ms]	0,18	0,2	0,2	0,19
	Mediana MOS [ms]	4,4	4,4	4,4	4,4
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	100	100	100

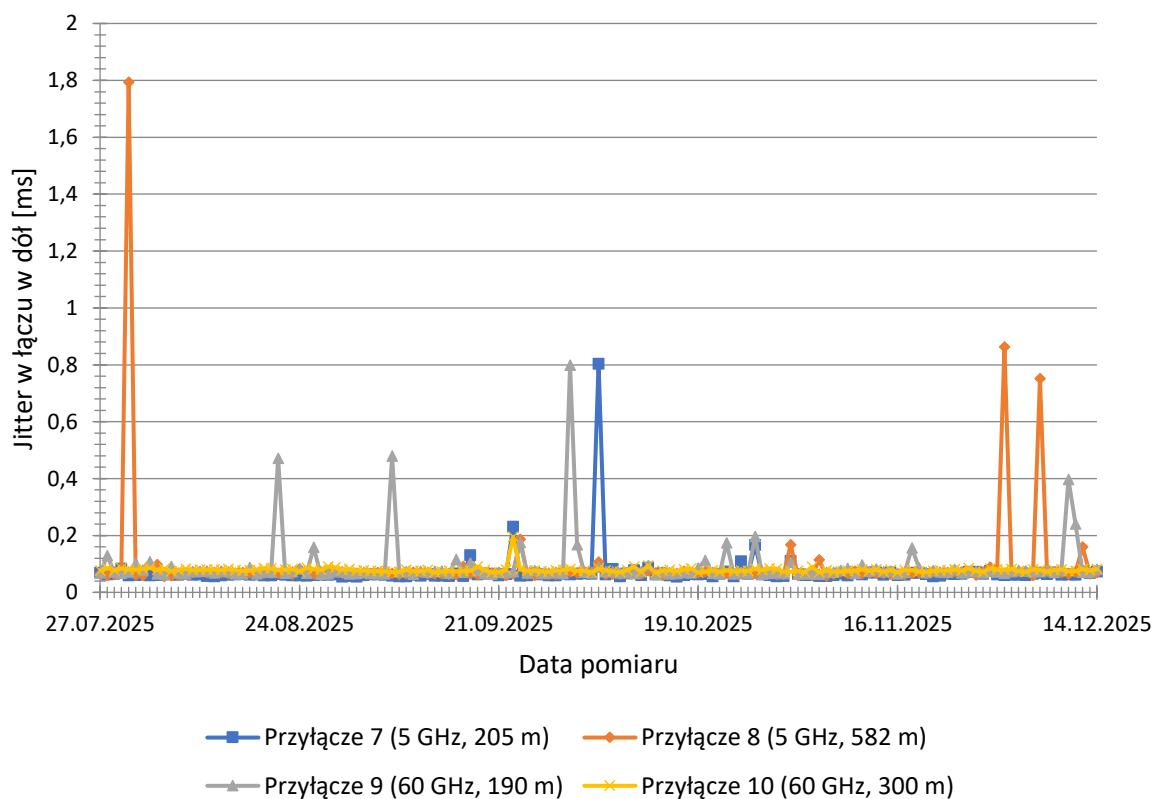
Dla przyłączy o długościach powyżej 150 m jitter VoIP utrzymuje się na bardzo niskim i stabilnym poziomie, niezależnie od kierunku transmisji. Mediany wartości jittera w łączu w dół mieszczą się w przedziale 0,06 – 0,07 ms, natomiast w łączu w górę 0,18 – 0,20 ms, co oznacza, że został zachowany bardzo duży margines względem progu 30 ms wymaganego dla stabilnej transmisji głosu.

Na przebiegach czasowych widoczne są pojedyncze, krótkotrwałe wzrosty wartości jittera, w szczególności w łączu w dół (m.in. dla Przyłączy 8 i 9), jednak mają one charakter incydentalny i nie prowadzą do utrzymujących się zaburzeń synchronizacji pakietów. Nie odnotowano okresów utrzymującego się podwyższonego jittera, które mogłyby negatywnie wpłynąć na jakość rozmów.

