

## Właściwości PEM o częstotliwościach terahercowych w zastosowaniu do technologii 6G

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono problemy związane z emisją pola elektromagnetycznego o częstotliwościach terahercowych. Przedstawiono właściwości pasma terahercowego w widmie częstotliwości. Omówiono bliżej właściwości absorpcyjne w zakresie częstotliwości terahercowych. Wskazane zostały korzyści z implementacji technologii 6G. Omówiono techniczne aspekty technologii 6G, wykorzystującej pasmo terahercowe pola elektromagnetycznego, oraz zadania jakie stoją przed naukowcami i inżynierami, planującymi system 6G. Przytoczone zostały możliwości aplikacyjne telefonii szóstej generacji

**Abstract.** The article presents problems related to the emission of the electromagnetic field at terahertz frequencies. Properties of the terahertz band in the frequency spectrum are presented. The phenomena of absorption occurring at the THz frequencies has been shown and described. The technical aspects of 6G technology, which will use the terahertz band of the electromagnetic field, were discussed. The anticipated sixth generation telephony applications are cited (**The features of EMF of terahertz frequencies in application to 6G technology**).

**Słowa kluczowe:** pasmo terahercowe, technologia 6G, właściwości fizyczne pasma terahercowego

**Keywords:** terahertz band, 6G technology, physical properties of terahertz band

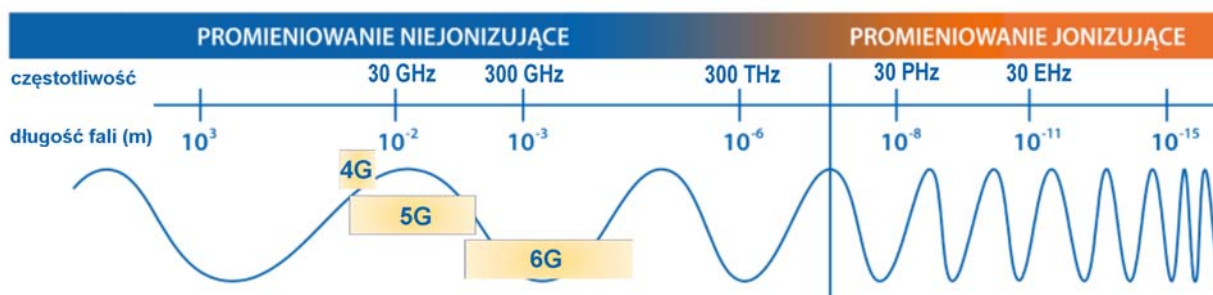
### Wstęp

Sukcesywne wprowadzenie sieci bezprzewodowych piątej generacji (5G) tworzy postęp technologiczny wyrażony w dążeniu do zwiększenia szybkości transmisji danych. Jednym z elementów realizacji tego dążenia jest większa częstotliwość pola elektromagnetycznego w technologii 5G. A zatem dalsze zwiększanie szybkości transmisji danych związane jest z jeszcze większymi częstotliwościami PEM, a to prowadzi do realizacji następnego etapu ewolucji technologii komunikacji bezprzewodowej, a mianowicie technologii 6G. Wykraczające poza częstotliwości gigahercowe częstotliwości terahercowe obiecują szerokie spektrum zastosowań, szybkość transmisji danych od 100 Gbps do 1 Tbps, masową łączność, gęstszą architekturę sieci i bardzo bezpieczne transmisje. Technologia oparta na takich wysokich częstotliwościach stanowi szóstą generację w rozwoju telekomunikacji bezprzewodowej (technologia 6G). Wiele wiodących inicjatyw badawczych w zakresie technologii 6G bada możliwości wykorzystania pasma THz, a wiodącym w tym obszarze jest „Program flagowy 6Genesis (6GFP)” [1]. Technologie telekomunikacyjne, wykorzystujące w transmisji danych pasmo terahercowe identyfikowane są jako istotny element następnej rewolucji IT. Wraz ze standaryzacją 5G, komercyjna komunikacja na falach milimetrowych (*mmWave*) stała się rzeczywistością, pomimo wszystkich obaw związanych z niekorzystną charakterystyką propagacji tych częstotliwości. Pomimo, że systemy 5G są nadal wdrażane, twierdzi się, że osiągnięte w tych systemach szybkości transmisji rzędu gigabitów na

