

dr inż. Arkadiusz Lewandowski  
Politechnika Warszawska  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
ul. Nowowiejska 15/19  
00-665 Warszawa

## Autoreferat

**1. Imię i nazwisko:** Arkadiusz Lewandowski

**2. Wykształcenie i posiadane stopnie zawodowe**

- 2010           Doktor nauk technicznych, dyscyplina Elektronika  
Rozprawa pt. *Multi-frequency approach to vector-network-analyzer scattering-parameter measurements*, promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Dobrowolski
- 2001           Magister inżynier, specjalność Elektronika, radiokomunikacja i radiolokacja  
Praca pt. *Generator sygnału sinusoidalnego 24 GHz*, opiekun: dr inż. Wojciech Wiatr
- 2002–2010   Studia doktoranckie  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska
- 1994–2001   Studia magisterskie  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Warszawska
- 1991–1994   V Liceum Ogólnokształcące im. Ks. Józefa Poniatowskiego w Warszawie

**3. Zatrudnienie**

- 2010–dziś   Adiunkt  
Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych, Instytut Systemów Elektronicznych
- 2004–2009   Guest Researcher  
National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA
- 2002–2004   Asystent  
Przemysłowy Instytut Telekomunikacji w Warszawie

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)**

**a) tytuł osiągnięcia naukowego**

Jednotematyczny cykl publikacji pt. *Rozwój i nowe zastosowania techniki wektorowej analizy obwodów wielkiej częstotliwości*.

## b) publikacje wchodzące w skład jednotematycznego cyklu publikacji

*Czasopisma z listy JCR (6):*

- [A1] **A. Lewandowski**, W. Wiatr, L. J. Opalski i R. Biedrzycki, „Accuracy and bandwidth optimization of the over-determined offset-short reflectometer calibration”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 63, nr. 3, s. 1076–1089, mar. 2015. **Wkład: 60 %**, **IF=2.284**, **MNiSW: 35**
- [A2] **A. Lewandowski**, W. Wiatr, D. Gu, N. D. Orloff i J. Booth, „A multireflect-thru method of vector network analyzer calibration”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 65, nr. 3, s. 905–915, mar. 2016. **Wkład: 70 %**, **IF=2.897**, **MNiSW: 35**
- [A3] **A. Lewandowski**, L. J. Opalski, W. Wiatr, A. Gołaszewski i A. Abramowicz, „First-order modeling of errors due to coaxial-connector interface”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 67, nr. 2, s. 787–799, lut. 2019. **Wkład: 65 %**, **IF=3.176**, **MNiSW: 35**
- [A4] **A. Lewandowski**, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, P. Barmuta i W. Skierucha, „0.05–3 GHz VNA characterization of soil dielectric properties based on the multiline TRL calibration”, *Measurement Science and Technology*, t. 28, nr. 2, s. 024007, lut. 2017. DOI: 10.1088/1361-6501/28/2/024007. **Wkład: 70 %**, **IF=1.685**, **MNiSW: 35**
- [A5] **A. Lewandowski**, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, J. Szerement i W. Skierucha, „One-port vector-network-analyzer characterization of soil dielectric spectrum”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, przyjęty do publikacji. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2886474. **Wkład: 70 %**, **IF=4.662**, **MNiSW: 40**
- [A6] A. Sahu, P. Aaen, **A. Lewandowski**, M. Shkunov, G. P. Rigas, P. T. Blanchard, T. M. Wallis i V. Devabhaktuni, „Robust microwave characterization of inkjet printed coplanar waveguides on flexible substrates”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, t. 66, nr. 12, s. 3271–3279, grud. 2017. **Wkład: 20 %**, **IF=2.794**, **MNiSW: 30**

*Publikacje recenzowane w materiałach z konferencji międzynarodowych (7):*

- [B1] **A. Lewandowski**, W. Wiatr i P. Barmuta, „Offset-short vector-network-analyzer calibration with simultaneous modeling of calibration standards”, w *2014 84th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Boulder, CO, USA, 4–5 grud. 2014. DOI: 10.1109/ARFTG.2014.7013415. **Wkład: 80 %**, **MNiSW: 15**
- [B2] A. Abramowicz, **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Electromagnetic and circuit modeling of the pin gap effect in coaxial connectors up to 110 GHz”, w *2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, Turyn, Włochy, 12–16 wrz. 2011, s. 777–780. **Wkład: 15 %**, **MNiSW: 15**
- [B3] L. J. Opalski, **A. Lewandowski**, A. Gołaszewski, A. Abramowicz i W. Wiatr, „Equivalent-circuit modeling of coaxial-connector center-conductor gap”, w *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 9–11 maj. 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492105. **Wkład: 35 %**, **MNiSW: 15**
- [B4] **A. Lewandowski**, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, P. Barmuta i W. Skierucha, „Characterization of soil dielectric properties in 0.05-3 GHz frequency range with the multiline through-reflect-line calibration”, w *11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Florencja, Włochy, 23–27 maj. 2016, s. 351–358. **Wkład: 70 %**, **MNiSW: 15**
- [B5] **A. Lewandowski**, A. Wilczek, A. Szyplowska, M. Kafarski, J. Szerement i W. Skierucha, „A multiconductor probe for broadband dielectric-spectrum measurements”, w *12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Lublin, Polska, 4–7 czer. 2018, s. 77–81. **Wkład: 65 %**, **MNiSW: 15**

- [B6] A. Sahu, V. Devabhaktuni, **A. Lewandowski**, P. Barmuta, T. Wallis, M. Shkunov i P. Aaen, „Microwave characterization of ink-jet printed CPW on PET substrates”, w *2015 86th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Atlanta, GA, USA, 3–4 grud. 2015. DOI: 10.1109/ARFTG.2015.7381461. **Wkład: 20 %, MNiSW: 15**
- [B7] A. Sahu, V. Devabhaktuni, **A. Lewandowski**, T. Wallis i P. Aaen, „CAD-assisted microwave characterization of ink-jet printed CPW on PET substrates”, w *2016 88th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Austin, TX, USA, 8–9 grud. 2016. DOI: 10.1109/ARFTG.2016.7839731. **Wkład: 20 %, MNiSW: 15**

*Patenty (1):*

- [P1] A. Wilczek, **A. Lewandowski**, M. Kafarski, A. Szyplowska, J. Szerement i W. Skierucha, „Złącze linii współosiowych lub falowodowych oraz sposób ich łączenia”, pat., przyznany 11 lut. 2019, zgłoszenie nr P.422444. **Wkład: 15 %, MNiSW: 15**

**c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania<sup>1</sup>**

Działalność naukową związaną z miernictwem mikrofalowym, a w szczególności z techniką pomiaru parametrów rozproszenia za pomocą wektorowego analizatora obwodów (ang. *vector network analyzer* – VNA), rozpocząłem w 2002 r. w ramach studiów doktoranckich na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych. Moje pierwsze prace dotyczyły wpływu pasożytniczych rodzajów TEM na pomiary elementów wykonanych w technologii falowodu koplarnego [Bp1], [Bp2], modelowania elementów pasywnych wykonanych w technologii linii mikropaskowej [Bp3], oraz konstrukcji generatorów mikrofalowych z wykorzystaniem pomiarowych modeli tranzystorów [Bp4]. W czasie studiów doktoranckich rozpocząłem też pracę zawodową w Przemysłowym Instytucie Telekomunikacji, gdzie zajmowałem się cyfrowymi metodami generacji sygnałów radiolokacyjnych [Bp5].