Wysoką jakość połączeń głosowych potwierdzają nie tylko bardzo niskie wartości jittera, ale również mediana MOS równa 4,4 uzyskana dla wszystkich przyłączy oraz pełny wskaźnik sukcesu. Oznacza to, że nawet przy długościach łączy przekraczających 150 m transmisja VoIP pozostaje odporna na krótkotrwałe zakłócenia, a obserwowane wahania parametrów nie przekładają się na pogorszenie jakości rozmów z punktu widzenia użytkownika.



Rysunek 35. Mediana dobowa wartości jitterar w łączu w górę dla kategorii VoIP UDP jitter



Rysunek 36. Mediana dobowa wartości jittera w łączu w dół dla kategorii VoIP UDP jitter

7.9. Wideokonferencja

7.9.1. Przyłącza 10-20 m

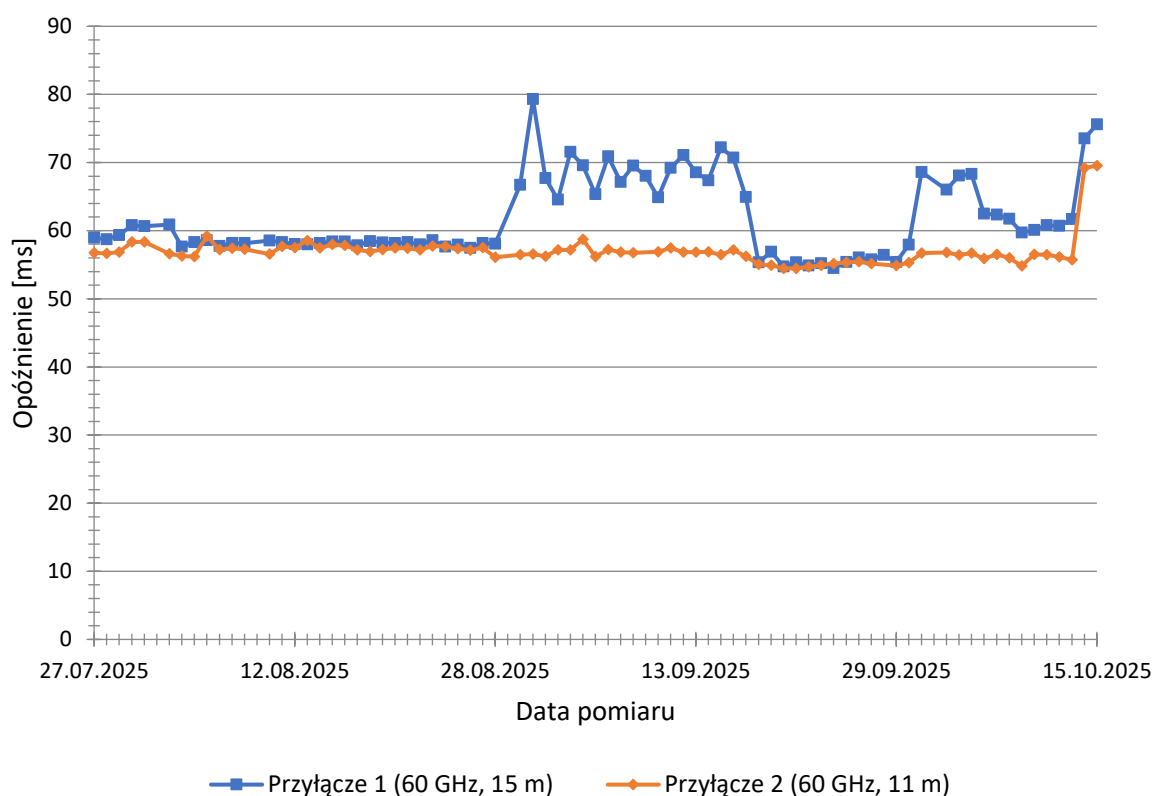
Tabela 28. Wyniki pomiarów dla kategorii wideokonferencja

	Przyłącze	1	2
	Okres	27.07-15.10	
Wideokonferencja	Średnia opóźnień [ms]	61	57
	Mediana opóźnień [ms]	41	40
	10. percentyl opóźnienia [ms]	10	9
	90. percentyl opóźnienia [ms]	114	113
	Wskaźnik sukcesu [%]	100	99,98

Uzyskane wartości opóźnień dla obu przyłączy mieszczą się w zakresie zapewniającym bardzo dobre warunki dla realizowania usługi wideokonferencji. Mediany opóźnień na poziomie 40 – 41 ms oraz średnie wartości opóźnień na poziomie 57 – 61 ms pozostają wyraźnie poniżej progu 150 ms, co zapewnia komfortową komunikację głosową oraz brak zauważalnych opóźnień podczas rozmowy. .