sekundę mogą nie wystarczyć do obsługi wielu nowych aplikacji, takich jak gry 3D i rozszerzona rzeczywistość (augmented reality). Takie aplikacje będą wymagały szybkości przesyłania danych od kilkuset gigabitów na sekundę do kilku terabitów na sekundę przy niskim opóźnieniu i wysokiej niezawodności. Parametry te mają stanowić cele projektowe systemów komunikacyjnych nowej generacji 6G. Biorąc pod uwagę potencjał terahercowych systemów komunikacyjnych w zapewnianiu takich szybkości transmisji danych na krótkich dystansach, są one powszechnie uważane za kolejną granicę w badaniach nad komunikacją bezprzewodową. Głównym celem artykułu jest przekazanie informacji na temat pasm *mmWave* i THz, aby umożliwić zarówno docenienie konieczności używania tych pasm do bezprzewodowej telekomunikacji komercyjnej, jak i wskazać na kluczowe kwestie projektowe dla systemów łączności, działających w tych pasmach.

### Pasmo terahercowe w widmie częstotliwości

Pasmo terahercowe jest umieszczone w obszarze fal elektromagnetycznych pomiędzy falami o długościach sub- i milimetrowych, a pasmem dalekiej podczerwieni (*infrared - IR*). Było to przez długi czas najmniej zbadaną częścią widma elektromagnetycznego. Jednak ostatnie postępy w generowaniu sygnału THz, modulacji i metodach emisji zapełniają tę lukę (Rys.1).



Rys. 1 Widmo fal elektromagnetycznych z zaznaczonym pasmem 4G, 5G oraz 6G

Pasma THz oferuje znacznie większe szerokości pasma transmisji w porównaniu z pasmem milimetrycznym i korzystniejsze ustawienia propagacji w porównaniu z pasmem IR; może w ten sposób uzupełniać konwencjonalne widmo częstotliwości radiowych. Jednak, aby w pełni wykorzystać potencjał komunikacji THz, trzeba stawić czoła kilku nowym wyzwaniom. Na przykład transmisje THz powodują bardzo duże straty propagacji, co znacznie ogranicza odległości komunikacyjne.

Pasma transmisji terahercowej zwiększa możliwość, ale i zwiększa liczbę wyzwań związanych z tak wysokimi częstotliwościami.

Kluczowe wyzwania komunikacji terahercowej to:

(i) szeroko dostępna przepustowość do obsługi bardzo wysokich szybkości transmisji danych

(ii) duża strata mocy wynikająca z wysokiej częstotliwości

Pasma THz muszą sprostać ważnemu wyzwaniu transferu danych na stosunkowo duże odległości ze względu na wysoką utratę propagacji i charakterystykę absorpcji atmosferycznej. Charakterystyka propagacji fal milimetrycznych i submilimetrycznych (THz) podlega warunkom atmosferycznym ze względu na widoczne efekty absorpcyjne. Skondensowana materia może być *grosso modo* zgrupowana w trzy kategorie: woda, metal (przewodniki) i dielektryki. Woda, jako silnie spolaryzowany płyn, jest najsilniejszym absorberem energii w ekspozycji terahercowej, metal jest materiałem najsilniej odbijającym w takiej ekspozycji, a dielektryki są w zasadzie transparentne dla terahercowej fali elektromagnetycznej (Tab.1).