W latach 2004-2009 przebywałem na stażu naukowym w National Institute of Standards and Technology (NIST) w Boulder, CO, USA (patrz Zał. 4 pkt. III L). W czasie tego stażu zajmowałem się analizą niepewności w pomiarach VNA wyposażonym w złącza współosiowe o małych rozmiarach (3.5 mm, 2.4 mm oraz 1.85 mm). Złącza takie znajdują zastosowanie w pomiarach parametrów rozproszenia na częstotliwościach do 67 GHz [1]. Opracowana przeze mnie wtedy wieloczęstotliwościowa analiza niepewności uwzględnia statystyczne korelacje między niepewnościami na różnych częstotliwościach. Uwzględnienie tych korelacji było niezbędne w celu poprawnego określenia niepewności w pomiarach elektrooptycznych wzorców szybkich przebiegów czasowych opracowywanych w NIST [Ap1], [Ap2], [Bp6]. Prace te były wykonywane częściowo w ramach stypendium IEEE MTT-S Graduate Scholarship (patrz Zał. 4 pkt. II K). Podczas pobytu na stażu w NIST zajmowałem się też innymi zagadnieniami związanymi z pomiarami VNA, m.in.: wykorzystaniem elektronicznych kalibratorów [Ap3], [Bp7] (prace te były kontynuowane w Polsce [Bp8]), charakteryzowaniem elementów składowych systemów wzorcowania pomiarów mocy [Bp9], oraz pomiarami elementów silnie niedopasowanych [Bp10].

Wynikiem moich prac w NIST był szereg autorskich publikacji dotyczących wieloczęstotliwościowego modelowania błędów w pomiarach VNA [Ap4], [Bp11]–[Bp14] oraz autorskie procedury numeryczne. Opracowane przez mnie procedury stały się impulsem do rozwoju profesjonalnego pakietu oprogramowania *Microwave Uncertainty Framework* udostępnianego przez NIST (patrz m.in. [2], [3]). Z kolei moje prace dotyczące wieloczęstotliwościowego modelowania błędów w pomiarach VNA zostały

<sup>1</sup>Odniesienia literaturowe są zorganizowane w następujący sposób: [A...] i [B...] odnoszą się do opublikowanych *po doktoracie*, odpowiednio, artykułów w czasopiśmie z listy JCR i recenzowanych publikacji w materiałach z konferencji międzynarodowych, przy czym wyróżnione cytowania [A...] i [B...] (czcionka wytłuszczona w kolorze niebieskim) wskazują na pozycje należące do jednotematycznego cyklu publikacji; [C...] odnoszą się do streszczeń w materiałach z konferencji międzynarodowych opublikowanych *po doktoracie*; [Ap...] i [Bp...] wskazują na publikacje *przed doktoratem*, zaś odnośniki [...] nie zawierające symbolu dotyczą pozostałych pozycji literaturowych. Numer DOI jest podawany *wyłącznie* dla publikacji, które albo mają jedynie wersję elektroniczną, albo nie miały wersji drukowanej w momencie przygotowywania tego dokumentu.

rozwinęte w rozprawie doktorskiej, która dotyczyła uogólnionego wieloczęstotliwościowego ujęcia problemu kalibracji i analizy niepewności w pomiarach parametrów rozproszenia za pomocą VNA. Moje końcowe prace związane z doktoratem były finansowane w ramach grantu doktorskiego MNiSW (patrz Zał. 4 pkt. II J).

Po obronie doktoratu w 2010 r., rozpocząłem pracę zawodową na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych na stanowisku adiunkta. Moja dalsza działalność naukowa skoncentrowana była na rozwoju paradygmatu wieloczęstotliwościowego w miernictwie parametrów rozproszenia i prowadzona była m.in. w ramach kierowanego przez mnie projektu SONATA, finansowanego przez NCN (patrz Zał. 4 pkt. II J). Główne osiągnięcia tej działalności są zawarte w omawianym poniżej jednotematycznym cyklu publikacji i dotyczą:

1. **rozwoju teorii i narzędzi** związanych z kalibracją VNA, tj.:

- (a) teorii i metod projektowania zestawów kalibracyjnych dla nadmiarowych kalibracji VNA [A1];
- (b) nowych algorytmów dla nadmiarowych metod kalibracji VNA opartych na wzorcach odbiciowych [A2] i [B1];
- (c) modelowania wzorców kalibracyjnych [A3] i [B2], [B3];

2. **nowych zastosowań** dla miernictwa parametrów rozproszenia za pomocą VNA, tj.:

- (a) szerokopasmowego pomiaru widma dielektrycznego gleby [A4], [A5] i [B4], [B5], [P1];
- (b) szerokopasmowego charakteryzowania własności linii transmisyjnych na elastycznych podłożach [A6] i [B6], [B7].

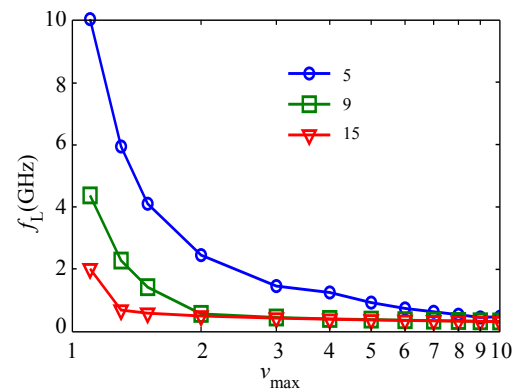
Metody kalibracji VNA wykorzystujące nadmiarową liczbę wzorców są chętnie stosowane ze względu na większą odporność na błędy pomiarowe niż w przypadku kalibracji deterministycznych. Przykładem kalibracji nadmiarowej jest metoda wielozwarciowa opracowana jeszcze latach 70-tych i 80-tych poprzedniego wieku [4]–[6], a będąca w ostatnim czasie ponownie w centrum zainteresowania [Bp15], [7], [8] ze względu na łatwość jej zastosowania w kalibracji VNA wyposażonych w małe złącza współosiowe lub falowodowe. Innym rodzajem takiej nadmiarowej kalibracji jest wieloliniowa metoda TRL (ang. *thru-reflect-line*) [9], powszechnie stosowana od wielu lat jako metoda odniesienia w kalibracji VNA [10].

Jednym z podstawowych problemów w wykorzystaniu kalibracji wielozwarciowej oraz wieloliniowej jest dobór parametrów wzorców, a konkretnie – długości odcinków linii transmisyjnych wykorzystywanych do konstrukcji wzorców w obydwu kalibracjach. Od doboru tych długości zależy pasmo kalibracji oraz jej wrażliwość na błędy pomiarowe. W pracy [A1] zaproponowałem nowe wieloczęstotliwościowe spojrzenie na problem doboru parametrów wzorców w kalibracjach nadmiarowych. Punktem wyjścia dla tego podejścia jest zdefiniowanie skalarnej miary dokładności kalibracji dla pojedynczej częstotliwości. W tym celu **przeprowadziłem analizę niepewności kalibracji wieloodbiciowej**, w której określiłem zależność wariancji błędów w skorygowanych pomiarach od wariancji błędów w pomiarach wzorców kalibracyjnych, a następnie **oszacowałem górną granicę dla tej wariancji**. Okazało się, że ta granica jest odwrotnie proporcjonalna do wyznacznika macierzy Fishera kalibracji (patrz zależność (30) w [A1]), co było już wcześniej przyjmowane w pracy [11], ale bez ścisłego dowodu. Następnie, wykorzystując zaproponowane w pracach [11], [12] szerokopasmowe miary jakości kalibracji wywodzące się z opisu charakterystyk amplitudowych filtrów, zaproponowałem dwie wieloczęstotliwościowe miary dla rozważanej kalibracji wieloodbiciowej: częstotliwość minimalną  $f_L$  oraz maksymalną znormalizowaną wariancję błędów  $\nu_{\max}$  w paśmie między  $f_L$  a pewną założoną częstotliwością  $f_{\max}$ . Te dwa skalarne parametry wykorzystałem następnie w dwukryterialnej optymalizacji – zaproponowanej wcześniej w [12] – w celu wyznaczenia krzywej Pareto opisującej możliwe kompromisy między tymi wskaźnikami jakości kalibracji. W celu wyznaczenia tej krzywej **zaproponowałem oryginalną metodę optymalizacji globalnej**, redukującą oryginalny problem do serii prostych problemów optymalizacji lokalnej z ograniczeniami z odpowiednio wylosowanymi wcześniej punktami startowymi. Wyniki tej optymalizacji (patrz Rys. 1) pokazują, że częstotliwość minimalna maleje ze wzrostem dopuszczalnej wariancji błędów oraz liczby wzorców. Potwierdzają one też wcześniej zaobserwowaną prawidłowość [11], że częstotliwość minimalna ma pewne minimum zależne tylko od górnego ograniczenia na długość wzorców.