Rozkład wyników wskazuje, że przez zdecydowaną większość czasu opóźnienia utrzymują się na stabilnym poziomie, co potwierdzają niskie wartości 10. percentyla (9–10 ms). Nawet wartości odpowiadające 90. percentylowi (113–114 ms) nie przekraczają granicy uznawanej za bardzo dobrą jakość, a widoczne na wykresie okresowe wzrosty opóźnień nie mają charakteru trwałego.

Wysoki wskaźnik sukcesu, bliski 100%, potwierdza ciągłość realizacji połączeń bez przerw. W rezultacie oba przyłącza 60 GHz o długościach od 11 do 15 m zapewniają warunki w pełni odpowiednie do prowadzenia wideokonferencji w czasie rzeczywistym, bez ryzyka zakłóceń wpływających na komfort komunikacji.



Rysunek 37. Średnia dobowa wartość opóźnienia dla kategorii usługi wideokonferencji

7.9.2. Przyłącza 50-100 m

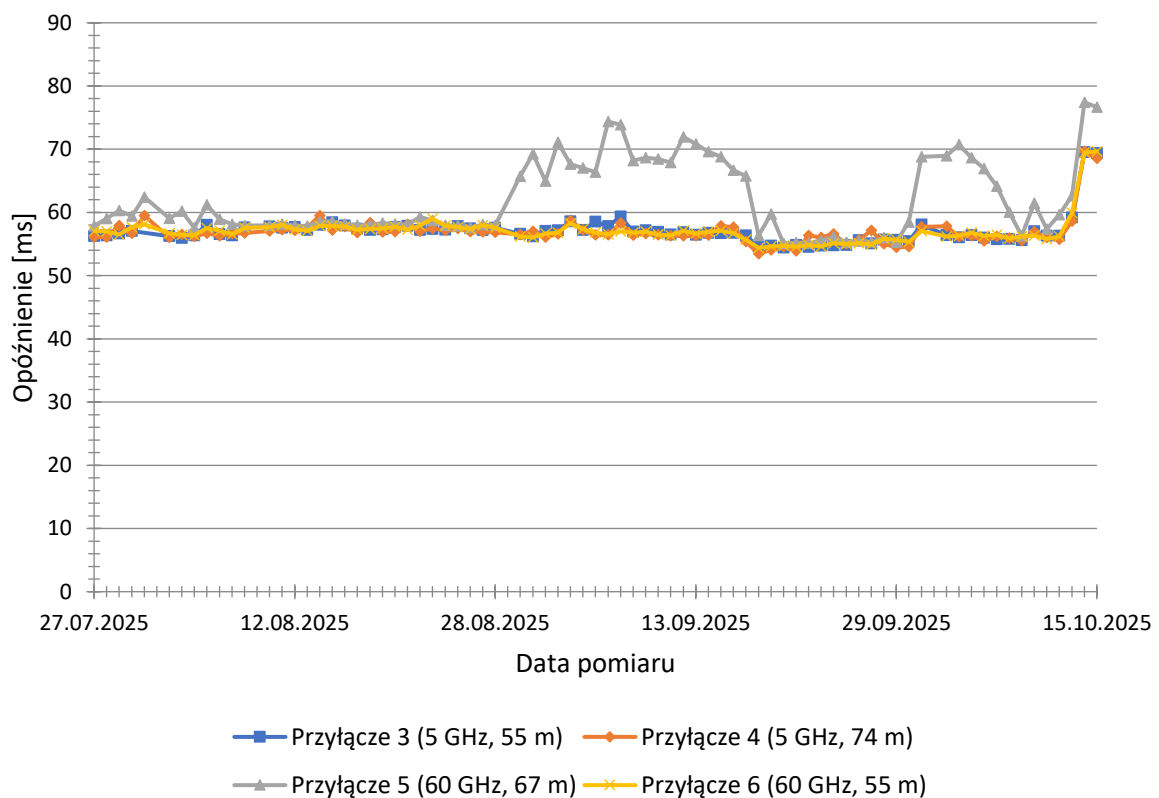
Tabela 29. Wyniki pomiarów dla kategorii usługi wideokonferencji