Tab. 1. Właściwości skondensowanej materii w paśmie terahercowym [2]

Rodzaj materiału	Właściwości
woda (płynny)	wysoka absorpcja (przy 1 THz współczynnik absorpcji $\alpha = 250 \text{ cm}^{-1}$ )
metal (przewodniki)	wysoki współczynnik odbicia (przy 1 THz ponad 99,5%),
Dielektryk (izolatory)	niska absorpcja (przy 1 THz współczynnik absorpcji $\alpha < 0,5 \text{ cm}^{-1}$ )

Zjawisko absorpcji energii występuje również przy niższych częstotliwościach pola elektromagnetycznego i może ujawniać się w górnych granicach pasma przewidzianego dla technologii 5G, ale dopiero przy częstotliwościach terahercowych staje się problemem.

Stąd, podczas gdy w sieciach antenowych, satelitarnych i samochodowych częstotliwości terahercowe mogą zapewniać komunikację o małych opóźnieniach, straty w propagacji mogą zmniejszać korzyści stosowania 6G. Osłabianie propagacji fali elektromagnetycznej może też powodować istotne zmiany w infrastrukturze sieci – zwiększy się liczba anten i ich zagęszczenie w środowisku. Z tego powodu komunikacja oparta na częstotliwościach terahercowych zostanie uzupełniona o elementy umożliwiające działanie zarówno na poziomie infrastruktury (hardware), jak i algorytmiki (software). Na poziomie infrastruktury pojawiają się technologie wykraczające poza 5G, takie jak rekonfigurowalne inteligentne powierzchnie, ultra-masywne konfiguracje MIMO oraz zintegrowany dostęp i backhaul, co zwiększa korzyści płynące z komunikacji terahercowej. Na poziomie algorytmicznym nowe techniki przetwarzania sygnałów i protokoły sieciowe mogą obejść quasi-optyczne charakterystyki propagacji terahercowej i złagodzić charakterystykę mikrofal, aby umożliwić bezproblemową łączność. Wydajne przetwarzanie sygnału w paśmie podstawowym terahercowym może dodatkowo zmniejszyć lukę między

ogromnymi dostępnymi szerokościami pasma a ograniczonymi, najnowocześniejszymi prędkościami próbkowania częstotliwości.

## Technologia 6G

Potrzeba wprowadzenia kolejnej generacji telefonii komórkowej wynika z gwałtownego zapotrzebowania na usługi telekomunikacyjno-informatyczne (Tab.2).

Tab.2. Trendy światowe w komunikacji bezprzewodowej

	2010	2020	2030	jednostki
Liczba abonentów	5,32	10,7	17,1	mlrd
Liczba smartfonów	0,213	7,0	97	mlrd
Pojemność połączeń	7,462	62	516	eksabitów/miesiąc
Połączenia na użytkownika	1,35	10,3	277,1	gigabitów/miesiąc

Na wyzwania społeczne wskazane w Tab.2 na rok 2030 będzie próbowała odpowiedzieć technologia szóstej generacji telefonii komórkowej. W analizach przedstawianych w wielu publikacjach na temat 6G wymienia się obszary, w których technologia 6G wnosi nowe elementy do dotychczasowych generacji. Tutaj wymienimy kilka z tych obszarów [3,4]:

### a) duże systemy obliczeniowe

Technologia 6G połączy usługi komunikacyjne z obliczeniowym, przy czym obliczenia te, ze względu na złożoność i wielowymiarowość sieci, są też złożone i wielowymiarowe, a przede wszystkim realizują bardzo duże zadania obliczeniowe. Algorytmy obliczeniowe w sieciach 6G wymagają podejścia dynamicznego i zsynchronizowanego z systemem połączeń bezprzewodowych. Obliczenia w technologii 6G wymagają nowych narzędzi algorytmicznych, takich jak przetwarzanie brzegowe, czy sfederowana sztuczna inteligencja.