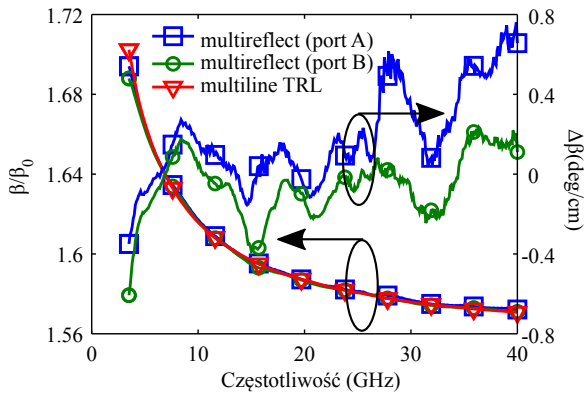
W pracy [A1] pokazałem, że to minimum ma teoretyczne uzasadnienie i może być analitycznie wyprowadzone z własności wyznacznika macierzy Fishera (patrz zależność (39) w [A1]). Zaproponowane metody zweryfikowałem następnie na podstawie numerycznych symulacji Monte Carlo oraz w oparciu o szeroki materiał eksperymentalny.

Praca [A1] stała się przyczynkiem do dalszego rozwoju metod kalibracji VNA wykorzystujących nadmiarowy zestaw wzorców odbiciowych. Jak pokazano wcześniej w pracy [7], kalibracja wielozwarciowa może być uogólniona do kalibracji wieloodbiciowej, w której współczynnik odbicia obciążenia wzorców odbiciowych jest nieznaną i ten sam dla wszystkich wzorców. Wartość tego współczynnika określa się następnie na podstawie pomiaru bezpośredniego połączenia wrót VNA [7]. Ideę tę wykorzystałem w pracy [A2] opracowując metodę kalibracji dualną względem klasycznej wieloliniowej metody TRL [9]. W nowej metodzie kalibracji, podobnie jak w wieloliniowej metodzie TRL, długości odcinków linii tworzących wzorce kalibracyjne są znane, zaś stała propagacji tych odcinków oraz współczynnik odbicia ich obciążenia są wstępnie nieznanymi i są wyznaczane w toku kalibracji łącznie ze współczynnikami kalibracyjnymi VNA. To odróżnia zaproponowane przeze mnie podejście od metod [Bp15], [7], w których zakłada się, że długości odcinków linii są nieznanymi, za to wymagana jest znajomość modelu opisującego częstotliwościową zmienność stałej propagacji. W pracy [A2] zaproponowałem też oryginalne podejście do numerycznego rozwiązania powstałego problemu kalibracyjnego. Dla podobnych zagadnień kalibracyjnych stosuje się nieliniową metodę najmniejszych kwadratów (patrz [Bp15], [7], [8]). Zaletą tej metody jest prostota implementacyjna, zaś dużą wadą – wrażliwość na punkt startowy. W opracowanym przeze mnie podejściu – podobnie jak w [9], proponuję najpierw metodę rozwiązania problemu kalibracyjnego dla prostej nienadmiarowej kalibracji wykorzystującej cztery wzorce odbiciowe. W metodzie tej współczynniki kalibracyjne wyznaczane są analitycznie, natomiast stała propagacji jest określana na podstawie rozwiązania pojedynczego zespolonego równania nieliniowego. Dla rozwiązania tego ostatniego problemu zaproponowałem odporną metodę iteracyjną ze zmienną wielkością kroku. Kolejnym etapem, podobnie jak w [9], jest analiza niepewności pojedynczej nienadmiarowej kalibracji reflektometru. Analiza ta pozwala określić wariancję błędów rozwiązania (tj. współczynników kalibracyjnych oraz stałej propagacji) wynikającą z błędów pomiarowych. Te wariancje służą następnie do określenia współczynników wagowych z jakimi uśredniane są wyniki pojedynczych kalibracji nienadmiarowych w celu uzyskania rozwiązania dla kalibracji nadmiarowej. W pracy [A2] zaproponowałem oryginalny algorytm takiego uśrednianie wyników pojedynczych nienadmiarowych kalibracji jak też sposób wyboru wzorców tworzących te pojedyncze kalibracje zapewniający numeryczną odporność rozwiązania całego problemu kalibracyjnego. Zaproponowane przeze mnie podejście pozwala uniknąć iteracyjnego poszukiwania współczynników kalibracyjnych VNA, stosowanego w metodach optymalizacyjnych [Bp15], [7], [8]. Niestety, całkowite uniknięcie obliczeń iteracyjnych nie jest możliwe, ale są one jedynie wykorzystywane do wyznaczenia stałej propagacji w kalibracjach nienadmiarowych. Nowa metoda kalibracji została zaimplementowana przy użyciu wzorców *on-wafer* wykonanych na podłożu kwarcowym wyprodukowanym w NIST. Przeprowadzona przeze mnie weryfikacja pomiarowa polegała na porównaniu wyników z wieloliniową metodą TRL zaimplementowaną na tym samym podłożu. Jak pokazałem na Rys. 2, w obydwu kalibracjach uzyskuje się bardzo zbliżone wartości części urojonej stałej propagacji linii – w pracy [A2] pokazano też, że wyniki skorygowanych pomiarów dla wzorców weryfikacyjnych wykonanych na tym samym podłożu są zgodne.

Równoległe do prac teoretycznych dotyczących metody wieloodbiciowej [A2], prowadziłem badania nad zastosowaniem tej metody w kalibracji VNA ze złączami współosiowymi. Podstawowym



Rysunek 1: Wyniki optymalizacji dwukryterialnej (krzywa Pareto) szerokopasmowych miar jakości kalibracji wieloodbiciowej: częstotliwości minimalnej  $f_L$  oraz maksymalnej znormalizowanej wariancji błędów  $\nu_{\max}$  dla różnej liczby wzorców [A1].



Rysunek 2: Porównanie znormalizowanej stałej fazowej dla nowej kalibracji wieloodbiciowej [A2] oraz dla wieloliniowej kalibracji TRL ze wzorcami *on-wafer* wykonanymi na tym samym podłożu kwarcowym.

metryczne i materiałowe złącza są odwzorowane w symulatorze; wadą jest niedostępność wiedzy o tych parametrach dla zwykłych użytkowników, ponieważ jest ona zwykle objęta tajemnicą handlową, zaś samodzielny pomiar tych parametrów wymaga skomplikowanej i kosztownej aparatury.

W pracy [B1] zaproponowałem inne rozwiązanie problemu wrażliwości kalibracji wieloodbiciowej na nieciągłość wprowadzaną przez złącze współosiowe **polegające na wieloczęstotliwościowym modelowaniu podstawowych parametrów wzorców**, tj. stałej propagacji i współczynnika odbicia obciążenia wzorców odbiciowych. Jak pokazałem, te dwie wielkości identyfikowane w kalibracji wieloodbiciowej są narażone na błędy wynikające z niepowtarzalności parametrów złącza współosiowego – ale z drugiej strony jedynie dla tych wielkości możliwe jest zaproponowanie adekwatnych modeli fizycznych (modelowanie współczynników kalibracyjnych analizatora jest z oczywistych względów mało praktyczne). Pomysłem pracy [B1] jest zatem narzucenie więzów wynikających z modeli fizycznych na stałą propagacji i współczynnik odbicia obciążenia wzorców w celu zmniejszenia wpływu błędów wynikających z niepowtarzalności parametrów złącza współosiowego. Tak powstały problem kalibracyjny wymaga podejścia wieloczęstotliwościowego, dlatego w celu jego rozwiązania zastosowałem metody zaproponowane w mojej rozprawie doktorskiej i omówione też w [Bp13], [Bp14], [B18]. Wstępne wyniki tych prac przedstawione w [B1] pokazały poprawność zaproponowanego podejścia, choć pozostawiły pewien niedosyt związany z brakiem dobrego zrozumienia własności elektrycznych złącza współosiowego.