		Przyłącze	3	4	5	6
		Okres	27.07-15.12			
Wideokonferencja	Średnia opóźnień [ms]		58	58	61	58
	Mediana opóźnień [ms]		40	40	41	40
	10. percentyl opóźnienia [ms]		9	9	10	9
	90. percentyl opóźnienia [ms]		113	113	114	113
	Wskaźnik sukcesu [%]		99,99	100	99,99	100

W przypadku przyłączy 3 – 6 wartości opóźnień mieszczą się w przedziale odpowiadającym bardzo dobrym warunkom dla wideokonferencji. Mediany opóźnień na poziomie 40 – 41 ms oraz średnie wartości opóźnień rzędu 58 – 61 ms pozostają wyraźnie poniżej progu 150 ms, co oznacza brak zauważalnych opóźnień w komunikacji głosowej i wideo.

Rozkład wyników jest stabilny w całym okresie pomiarowym, co potwierdzają niskie wartości 10. percentyla (9 – 10 ms). Wartości 90. percentyla opóźnienia nie przekraczają 113–114 ms, a więc pozostają w zakresie co zapewnia komfortową komunikację głosową oraz brak zauważalnych opóźnień podczas rozmowy. Widoczne na wykresie okresowe wzrosty opóźnień, szczególnie dla przyłącza 5, nie mają charakteru trwałego i nie prowadzą do pogorszenia jakości interakcji.

Wysokie wartości wskaźnika sukcesu (bliskie 100%) potwierdzają ciągłość połączeń. W efekcie wszystkie analizowane przyłącza w zakresie od 50 do 100 m spełniają wymagania jakościowe dla wideokonferencji w czasie rzeczywistym.



Rysunek 38. Średnia dobową wartość opóźnienia dla kategorii usługi wideokonferencji

7.9.3. Przyłącza >150m

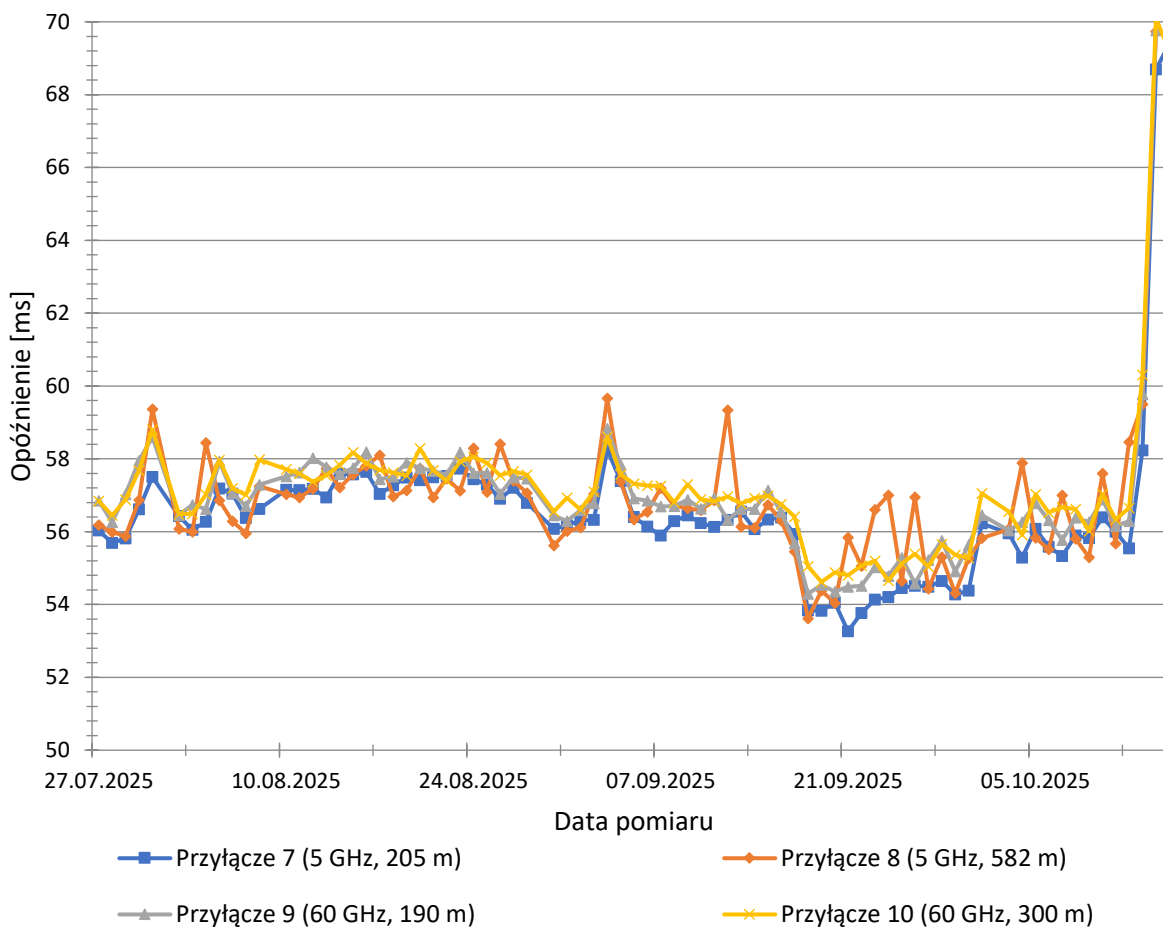
Tabela 30. Wyniki pomiarów dla kategorii usługi wideokonferencji