### b) Transfer pięciu zmysłów

Technologia 6G to komunikacja szóstego zmysłu. W związku z tym, oczekuje się, że 6G będzie w stanie obsługiwać pięć zmysłów systemu komunikacji. Pięć zmysłów to wzrok, słuch, zapach, dotyk i smak. 6G wymaga bardzo dużej szybkości transmisji danych z wyjątkowo małym czasem opóźnienia (latencja). Ponadto czujniki muszą być w stanie: odtworzyć pięć zmysłów z odległych miejsc, aby zapewnić realne doświadczenie dla użytkowników, na przykład komunikacja holograficzna. Dlatego 6G koncentruje się na jakości doświadczenia (QoE - quality of experience)

### c)

Bezprzewodowe interakcje mózg-komputer  
Interfejs mózg-komputer (*brain-computer interface - BCI*) to podejście do sterowania urządzeniami, które są używane na co dzień w inteligentnych społeczeństwach, zwłaszcza w urządzeniach stosowanych w domu i w systemach medycznych. Jest to bezpośrednia ścieżka komunikacji między mózgiem, a urządzeniami zewnętrznymi. BCI pozyskuje sygnały mózgowe przesyłane do urządzenia cyfrowego do analizy i interpretacji sygnału i przygotowania kolejnych działań. Funkcje komunikacji bezprzewodowej 6G będą wspierać prawdziwe wdrożenie systemów BCI do tworzenia inteligentnego życia (*smart life*).

### d)

Komunikacja dotykowa  
Komunikacja dotykowa to gałąź komunikacji niewerbalnej wykorzystującej zmysł dotyku. Komunikacja bezprzewodowa 6G będzie obsługiwać komunikację dotykową - użytkownicy zdalni będą mogli cieszyć się

doświadczeniem dotyku poprzez interaktywne systemy czasu rzeczywistego.

e) Inteligentna opieka zdrowotna:

System 6G będzie również wykorzystany w medycznych systemach opieki zdrowotnej przez systemy bezprzewodowe 6G, szczególnie przez takie innowacje takie jak wirtualna/rozszerzona rzeczywistość, teleobecność holograficzna, mobilne przetwarzanie brzegowe czy sztuczna inteligencja. Możliwy też będzie zdalny monitoring, a nawet zdalna chirurgia. Takim aplikacjom sprzyjają szybkość transmisji danych i bardzo małe czasy opóźnień, a także przewidywana duża niezawodność sieci.

f) Internet Wszystkiego (Internet of Everything)

Internet Wszystkiego jest ciągłą integracją i autonomiczną koordynacją bardzo dużej obliczanych elementów i czujników, obiektów i urządzeń, ludzi, procesów oraz wszystkich danych infrastruktury internetowej. Technologia 6G zapewni pełne wsparcie Internetowi Wszystkiego (IoE). To jest oczywiście ten sam rodzaj technologii informatycznej jak Internet Rzeczy (IoT), jest to jednak parasol, pod którym zintegrowane są cztery grupy elementów, takie jak dane, ludzi, procesy i fizyczne urządzenia. Internet Rzeczy dotyczy obiektów lub urządzeń fizycznych i komunikacji między nimi, a Internet Wszystkiego wprowadza inteligencję sieciową do związania wszystkich ludzi, danych, procesów i obiektów w jednym systemie. IoE będzie używana w inteligentnym społeczeństwie, realizowanym w inteligentnych pojazdach, inteligentnym zdrowiu i inteligentnym przemyśle.

g) Rewolucja przemysłowa

Istnieje duża szansa na transformację Przemysłu 4.0 w Przemysł 5.0 w 2030 r. Przemysł 4.0 to „cyfryzacja” a Przemysł 5.0 to „Personalizacja i Inteligencja”. Realizacja tych haseł wymaga zarówno technologii 5G jak i 6G. Przemysł 5.0 pozwoli klientowi dostosować usługi do jego potrzeb poprzez wykorzystanie technologii 6G. Zadania przemysłu 5.0 zrealizuje przemysłowy Internet Wszystkiego. Wykorzystane zostaną też możliwości sztucznej inteligencji.