Wyniki prac dotyczących kalibracji wieloodbiciowej ze wzorcami współosiowymi przedstawione w [B1] zainspirowały mnie do dalszych wysiłków związanych z opracowaniem modelu elektrycznego złącza współosiowego. Podstawowym celem, który przyjąłem w tych pracach, było opracowanie modelu, który opisuje podstawowe własności elektryczne złącza, a zaniebduje własności wtórne – których adekwatny opis wymaga trudnej do pozyskania wiedzy na temat konstrukcji złącza. Ten cel przyświecał pierwszym pracom związanym z symulacjami złącza współosiowego [B2], oraz próbom jego modelowania [B2][B3]. Pierwsze modele opracowane w [B2], choć poprawne elektrycznie, okazały się trudne w identyfikacji numerycznej ze względu na zbyt dużą liczbę parametrów. Kolejne próby [B3] doprowadziły do uproszczenia modelu, co pozwoliło dostrzec związki między jego parametrami a wymiarami geometrycznymi złącza.

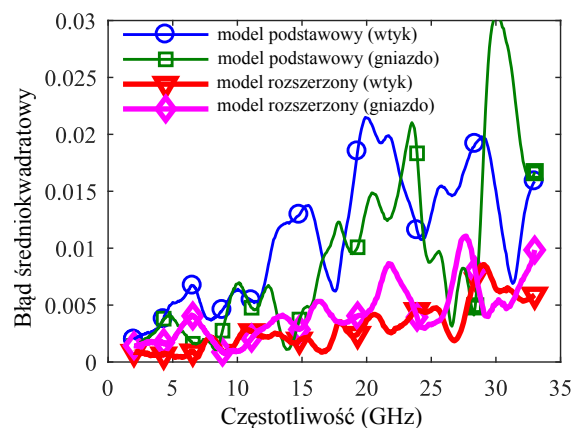
W publikacji [A3] przedstawiłem całościowe podejście do problemu modelowania **własności elektrycznych złącza współosiowego**. Praca ta składa się z trzech części. W pierwszej części **zaproponowałem model elektryczny złącza współosiowego** oparty na analitycznym modelowaniu wpływu szczeliny w tym złączu. Wykorzystałem tu założenia przedstawione w pracach [19], [20], ale po raz pierwszy **wyprowadziłem analitycznie zależności** sugerowane w tych pracach bez dowodu. Zaproponowany przez mnie model następnie **zweryfikowałem na podstawie symulacji elektromagnetycznych** dla złączy 1.85 mm, 2.4 mm, 3.5 mm i Type-N dla różnych

problemem jest tutaj większa wrażliwość na błędy pomiarowe dla metody wieloodbiciowej niż w przypadku wieloliniowej metody TRL (patrz [13]), połączona z większymi trudnościami z opisem własności elektrycznych wzorców niż w przypadku kalibracji *on-wafer*. Trudności z opisem wzorców wynikają ze złożoności opisu elektrycznego nieciągłości wprowadzanej przez skomplikowaną strukturę mechaniczną złącza współosiowego. O ile dla złączy współosiowych o dużych rozmiarach (Type-N i większe) wpływ tej nieciągłości jest niewielki, to już dla mniejszych złączy, powszechnie wykorzystywanych współcześnie w technice w.cz., zaniebdanie tego wpływu może prowadzić do dużych błędów [14]. W celu rozwiązania tego problemu, w pracach [14]–[18] zaproponowano stosowanie modeli złącza współosiowego opartych na symulacjach elektromagnetycznych. Zaletą tego podejścia jest duża dokładność – tym większa im wierniej parametry geo-

wielkości szczeliny. W drugiej części **przeprowadziłem analizę niepewności w celu określenia wpływu niepowtarzalności parametrów złącza współosiowego na definicje wzorców kalibracyjnych**. W analizie tej pokazałem, że zarówno w przypadku wzorców męskich jak i żeńskich, wpływ złącza można w pierwszym przybliżeniu opisać za pomocą szeregowej indukcyjności uzależnionej od wymiarów złącza i wielkości szczeliny. Jest to bardzo ważny wynik, który pojawiał się wcześniej (patrz [19]), ale bez ścisłego uzasadnienia. W trzeciej części, **zweryfiko- wałem zaproponowany model eksperymentalnie**. W tym celu pokazałem najpierw, że model ten adekwatnie opisuje wpływ zmienności szczeliny na pomiar obciążenia dopasowanego ze złączem Type-N. Następnie wykazałem, że zastosowanie tego modelu w kalibracji wieloodbiciowej ze wzorcami współosiowymi w standardzie 3.5 mm – tej samej, która była rozważana w pracy [B1] – prowadzi do wyznaczania stałej propagacji o przebiegu bardziej zbliżonym do wartości teoretycznych (mniejsze zafalowania), niż w przypadku podstawowej kalibracji [A2], jak też skutkuje zmniejszeniem błędów resztowych kalibracji. Porównanie wartości średniokwadratowej tych błędów dla kalibracji wielozwarciowej z podstawowym modelem wzorców i modelem rozszerzonym uwzględniającym wpływ szczeliny jest pokazane na Rys. 3. Jak widać uwzględnienie wpływu szczeliny zarówno dla wzorców męskich jak i żeńskich powoduje zmniejszenie błędu średniokwadratowego kalibracji.

Moje prace [A1]–[A3] oraz [B1]–[B3] dotyczące rozwoju nowych metod kalibracji VNA prowadziłem równoległe z poszukiwaniem nowych zastosowań dla tych metod. Te nowe zastosowania dotyczyły szerokopasmowego charakteryzowania własności dielektrycznych gleby oraz pomiarów linii transmisyjnych wytwarzanych na elastycznych podłożach.

W pracach [A4], [B4] **zaproponowałem nową metodę szerokopasmowego charakteryzowania własności dielektrycznych gleby za pomocą VNA**. W pomiarach tego typu wykorzystuje się znaną już od wielu lat metodę transmisyjno-odbiciową [21], [22]. Zastosowanie tej metody w pomiarach materiałów niejednorodnych takich jak gleba wymaga użycia współosiowych linii transmisyjnych o dużych średnicach (przykładowo  $1\frac{5}{8}$  cala, patrz [23], [24]), tak aby średnica linii była znacznie większa od charakterystycznego wymiaru niejednorodności próbki. Niestety kalibracja systemu pomiarowego wykorzystującego takie linie nie jest łatwa ze względu na brak komercyjnie dostępnych wzorców kalibracyjnych oraz złączy przeznaczonych do wielokrotnego użycia. Stąd stosuje się tu zazwyczaj metody uproszczone, oparte na kalibracji w złączach o mniejszych rozmiarach (typowo Type-N) i uproszczonym modelowaniu przejścia między złączem Type-N a złączem docelowej linii współosiowej [23]–[25]. Niestety, **jak pokazałem w [A4], takie uproszczone podejście może prowadzić do dużych błędów w określaniu widma przenikalności elektrycznej badanego materiału**. W pracach [A4], [B4] **zaproponowałem zatem wykorzysta-**

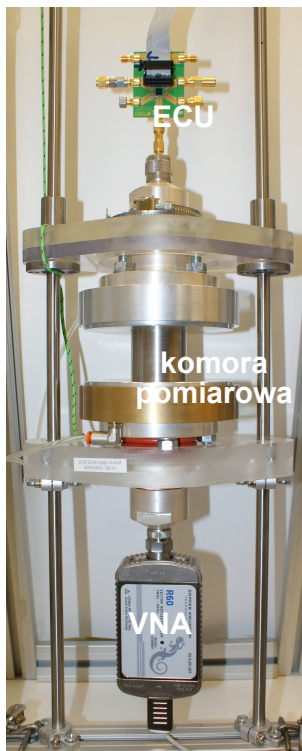


Rysunek 3: Błąd średniokwadratowy kalibracji wielozwarciowej ze wzorcami współosiowymi 3.5 mm wykorzystującej podstawowy model wzorców oraz model rozszerzony uwzględniający obecność szczeliny w przewodzie środkowym [A3].