	Przyłącze	7	8	9	10
	Okres	27.07-15.12			
Wideokonferencja	Średnia opóźnień [ms]	57	58	58	58
	Mediana opóźnień [ms]	40	40	40	40
	10. percentyl opóźnienia [ms]	9	9	9	9
	90. percentyl opóźnienia [ms]	113	113	113	113
	Wskaźnik sukcesu [%]	99,99	99,99	100	100

Dla przyłączy o długościach powyżej 150 m opóźnienia utrzymują się na poziomie charakterystycznym dla bardzo dobrych warunków wideokonferencyjnych. Mediany opóźnień są jednakowe dla wszystkich połączeń (40 ms), a średnie wartości opóźnień mieszczą się w wąskim przedziale 57 – 58 ms, co oznacza stabilne parametry transmisji w całym okresie pomiarowym.

Wartość 90. percentyla, równa 113 ms dla wszystkich przyłączy, pozostaje wyraźnie poniżej granicy 150 ms, uznawanej za próg bardzo dobrej jakości. Widoczne na wykresie krótkotrwałe wzrosty opóźnień, w tym wyraźny skok na końcu okresu pomiarowego, nie mają charakteru długotrwałego i nie zmieniają ogólnej oceny jakości.

Wskaźnik sukcesu na poziomie 99,99 – 100% potwierdza ciągłość realizacji połączeń. W rezultacie wszystkie analizowane przyłącza w tej grupie spełniają wymagania jakościowe dla usługi wideokonferencji w czasie rzeczywistym, nawet przy długościach łączy przekraczających 150 m.



Rysunek 39. Średnia dobowa wartość opóźnienia dla kategorii usługi wideokonferencji

8. Koszt wdrożenia

W realizowanym zadaniu całkowity koszt wdrożenia leżał po stronie operatora hurtowego, jednak dokładna analiza kosztów została wykonana przez Instytut Łączności – PIB w raporcie z 2024 r. dotyczącym bezprzewodowych przyłączy telekomunikacyjnych.

Oszacowano wtedy, że koszt wykonania przyłącza bezprzewodowego punkt-punkt (układanie okablowania, montaż urządzeń radiowych, wykonanie przyłącza energetycznego z licznikiem energii elektrycznej, przebijanie otworów w stropach i ścianach) wynosi 5 731,41 zł netto. Do tej ceny należy dodać koszt pary urządzeń radiowych, który w zależności od zasięgu i częstotliwości wynosił w realizowanym wdrożeniu około:

- 4 500 zł – przyłącze o długości ponad 150 m, na częstotliwość 60 GHz,
- 1 700 zł – przyłącza o długości 10-20 m i 50-100 m, na częstotliwości 60 GHz.
- 1 000 zł – wszystkie długości przyłącza, na częstotliwości 5 GHz.

Należy uwzględnić, że koszt urządzeń radiowych może znacząco różnić się w zależności od producenta oraz samych parametrów urządzeń (obsługiwane pasma, dostępne szerokości

kanatów radiowych, dostępne rodzaje modulacji, precyzja wykonania, odporność na warunki atmosferyczne).

9. Podsumowanie

W raporcie przedstawiono praktyczną weryfikację wyników pracy teoretycznej wykonanej w roku 2024. Opisano metodę wdrożenia, uruchomienia i monitorowania 10 przyłączy bezprzewodowych w wytypowanych lokalizacjach. Zaprezentowano przebieg pomiarów, uzyskane wyniki oraz kluczowe trudności napotkane podczas całego okresu pomiarowego.