h) zmiana paradygmatu

Zgodnie z przewidywaniami rynku usług informatyczno-telekomunikacyjnych w 2030 roku nastąpi zmiana paradygmatu. Obowiązujący paradygmat opisuje usługi telekomunikacyjne i informatyczne jako łączność człowieka z człowiekiem, czy, w mniejszym stopniu, człowieka z inteligentną maszyną. Nowy paradygmat opisywał będzie te usługi jako łączność pomiędzy elementami sztucznej inteligencji. Dr Ari Pouttu, profesor uniwersytetu w Oulo, Finlandia, pisze, że

- wiele z technologii 6G zostanie zrealizowane nie dla potrzeb ludzkich, ale dla inteligentnych maszyn,
- opóźnienia mniejsze od jednej milisekundy są poza możliwościami ludzkiej percepcji, ale są to wciąż istotne czasy dla maszyn inteligentnych,
- 6G będzie całkowicie inspirowana potrzebami sztucznej inteligencji [1].

Taki sposób działania systemu 6G pociąga za sobą konieczność opracowania nowych narzędzi do prawidłowego zbierania i przekazywania informacji pomiędzy inteligentnymi maszynami.

### Problemy techniczne 6G

Zgodnie ze wskazaniami Komisji Europejskiej, każdy kraj Unii Europejskiej miał mieć uruchomioną sieć 5G w przynajmniej jednym mieście do roku 2020. Do roku 2025 pokryte mają być obszary miejskie oraz główne szlaki

transportowe. Ze względu na pandemię zalecenie to w różnych krajach UE jest nie wykonalne (vide Polska), a taka sytuacja w pewnym stopniu ogranicza działania przygotowujące implementację sieci 6G. Niżej podane są główne bariery technologiczne związane z wprowadzaniem sieci 6G [5].

a) Niedostatek rozwiązań technologicznych

Wielu badaczy uważa, że, ze względu na wciąż nie w pełni, albo w małym wymiarze opracowaną strukturę sieci 5G, nie istnieją narzędzia do wprowadzania sieci 6G. Przejście z technologii 5G do technologii 6G ma charakter wykładniczy, a zatem wystąpi potrzeba o wiele większego zaangażowania środowisk naukowych i technicznych w przygotowanie systemu 6G. Każda kolejna generacja systemów telekomunikacji bezprzewodowej dawała podstawy techniczne i intelektualne do tworzenia następnej generacji. Ze względu na prawie całkowite związanie systemu 6G ze sztuczną inteligencją pojawiają się zupełnie nowe problemy techniczne, które wymagać będą zupełnie nowego podejścia. Pomocą w tych działaniach może być wprowadzanie silniejszych związków ze sztuczną inteligencją do uruchamianego systemu 5G. Istotnym wyzwaniem dla systemu 6G jest realizacja wymagania, dotyczącego działania systemu w warunkach dużej mobilności użytkowników systemu (do 1000 km/godz.). System 5G nie zapewnia takiej możliwości, a zapewnia mniej niż oczekiwano. Dlatego wyzwanie jakie stoi przed projektantami systemu 6G jest bardzo duże. Możliwe jest włączenie do obsługi systemów mobilnych łączności satelitarnej, ale to z kolei jest działanie bardzo kosztownym, mogącym istotnie wpłynąć wysokość kosztu podróży samolotowych. Przewiduje się [3], że rozwiązanie tego technicznego problemu może przesunąć termin implementacji systemu 6G z 2030 roku na 2032 rok

b) Interoperacyjność protokołów

System 6G będzie integrował zarówno nadajniki naziemne (terrestrial), jak i sieć łączącą obiekty latające, np. sieć satelitarna (non-terrestrial). Protokoły TCP/IP używane w naziemnych sieciach komunikacyjnych są nieodpowiednie dla komunikacji satelitarnej. Dlatego wymagana jest modyfikacja w protokole TCP/IP do obsługi efektywnej komunikacji w obu sieciach. Jeśli sieci mają różne protokoły to wprowadzenie interoperacyjności stanowi poważny problem dla projektantów systemu 6G.