Rysunek 4: Zestaw współosiowych linii transmisyjnych zaprojektowany z wykorzystaniem podejścia [A1] i używane do kalibracji systemu pomiarowego przedstawionego w [A4], [B4].

**nie wieloliniowej metody TRL [9] do kalibracji systemu do charakteryzowania własności dielektrycznych gleby.** Istotą zaproponowanego przeze mnie podejścia jest użycie jako wzorców kalibracyjnych odcinków linii współosiowej o takim samym przekroju jak linia użyta do konstrukcji celki pomiarowej – w przypadku prac [A4], [B4] są to linie o średnicy  $1\frac{5}{8}$  cala, podobnie jak w [23], [24]. Takie podejście, dzięki własnościom kalibracji wieloliniowej, pozwala dowolnie przesuwac płaszczyznę odniesienia kalibracji, co z kolei umożliwia usunięcie wpływu nieciągłości wprowadzanej przez złącza oraz scharakteryzowanie – a następnie korekcję – wpływu elementów podtrzymujących próbkę gleby w linii współosiowej. Stanowi to istotny postęp w stosunku do wcześniejszych prac [23]–[25], w których wymienione efekty są pomijane lub uwzględniane w sposób uproszczony. **W celu doboru liczby i długości tych odcinków linii kalibracyjnych wykorzystuję zaproponowaną przez mnie wcześniej metodę [A1].** Zaprojektowane przeze mnie wzorce są przedstawione na Rys. 4.



Rysunek 5: Zdjęcie systemu pomiarowego opisanego w [A5].

osiowej o różnych długościach, tyle że zakończone zmiennym obciążeniem – tym samym, które jest wykorzystywane we właściwym pomiarze parametrów rozproszenia komory pomiarowej. W celu przyspieszenia pomiarów i zwiększenia ich powtarzalności, to zmienne obciążenie zostało zrealizowane w postaci elektronicznego układu przełączającego (ang. *electronic calibration unit* – ECU). Współczynniki odbicia realizowane przez ECU w różnych stanach oraz współczynniki kalibracyjne systemu są wyznaczane **w zaproponowanej przeze mnie oryginalnej metodzie kalibracji, będącej modyfikacją podejścia [A2].**

W celu usprawnienia pomiarów w systemie zaproponowanym w [A5], zaproponowano też konstrukcję specjalnego złącza podciśnieniowego. Złącze to umożliwia szybkie i powtarzalne dołączenie wzorców kalibracyjnych oraz komory pomiarowej bez użycia śrub – co nie jest możliwe z wykorzystaniem standardowych kołnierzy stosowanych dla linii współosiowych o dużych średnicach. **Złącze to jest przedmiotem patentu, którego jestem współautorem [P1].**

Nową metodę pomiaru zaproponowaną w [A5] porównałem z wcześniej zaproponowanym podejściem [A4], [B4]. W ramach tego porównania **przeprowadziłem analizę powtarzalności pomiaru dla różnych materiałów referencyjnych** (etanol, isopropanol, teflon), które pokazały, że z dokładnością do powtarzalności pomiaru wyniki w nowym i starym systemie są zgodne. W pracy

Podejście zaproponowane przeze mnie w pracach [A4], [B4] zostało z sukcesem zastosowane do przebadania dużej liczby próbek gleby o różnych własnościach [A7], [B8], [B9], [C2]. W toku tych badań okazało się, że wadą opracowanego systemu pomiarowego jest konieczność użycia długich kabli łączących VNA ze złączami pomiarowymi – tak aby możliwe było podłączenie najdłuższej linii kalibracyjnej o długości 50 cm. Kable te utrudniają obsługę systemu, zwiększają jego koszt, wprowadzają też nieuniknione błędy związane ze zmiennością parametrów kabli na skutek wyginania. W kolejnej pracy [A5] **zaproponowałem system do pomiaru własności dielektrycznych gleby oparty w pełni na pomiarach za pomocą jednowrotowego VNA.** W systemie tym, podobnie jak w przypadku [A4], [B4], określa się macierz rozproszenia komory pomiarowej, tj. odcinka linii współosiowej wypełnionego próbką gleby o nieznanymi własnościami. O ile jednak w [A4], [B4] macierz ta była wyznaczana bezpośrednio na podstawie pomiarów dwuwrotowych, o tyle w [A5] określa się ją *pośrednio* na podstawie pomiaru wejściowego współczynnika odbicia komory pomiarowej obciążonej zmienną impedancją. **Jest to podejście często wykorzystywane w miernictwie mikrofalowym do charakteryzowania adapterów [6], [26], [27], ale po raz pierwszy zastosowane w pomiarach materiałowych.**

Nowe podejście zaproponowane przez mnie w [A5] wymagało opracowania odpowiedniej metody kalibracji systemu. Ta metoda, podobnie do [A4], [B4], wykorzystuje odcinki linii współ-



[A5] pokazałem również, że nowy system – dzięki brakowi elastycznych kabli – pozwala na uzyskanie większej powtarzalności pomiaru, szczególnie na małych częstotliwościach. Przeprowadziłem również uproszczoną analizę niepewności, która pokazała, że aby uzyskać podobną dokładność pomiaru, długość próbki w nowym systemie musi być dwa razy mniejsza niż w systemie z pomiarami dwuwrotowymi. Zdjęcie systemu pomiarowego opisanego w [A5] jest przedstawione na Rys. 5.

Metody pomiarowe przedstawione w pracach [A4], [A5], [B4] pozwalają na szerokopasmowy pomiar własności dielektrycznych próbek gleby w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Pomiar taki pozwala na opracowanie modeli łączących własności dielektryczne gleby z jej parametrami fizycznymi i chemicznymi, tj. wilgotnością, zasoleniem wody glebowej, składem granulometrycznym, porowatością i gęstością (patrz m.in [A7], [A8], [B8]–[B10], [C2] oraz [28]–[30]). Modele takie, oprócz wartości poznawczej, mają też duże znaczenie praktyczne, gdyż umożliwiają zwiększenie dokładności pomiaru za pomocą dielektrycznych czujników wilgotności i zasolenia gleby. Typowo takie czujniki opierają się na pomiarze przenikalności elektrycznej gleby metodami częstotliwościowymi lub czasowymi. W metodach częstotliwościowych wykorzystuje się zazwyczaj pomiar pojemności na pojedynczej częstotliwości rzędu 100 MHz lub mniejszej, zaś w metodach czasowych bada się opóźnienie wąskiego impulsu czasowego o paśmie rzędu 2 GHz. Zaletą metod pojemnościowych jest prosta konstrukcja i niski koszt, wadą – zależność pomiaru wilgotności od zasolenia gleby [31]. Z kolei metody czasowe, dzięki pomiarowi na wyższych częstotliwościach, pozwalają na uniezależnienie pomiaru wilgotności gleby od jej zasolenia, są jednak kosztowne ze względu na duży stopień komplikacji układowej. Wymienione niedostatki współczesnych metod pomiaru wilgotności gleby w warunkach polowych, jak też zaproponowane przez mnie szerokopasmowe referencyjne metody charakteryzowania własności dielektrycznych gleby [A4], [A5], [B4] stały się przyczynkiem do **opracowania koncepcji nowej metody pomiaru wilgotności gleby w warunkach polowych**, która również jest oparta na pomiarach szerokopasmowych widma dielektrycznego. Koncepcję tę przedstawiłem w pracy [B5], zaś fizyczna realizacja czujnika jest przedmiotem kierowanego przeze mnie projektu SOILS finansowanego w ramach wspólnego konkursu NCN i NCBiR o nazwie TANGO2 (patrz Zał. 4 pkt. II J). Zaproponowany przez mnie czujnik wykorzystuje rozarty odcinek linii transmisyjnej zrealizowanej jako wąski przewód sygnałowy otoczony wieloma przewodami masy rozmieszczonymi na obwodzie okręgu. Korzystając z metody kalibracji zaproponowanej w [A2] zaimplementowanej w symulatorze elektromagnetycznym, **pokazałem, że taka linia dla liczby przewodów masy równej 8 lub większej, może być w przybliżeniu traktowana jako linia TEM** – co pozwala w łatwy sposób określić widmo dielektryczne gleby z pomiarów współczynnika odbicia takiej linii. Z drugiej strony otwarta struktura tej linii zapewnia swobodny przepływ wody przez próbkę gleby, dzięki czemu czujnik może reagować na dynamicznej zmiany wilgotności wynikające z nawadniania lub opadów. W pracy [B5] **przestawiłem również zależność analityczną na impedancję charakterystyczną takiej linii wieloprzewodowej oraz zweryfikowałem ją na podstawie symulacji elektromagnetycznych**. Fizyczna realizacja czujnika będzie wykorzystywała prosty jednowrotowy VNA w postaci reflektometru wielostanowego [32] z dzielnikiem rezystorowym [Bp10].