Do testów wykorzystane zostały urządzenia radiowe dostępne na polskim rynku, działające w pasmach nielicencjonowanych zgodnie z obowiązującymi regulacjami. Instalacje zostały tak zaplanowane, aby objąć trzy kluczowe dla potrzeb Ministerstwa Cyfryzacji przedziały długości tras radiowych: krótkie odcinki (w zakresie 10 – 20 m), średnie odcinki (w zakresie 50 – 100 m) oraz odcinki długie (powyżej 150 m).

Przeanalizowano wyniki pomiarów z podziałem na dwie kategorie:

- QoS, do której zaliczają się:
 - przepływność podczas pobierania lub wysyłania danych,
 - wskaźnik utraty pakietów IP,
 - opóźnienie pakietu IP w obie strony,
 - zmienność opóźnienia pakietów IP,
- QoE, do której zaliczają się:
 - opóźnienia w grach online,
 - czas tłumaczenia nazw domen (DNS),
 - przepływność podczas oglądania wideo na platformie Netflix,
 - opóźnienia podczas przeglądania mediów społecznościowych,
 - MOS podczas rozmowy głosowej VoIP,
 - opóźnienia podczas wideokonferencji.

Parametry QoS, wg wytycznych BEREC, określające minimalne wymagania, pozwalają stwierdzić, że nie wszystkie przyłącza spełniły klasyfikują się jako VHCN. Poniżej przedstawiono wnioski płynące z przeprowadzonych pomiarów.

- 1) Przepływność podczas pobierania lub wysyłania danych była powyżej oczekiwanych progów 350 Mb/s dla pobierania i 50 Mb/s dla wysyłania dla 9 z 10 przyłączy. Przyłącze nr 3 (w paśmie 5 GHz, o długości 55 m) nie spełniło wymagań w zakresie przepływności podczas pobierania plików osiągając średni wynik równy 307 Mb/s (wymagane 350 Mb/s). W tym przypadku zapewnienie stosownego QoS mogłoby zapewnić łącze w paśmie 60 GHz.
- 2) Wskaźnik utraty pakietów obciążony był istotnym błędem, ponieważ od dnia 7 listopada 8 z 10 przyłączy doświadczyło znaczącego wzrostu utraty pakietów. Na dzień publikacji niniejszego raportu zweryfikowano, że nie wystąpiły problemy po stronie

operatora hurtowego i poproszono Urząd Komunikacji Elektronicznej o weryfikację po stronie serwera pomiarowego. Analiza wyników przed tą datą pozwala stwierdzić, że średnia utrata pakietów dla 8 przyłączy wynosiła 0,01%, dla 1 przyłącza (60 GHz, 11 m) wynosiła 0,02% oraz dla 1 przyłącza (5 GHz, 55 m) wynosiła 0,41%. Oznacza to, że po wykluczeniu ostatniego miesiąca pomiarów, 8 z 10 przyłączy spełnia wymagania co do dopuszczalnej utraty pakietów. Należy zauważyć, że dla obu przyłączy niespełniających wymagania utraty pakietów poniżej 0,01%, decydujące było 10% najgorszych wyników, ponieważ 90. percentyl dla obu tych przyłączy w okresie przed 7 listopada wynosił 0%. Przyłączy 5 GHz 55 m mogłoby zostać zastąpione przyłączem w paśmie 60 GHz zapewniając odpowiedni poziom tego wskaźnika. W przypadku przyłącza 60 GHz dla odległości 11 m mogła zostać wykonana np. niedostatecznie precyzyjna wizacja (ustawienie anten, co jest bardzo istotne w przypadku anten o bardzo dużej kierunkowości), gdyż przez cały okres pomiaru charakteryzowało się ono nieznacznie gorszymi parametrami niż konkurencyjne łącza w paśmie 60 GHz, o podobnej długości i doświadczało większej utraty pakietów tylko w pojedyncze dni podczas całego pomiaru. Na takiej odległości uzyskanie odpowiedniej jakości wskaźnika QoS w paśmie 60 GHz powinno zostać osiągnięte.