c) Sztuczna inteligencja

6G będzie prawdziwie mobilną komunikacją bezprzewodową opartą na sztucznej inteligencji, tj. system komunikacji będzie wystarczająco inteligentny, aby przekierowywać dane. Co więcej, sfederowana sztuczna inteligencja pomoże w zdobywaniu wiedzy udostępnianej wśród inteligentnych urządzeń. Ponadto kwantowe uczenie maszynowe zwiększy wydajność 6G na skutek inteligentnej analizy danych. Wszystkie algorytmy AI posiadają dużą złożoność obliczeniową, a zatem realizacja obliczeń zajmuje dużo czasu i dodatkowo pobiera dużo energii. Ponadto warstwa fizyczna będzie wspomagana przez sztuczną inteligencję. Jednakże, wdrożenie AI w warstwie fizycznej jest trudne ze względu na złożoność warstwy fizycznej i ograniczoną zdolność uczenia się algorytmów sztucznej inteligencji.

d) Big Data

6G na skutek realizacji Internetu Wszystkiego będzie produkować wielkie liczby danych (Big Data). Te ogromne liczby danych muszą być przechowywane, poddawane obróbce i wykorzystywane w chmurze obliczeniowej. Dane związane z Internetem Wszystkiego stanowią nowe

wyzwanie dla projektantów sieci 6G: jak sobie poradzić z taką liczbą danych. Dotychczas nie opracowano żadnego technicznego rozwiązania do gromadzenia, przetwarzania i wykorzystywania danych rzędu eksabajtów. Prawdopodobnie potrzebne będzie utworzenie oddzielnego zbiornika danych (*data silo*) jako Big Data 2.0. Już w dniu dzisiejszym liczba danych pozyskiwana w drodze choćby analizy obrazów czy analizy innych danych np. statystycznych jest bardzo duża [6-13].

### Wnioski

Każda generacja telefonii komórkowej przynosi nowe, czasem ekscytujące właściwości. System 5G dostarcza możliwości pozwalających organizować, między innymi, inteligentne miasta i domy, autonomiczny transport czy systemy telemedycyny. Tak duże możliwości, jakie daje

system 5G nie stanowią narzędzi w realizacji zadań stawianych przed systemem 6G. Technologia 6G jest kolejnym elementem w rozwoju telekomunikacji bezprzewodowej i jest pewne, że nie będzie elementem ostatnim. W artykule przedstawiono techniczne i fizyczne właściwości fali elektromagnetycznej, wykorzystującej w propagacji pasmo terahercowe. Tak wysokie częstotliwości wynikają z wymogów, jakie instytucje telekomunikacyjne stawiają przed szóstą generacją. Wymagania te są pokazane w Tab.3 w trybie porównawczym do poprzednich generacji: 4G i 5G. Oprócz wymogów, parametrów i funkcjonalności technologii 6G pokazane zostały inne technologie, które będą stowarzyszone z komunikacją 6G [14].