Drugim obszarem praktycznego zastosowania moich prac teoretycznych jest charakteryzowanie własności linii transmisyjnych wytwarzanych na elastycznych podłożach. W pracy [A6], która jest rozwinięciem zgłoszeń konferencyjnych [B6], [B7], przedstawiono metodykę charakteryzowania linii transmisyjnych nadrukowanych technologią *ink-jet* na elastycznych podłożach. W technologii tej warstwę przewodzącą tworzy atrament zawierający nanocząsteczki srebra. Zaletą tej technologii jest prostota, wadą zaś jest mała przewodność atramentu, co ogranicza możliwości wykorzystania tak wytwarzanych struktur na dużych częstotliwościach. Kluczowe zatem z punktu widzenia zastosowania tej technologii jest wyznaczenie stratności takich linii. Metodykę wyznaczenia tej stratności przedstawiono właśnie w pracach [A6],



Rysunek 6: Zdjęcie zestawu linii wykonanego na podłożu PET umieszczonego na warstwie dodatkowej dielektryka zapobiegającego wzbudzeniu pasożytniczych rodzajów TEM [A6], [B6], [B7].

[B6], [B7], których jestem współautorem. Istotą **zaproponowanego przeze mnie podejścia** jest wykonania wieloliniowej kalibracji TRL z wykorzystaniem zestawu linii transmisyjnych wykonanych na elastycznym podłożu z wykorzystaniem badanego atramentu (patrz Rys. 6). Jako wynik tej kalibracji otrzymuje się m.in. stałą propagacji linii, z której wyznacza się następnie stratność warstwy przewodzącej. W tym celu **zaproponowałem zastosowanie symulacji elektromagnetycznych, na podstawie których wyznacza się model tablicowy wiążący stratność atramentu oraz dodatkowe parametry linii transmisyjnej** (tj. przenikalność elektryczną dodatkowej warstwy dielektryka na której umieszczone jest elastyczne podłoże – ten dielektryk jest potrzebny celu ograniczenia wpływu pasożytniczych rodzajów TEM [Bp1], [Bp2]) **ze stałą propagacji linii. Liczbę i długości linii wyznaczyłem z wykorzystaniem podejścia [A1]**. Podejście [A6], [B6], [B7] zostało zweryfikowane eksperymentalnie poprzez pomiary kilku realizacji tego samego zestawu linii w różnych laboratoriach (PW i NIST). Mój udział w tej części polegał **charakteryzacji linii za pomocą stacji do pomiarów ostrzowych**.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że omówione wyżej wyniki moich prac badawczych składające się na osiągnięcie naukowe są wynikiem konsekwentnej i długotrwałej pracy. Najistotniejsze składniki tego osiągnięcia to:

1. oryginalne wyniki dotyczące **podstaw teoretycznych** metod kalibracji VNA, w tym:
  - (a) analiza niepewności dla kalibracji wieloodbiciowej uzasadniająca teoretycznie zastosowanie odwrotności wyznaczniki macierzy Fishera jako miary jakości kalibracji [A1];
  - (b) analiza własności wyznacznika macierzy Fisher kalibracji wieloodbiciowej wykazująca istnienie jego minimum uzależnionego od długości najdłuższej linii w zestawie kalibracyjnym [A1];
  - (c) nowe podejście do szerokopasmowej oceny jakości kalibracji wieloodbiciowej wykorzystujące miary skalarne w postaci częstotliwości minimalnej i maksymalnej znormalizowanej wariancji błędów [A1];
  - (d) nowa metoda kalibracji [A2] dualna względem klasycznej wieloliniowej metody TRL [9];
  - (e) nowe wieloczęstotliwościowe podejście do kalibracji wieloodbiciowej o zmniejszonej wrażliwości na błędy w definicjach wzorców kalibracyjnych [B1];
  - (f) nowe podejście do modelowania złącza współosiowego oparte na przybliżonym modelu elektrycznym opisującym dominujące własności złącza [A3], [B2], [B3];
  - (g) analiza niepewności wpływu szczeliny w złączu współosiowym na wyniki kalibracji VNA pokazująca, że wpływ tej szczeliny może być w przybliżeniu opisany pojedynczą szeregową indukcyjnością [A3].
2. oryginalne **metody numeryczne** dotyczące kalibracji VNA, w tym:
  - (a) efektywna metoda globalnej optymalizacji dwukryterialnej służąca do projektowania zestawów kalibracyjnych z wykorzystaniem miar zaproponowanych w [A1];
  - (b) odporny numerycznie algorytm implementujący metodę [A2] oparty na uśrednianiu wyników kalibracji wykonywanych na odpowiednio dobranych podzbiorach wzorców kalibracyjnych.
3. **nowe zastosowania** dla miernictwa parametrów rozproszenia za pomocą VNA, w tym:
  - (a) unikalne użycie wieloliniowej metody TRL [9] z liniami współosiowymi o dużych średnicach do kalibracji dwuwrotowego VNA w pomiarach widma dielektrycznego gleby [A4], [B4];
  - (b) implementacja wieloliniowej metody TRL w pracach [A4], [B4] z dedykowanymi wzorcami zaprojektowanymi z wykorzystaniem podejścia [A1];
  - (c) unikalne użycie metody charakteryzacji adapterów mikrofalowych za pomocą jednowrotowego VNA [27] w pomiarach widma dielektrycznego gleby [A5];

- (d) system i metoda pomiaru widma dielektrycznego gleby za pomocą jednowrotowego VNA wykorzystujący oryginalną wieloodbiciową technikę kalibracji VNA [A5] (opartą na [A2]) oraz dedykowane próżniowe złącza współosiowe [P1];
- (e) koncepcja nowego czujnika do pomiaru widma dielektrycznego gleby w warunkach polowych [B5];
- (f) oryginalna metoda pomiaru własności linii transmisyjnych na elastycznych podłożach [A6], [B6], [B7] wykorzystująca wieloliniową kalibrację TRL [9] z dedykowanymi wzorcami zaprojektowanymi za pomocą podejścia [A1].