- 3) Opóźnienie pakietów w obie strony, mierzone protokołem ICMP, oceniono na spełniające wymagania BEREC dla 9 z 10 przyłączy. Jedno przyłączy (5 GHz, 74 m) przez cały okres trwania pomiarów cechowało się znacząco wyższymi opóźnieniami. Wskazuje to na nieodpowiednią konfigurację tego przyłącza. Możliwe byłoby też zastąpienie go przyłączem w paśmie 60 GHz.
- 4) Zmierzona zmienność opóźnienia, dla pakietów UDP podczas rozmowy VoIP, wykazała, że wszystkie łącza spełniły wymagania BEREC.
- 5) Dostępność usług IP nie była mierzona wprost ze względu na brak implementacji takiej funkcjonalności w urządzeniu Whitebox 8+.
- 6) Wszystkie przyłącza spełniły wymagania QoE, zachowując w wielu przypadkach znaczne marginesy od progu pogorszenia jakości działania usług.

Z analizy wyników pomiarów wynika, że zarówno łącza w paśmie 5 GHz, jak i 60 GHz, mogą być z powodzeniem wykorzystywane w sieciach dostępowych, przy czym kluczowe znaczenie ma prawidłowe zaprojektowanie i konfiguracja każdego przyłącza oraz weryfikacja warunków radiowych na etapie wdrożenia, zapewniające stabilną pracę w dalszej eksploatacji. Oba pasma różnią się zakresem zastosowań, jednak dla badanych odległości (maksymalna długość przyłącza wynosiła 300 m) skutecznie można stosować przyłącza pracujące w obu badanych pasmach. Przyłącza bezprzewodowe w paśmie 5 GHz mogą być bardziej podatne na zakłócenia pochodzące od innych urządzeń radiowych pracujących w tym samym, intensywnie wykorzystywanym paśmie, stąd ich zastosowanie winno być ograniczone do miejsc, w których w wyniku przeprowadzonych pomiarów potwierdzono brak występowania takich zakłóceń. Wskazuje to, że korzystniejsze jest do celów bezprzewodowych przyłączy w sieciach dostępowych wykorzystywanie rozwiązań w paśmie 60 GHz, które jest wykorzystywane znacznie

rzadziej i w którym występuje mniej zakłóceń ze względu na specyficzne warunki propagacyjne. Zmienne warunki pogodowe (wiatr, deszcz, sporadyczne opady śniegu) w całym okresie pomiarowym nie wpłynęły w sposób obserwowalny na pracę przyłączy, co wskazuje, że dobrane parametry pracy urządzeń radiowych (zgodne z regulacjami dla urządzeń klasy 1) pozwalają na efektywną pracę przy długości trasy radiowej do 300 m (lub dłuższej, co jednak nie zostało to zweryfikowane pomiarowo w niniejszym raporcie).

W oparciu o powyższe wnioski, rekomenduje się możliwość wykorzystania bezprzewodowych przyłączy pracujących w pasmach nielicencjonowanych 5 GHz i 60 GHz jako rozwiązań alternatywnych dla łączy światłowodowych na trasach o długości do 300 m (lub dłuższych pod warunkiem odpowiedniego zaprojektowania i weryfikacji). Jednocześnie zaleca się, aby w przypadku wprowadzania regulacji krajowych lub udzielaniu finansowego wsparcia na cele budowy bezprzewodowych przyłączy telekomunikacyjnych, zwrócić szczególną uwagę na fakt, że przyłącza pracujące w paśmie 60 GHz umożliwiają osiągnięcie wyższych przepływności, niż przyłącza pracujące w paśmie 5 GHz. Warunkiem stosowania takich przyłączy jest odpowiednie ich zaprojektowanie pod kątem technicznym, uwzględniające stosowne marginesy dla wysokiej procentowej dostępności łącza (np. 99,999% roku) w zmieniających się warunkach propagacyjnych wynikających z powodu zjawisk atmosferycznych: opadów czy tłumienia w gazach (tj. para wodna, tlen). Może to mieć kluczowe znaczenie dla przyszłych (ostrzejszych) wymagań lub tworzenia przyłączy typu punkt – wiele punktów. Ponadto zaleca się, aby wdrażanie przyłączy było monitorowane, np. w ramach Systemu Monitorowania Jakości Internetu, za który odpowiada Urząd Komunikacji Elektronicznej.

Publikacja wyraża jedynie poglądy autora/ów i nie może być utożsamiana z oficjalnym stanowiskiem Ministerstwa Cyfryzacji.