Tabela .3 Porównanie parametrów i funkcjonalności systemów telekomunikacyjnych [5]

generacja	4G	5G	6G
Szybkość transmisji danych	ok.50 Mb/s	ok. 10 Gb/s	ok. 1 Tb/s
Opóźnienie w transmisji danych	ok. 20 ms	<5 ms	<1 ms
Dopuszczalna prędkość terminala	do 350 km/godz.	do 500 km/godz.	do 1000 km/godz.
Integracja z łącznością satelitarną	nie	nie	pełna
Wykorzystanie sztucznej inteligencji	nie	częściowo	pełne
Pojazdy autonomiczne	nie	częściowo	pełne
Działanie w rzeczywistości wirtualnej/rozszerzonej	nie	częściowo	pełne
Komunikacja dotykowa	nie	częściowo	pełna

*Badania prowadzone również w ramach projektu POWR.02.15.00-00-3051/20.*

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Andrzej Krawczyk, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie, Instytut Transportu i Informatyki, ul. Projektowa 4, Lublin, e-mail: ankra.new@gmail.com, dr hab. inż. Ewa Korzeniewska, prof. uczelni, Politechnika Łódzka, Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej, ul. Stefanowskiego 18, 90-924 Łódź, e-mail: ewakorz@matel.p.lodz.pl, dr inż. Jacek Stańdo, prof. uczelni, Politechnika Łódzka, Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki, al. Politechniki 11, 90-924 Łódź, email: jacek.stando@p.lodz.pl

### LITERATURA

[1] <https://www.oulu.fi/6gflagship>  
 [2] Yun-Shik Lee, Principles of Terahertz Science and Technology< Springer Science+Business Media, New York, 2009  
 [3] Chowdhury, M.Z., Hossan, M.T., Hasan, M.K. et al. Integrated RF/Optical Wireless Networks for Improving QoS in Indoor and Transportation Applications. *Wireless Pers Commun* 107, 1401–1430 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5971-3>.  
 [4] Chowdhury M. Z., Shahjalal M., Ahmed S. and Jang Y. M., "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957-975, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3010270  
 [5] Nayak S., Patgiri R., 6G Communication: Envisioning the Key Issues and Challenges, *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, 2020  
 [6] Sztafrowski, D., Jakubaszko, J.: Survey identification of impact the 50 Hz magnetic field on selected biochemical parameters of human blood, *IOP Conference Series*, 2021, 1782(1), 012038

[7] Pawlak, R., Tomczyk, M., Tabaka, P., Walczak, M. Optical properties of a polymer film substrate after laser ablation of transparent conductors, *IOP Conference Series* 2021, 1782(1), 012026  
 [8] Kielbasa, P., Zagórda, M., Juliszewski, T., Akınunmade A, Tomecka S, Karczewski, J., Pysz, P.; Assessment of the possibility of using GPR to determine the working resistance force of tools for subsoil reclamation, *IOP Conference Series*, 2021, 1782(1), 012013  
 [9] Popardowski, E., Kielbasa, P., Drózd, T., Rad, M. Structure analysis of the thermal energy spectrum generated during stimulation of organic matter by an electromagnetic field, *IOP Conference Series: 2021, 1782(1), 012028*  
 [10] Knaga, J., Lis, S., Kurpaska, S., Łyszczarz, P., Tomasiak, M. Optimisation of energy use in bioethanol production using a control algorithm *Processes* 2021, 9(2), pp. 1–20, 282  
 [11] Rymarczyk, T., Gołębek, M., Rymarczyk, P., Adamkiewicz, P., Niderla, K. Examination of the impact of tank material on ultrasonic measurements, *IOP Conference Series* 2021, 1782(1), 012032  
 [12] Graczyk A., Szczesny A., Pacholski K. A selection of a voltage transducer for a flickermeter; *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, 88 (11A) 119-122  
 [13] Sekulska-Nalewajko, J., Kornaś, A., Gocławski, J., Miszalski, Z., Kuźniak, E. Spatial referencing of chlorophyll fluorescence images for quantitative assessment of infection propagation in leaves demonstrated on the ice plant: *Botrytis cinerea* pathosystem, *Plant Methods* this link is disabled, 2019, 15(1), 18  
 [14] E. Korzeniewska, A. Krawczyk, E. Łada-Tondyry, J. Plewako Technologia 5G jako etap rozwoju komunikacji bezprzewodowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, 95 (12) 144-147