Warto na zakończenie podkreślić interdyscyplinarny charakter wymienionych wyżej osiągnięć. Moje prace natury teoretycznej dotyczące metod kalibracji VNA znacząco posunęły stan wiedzy w tej dziedzinie, pozwalając mi też na zgromadzenie dużego kapitału wiedzy i doświadczenia. Ten właśnie kapitał w połączeniu z praktycznymi potrzebami, w szczególności w dziedzinie fizyki gleby, stał się przyczynkiem dla zaproponowanych przeze mnie nowych zaawansowanych rozwiązań znajdujących się na pograniczu obydwu dyscyplin. Dlatego też moje dalsze prace będą koncentrowały się właśnie w tym obszarze ze względu na duży potencjał zarówno naukowo-poznawczy jak i wdrożeniowy.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

### a) pomiary i modelowanie własności dielektrycznych gleby

*Czasopisma z listy JCR (2):*

- [A7] A. Szyplowska, J. Szerement, **A. Lewandowski**, M. Kafarski, A. Wilczek, K. Skic i W. Skierucha, „Verification of soil salinity index model based on 0.02–3 GHz complex dielectric permittivity spectrum measurements”, *Journal of Hydrology*, 2019, przyjęty do publikacji. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.04.066. **Wkład: 5 %**, **IF=3.727**, **MNiSW: 45**
- [A8] A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, **A. Lewandowski** i W. Skierucha, „Salinity index determination of porous materials using open-ended probes”, *Measurement Science and Technology*, t. 28, nr. 1, s. 014006, sty. 2017. **Wkład: 5 %**, **IF=1.685**, **MNiSW: 35**

*Publikacje recenzowane w materiałach z konferencji międzynarodowych (7):*

- [B8] A. Wilczek, A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, M. Kafarski, J. Szerement i W. Skierucha, „Soil salinity characterization based on 0.05–3 GHz dielectric permittivity measurements”, w *2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Pawia, Włochy, 20–22 wrz. 2017. DOI: 10.1109/IMWS-AMP.2017.8247431. **Wkład: 30 %**, **MNiSW: 15**
- [B9] A. Szyplowska, J. Szerement, **A. Lewandowski**, M. Kafarski, A. Wilczek i W. Skierucha, „Impact of soil salinity on the relation between soil moisture and dielectric permittivity”, w *12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Lublin, Polska, 4–7 czer. 2018, s. 14–16. **Wkład: 10 %**, **MNiSW: 15**
- [B10] A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, **A. Lewandowski** i W. Skierucha, „Application of open-ended probes for characterization of moisture and salinity of porous material using salinity index approach”, w *11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Florencja, Włochy, 23–27 maj. 2016, s. 231–237. **Wkład: 5 %**, **MNiSW: 15**
- [B11] A. L. Neves, A. Szyplowska, A. Wilczek, A. Letertre, P. Sabouroux, **A. Lewandowski** i M. W. Ben Ayoub, „Comparison between coaxial transmission line methods by measurement of porous clay samples of varying moisture content”, w *12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Lublin, Polska, 4–7 czer. 2018, s. 110–114. **Wkład: 15 %**, **MNiSW: 15**

- [B12] **A. Lewandowski**, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, J. Szerement, P. Barmuta i W. Skierucha, „Wideband extraction of soil dielectric spectrum from vector-network-analyzer measurements”, w *2017 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Pawia, Włochy, 20–22 wrz. 2017. DOI: 10.1109/IMWS-AMP.2017.8247421. **Wkład: 70 %, MNiSW: 15**
- [B13] M. Kafarski, A. Wilczek, A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, J. Szerement i W. Skierucha, „Novel TDR probe for monitoring moisture distribution in soil profile—electromagnetic simulations”, w *12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Lublin, Polska, 4–7 czer. 2018, s. 121–123. **Wkład: 10 %, MNiSW: 15**
- [B14] A. Wilczek, A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, M. Kafarski, J. Szerement i W. Skierucha, „The calibration-free method for determining dielectric permittivity spectrum”, w *12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Lublin, Polska, 4–7 czer. 2018, s. 50–52. **Wkład: 15 %, MNiSW: 15**

*Streszczenia w materiałach z konferencji międzynarodowych (8):*

- [C1] **A. Lewandowski**, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek i W. Skierucha, „A robust technique for the identification of multipole Debye dielectric model from measurement data”, w *11th International Conference on Agrophysics: Soil, Plant & Climate (ICA), Book of Abstracts*, Lublin, Polska, 26–28 wrz. 2016, s. 144.
- [C2] J. Szerement, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, **A. Lewandowski** i W. Skierucha, „Dielectric relaxation mechanisms in silt loam soil determined from 0.05–3 GHz measurements”, w *16th International Workshop for Young Scientists BioPhys Spring 2017*, Lublin, Polska, 1–3 czer. 2017, s. 79–80.
- [C3] A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, A. Wilczek, M. Kafarski, J. Szerement i W. Skierucha, „Soil dielectric-spectrum characterization based on one-port VNA measurement system”, w *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, t. 1, MDPI AG, grud. 2017, s. 811.
- [C4] A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, **A. Lewandowski** i W. Skierucha, „Salinity index determination of glass beads of various sizes”, w *11th International Conference on Agrophysics: Soil, Plant and Climate (ICA), Book of Abstracts*, Lublin, Polska, 26–28 wrz. 2016, s. 197.
- [C5] M. Kafarski, A. Wilczek, A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, J. Szerement, S. Trinks, G. Wessolek i W. Skierucha, „Novel TDT sensor for soil moisture profile probe”, w *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, t. 1, MDPI AG, grud. 2017, s. 839.
- [C6] A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, **A. Lewandowski**, J. Szerement, A. Zackiewicz i W. Skierucha, „New TDT probe for soil moisture measurement at various soil-profile depths—numerical study of the sensor sensitivity zone”, w *Geophysical Research Abstracts*, t. 20, EGU General Assembly 2018, 2018, EGU2018-6877–1.
- [C7] M. Kafarski, A. Wilczek, A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, J. Szerement i W. Skierucha, „EM simulations of a novel three-rod dielectric probe for measurements of soil moisture gradient”, w *Geophysical Research Abstracts*, t. 20, EGU General Assembly 2018, 2018, EGU2018–14 349.
- [C8] A. Wilczek, A. Szyplowska, M. Kafarski, **A. Lewandowski**, J. Szerement i W. Skierucha, „Electromagnetic multi-simulation method for determining dielectric permittivity spectrum”, w *Geophysical Research Abstracts*, t. 20, EGU General Assembly 2018, 2018, EGU2018–6861.

Moje prace związane z pomiarami i modelowaniem własności dielektrycznych gleby były wykonywane we współpracy z Instytutem Agrofizyki PAN w Lublinie i koncentrowały się w czterech obszarach:

1. wykorzystanie wyników otrzymanych w systemach [A4], [A5] oraz dalszy rozwój tych rozwiązań,

2. modelowanie widma dielektrycznego gleby i materiałów porowatych,
3. rozwój nowych konstrukcji czujników działających w dziedzinie czasu,
4. modelowanie dielektrycznych czujników wilgotności gleby z wykorzystaniem symulacji elektromagnetycznych.

W ramach prac prowadzonych w pierwszym obszarze skoncentrowałem się głównie na interpretacji szerokiego materiału eksperymentalnego otrzymanego z wykorzystaniem systemów [A4], [A5]. **W krótkim komunikacie konferencyjnym [C1] przedstawiłem prostą numeryczną metodę ekstrakcji parametrów modelu Debye'a z uwzględnieniem bieguna związanego z przewodnością elektryczną.** Metoda ta została następnie wykorzystana w [B9] i [C2] do modelowania widma dielektrycznego gleby. Wyniki przedstawione w [C2] zostały następnie wykorzystane do opracowania nowego ujęcia modelu wskaźnika zasolenia [33], które zamiast opierać się na pomiarach pozornej przenikalności dielektrycznej gleby za pomocą metody TDR, wykorzystuje parametry modelu Debye'a do określenia relacji między wilgotnością gleby i jej zasoleniem a widmem dielektrycznym [B8]. W pracy [B11], przedstawiono wyniki porównania pomiarów wykonanych w systemie [A5] oraz za pomocą metody [34], która potwierdziły dużą dokładność zaproponowanego w [A5] podejścia. W pracy przedstawiono porównanie różnych modeli łączących wilgotność objętościową gleby z jej przenikalnością elektryczną z wykorzystaniem pomiarów widma dielektrycznego gleby otrzymanych w systemie [A4]. W pracy [A7] przedstawiono weryfikację modelu wskaźnika zasolenia [33] na podstawie szerokiego materiału eksperymentalnego zebranego w systemie [A4]. **Mój udział w powyższych pracach polegał na bieżącej konserwacji systemu i aktualizacji procedur numerycznych w nim wykorzystywanych, jak też na pomocy w przygotowaniu i redakcji wymienionych publikacji.**

Pozostałe prace prowadzone w pierwszym obszarze związane były z dalszym rozwojem systemu przedstawionego w [A4], [A5]. W krótkim komunikacie konferencyjnym [C3] opisano wstępną koncepcję systemu [A5]. **Z kolei w pracy [B12] przedstawiłem wstępną koncepcję: metody rozszerzenia pasma systemów [A4], [A5] na bardzo niskie częstotliwości, oraz metody ekstrakcji widma dielektrycznego gleby korygującej resztowe błędy kalibracji.**

W pracach [A8], [B10], [C4] przedstawiono koncepcję określania zasolenia materiałów porowatych z wykorzystaniem pomiarów widma dielektrycznego oraz modelu wskaźnika zasolenia [33]. W celu zastosowania modelu wskaźnika zasolenia konieczne było dopasowanie modelu Debye'a oraz Cole-Cole'a z uwzględnieniem bieguna związanego z przewodnością elektryczną. **Mój udział w tych pracach polegał na opracowaniu odpowiednich procedur numerycznych z wykorzystaniem metody [C1] oraz pomocy w redakcji manuskryptów.**

W pracach [C5], [C6], przedstawiono koncepcję nowego czujnika wilgotności gleby pozwalającego na określenie wilgotności na różnych głębokościach w profilu glebowym. Metoda ta wykorzystuje technikę transmisjometrii czasowej (ang. *time-domain transmissiometry* – TDT), która jest techniką wywodzącą się z reflektometrii czasowej (ang. *time-domain reflectometry* – TDR). **Mój udział w tych pracach polegał na konsultacji rozwiązania oraz pomocy w redakcji artykułów.**

W pracach [B13], [C7] przedstawiono koncepcję nowego wielopętowego czujnika TDR służącego do pomiaru wilgotności w profilu glebowym. Czujnik ten wykorzystuje konstrukcję grzebieniową składającą się z wielu równolegle połączonych dwupętowych sond TDR. **Mój udział w tych pracach polegał na konsultacji rozwiązania oraz pomocy w redakcji artykułów.**

W publikacjach [B14],[C8] przedstawiono koncepcję kalibracji czujników służących do pomiaru widma przenikalności elektrycznej materiałów z wykorzystaniem symulacji elektromagnetycznych. Ideą tego rozwiązania jest wyznaczenie związku między odpowiedzią czujnika (np. współczynnikiem odbicia) a parametrami badanego dielektryka na podstawie symulacji elektromagnetycznych dla materiałów o znanych parametrach. **Mój udział w tych pracach polegał na pomocy w przygotowaniu odpowiednich symulacji, konsultacji rozwiązania oraz pomocy w redakcji publikacji.**

## b) pomiary materiałowe

*Czasopisma z listy JCR (1):*

- [A9] M. Kafarski, A. Wilczek, A. Szyplowska, **A. Lewandowski**, P. Pieczywek, G. Janik i W. Skierucha, „Evaluation of apple maturity with two types of dielectric probes”, *Sensors*, t. 18, nr. 2, s. 121, sty. 2018. DOI: 10.3390/s18010121. **Wkład: 5 %, IF=2.475, MNiSW: 30**

*Publikacje recenzowane w materiałach z konferencji międzynarodowych (3):*

- [B15] W. Skierucha, A. Wilczek, A. Szyplowska, M. Kafarski, **A. Lewandowski** i P. Pieczywek, „Apple broadband dielectric response”, w *11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Florencja, Włochy, 23–27 maj. 2016, s. 351–358. **Wkład: 20 %, MNiSW: 15**
- [B16] J. Szerement, A. Szyplowska, M. Kafarski, A. Wilczek, **A. Lewandowski** i W. Skierucha, „The effect of storage time on dielectric properties of pasteurized milks and yoghurt”, w *12th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)*, Lublin, Polska, 4–7 czer. 2018, s. 118–120. **Wkład: 10 %, MNiSW: 15**
- [B17] M. Myśliwiec, **A. Lewandowski**, W. Wiatr, J. Weremczuk, Z. Szczepański i R. Kisiel, „Challenges in packaging of IR detectors-technology of elastic electrical connections”, w *2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, t. 104, Gdańsk, Polska, 20–23 wrz. 2015, s. 012007. **Wkład: 10 %, MNiSW: 15**

Moje prace związane z pomiarami materiałowymi były związane głównie z wykorzystaniem metody [C1] do modelowania widma dielektrycznego mierzonego sondą *open ended* dla materiałów biologicznych: jabłek [B15], [A9] oraz nabiału [B16].

Z kolei w pracy [B17] została przedstawiona koncepcja elastycznych połączeń przeznaczonych dla detektorów podczerwieni (patrz projekt INTiR w Zał. 4 pkt. II J). **Mój udział w tej pracy polegał na opracowaniu metody pomiaru parametrów rozproszenia tych połączeń oraz wykonaniu tych pomiarów. W metodzie tej wykorzystałem samodzielnie zaprojektowany zestaw dla wieloliniowej kalibracji TRL [9], przy czym w projektowaniu tego zestawu wykorzystałem wyniki pracy [A1].**

### c) techniki kalibracyjne i zastosowania

*Czasopisma z listy JCR (4):*

- [A10] N. D. Orloff, J. Mateu, **A. Lewandowski**, E. Rocas, J. King, D. Gu, X. Lu, C. Collado, I. Takeuchi i J. C. Booth, „A compact variable-temperature broadband series-resistor calibration”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 59, nr. 1, s. 188–195, sty. 2011. **Wkład: 10 %, IF=1.853, MNiSW: 35**
- [A11] S. Liu, N. D. Orloff, C. A. Little, X. Lu, J. C. Booth, I. Ocket, **A. Lewandowski**, D. M.-P. Schreurs i B. K. Nauwelaers, „New methods for series-resistor calibrations on substrates with losses up to 110 GHz”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 64, nr. 12, s. 4287–4297, grud. 2016. **Wkład: 5 %, IF=2.897, MNiSW: 35**
- [A12] S. Liu, I. Ocket, **A. Lewandowski**, D. Schreurs i B. Nauwelaers, „An improved line-reflect-reflect-match calibration with an enhanced load model”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, t. 27, nr. 1, s. 97–99, sty. 2016. **Wkład: 10 %, IF=1.887, MNiSW: 30**
- [A13] G. Stepniak, **A. Lewandowski**, J. Kropp, N. N. Ledentsov, V. Shchukin, N. Ledentsov, G. Schaefer, M. Agustin i J. P. Turkiewicz, „54 Gbit/s OOK transmission using single-mode VCSEL up to 2.2 km MMF”, *Electronics Letters*, t. 52, nr. 8, s. 633–635, sierp. 2016. **Wkład: 10 %, IF=1.155, MNiSW: 20**

*Publikacje recenzowane w materiałach z konferencji międzynarodowych (9):*

- [B18] **A. Lewandowski**, W. Wiatr i D. Williams, „Multi-frequency approach to vector-network-analyzer scattering-parameter measurements”, w *2010 40th European Microwave Conference (EuMC)*, Paryż, Francja, 28–30 wrz. 2010, s. 260–263. **Wkład: 80 %, MNiSW: 15**
- [B19] S. Liu, I. Ocket, P. Barmuta, T. Markovic, **A. Lewandowski**, D. Schreurs i B. Nauwelaers, „Broadband dielectric spectroscopy calibration using calibration liquids with unknown permittivity”, w *2014 84th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Boulder, CO, USA, 4–5 grud. 2014. DOI: 10.1109/ARFTG.2014.7013421. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B20] S. Liu, I. Ocket, P. Barmuta, **A. Lewandowski**, D. Schreurs i B. Nauwelaers, „Broadband dielectric spectroscopy calibration for microliter samples of biogenic liquid”, w *2014 44th European Microwave Conference (EuMC)*, Rzym, Włochy, 6–9 paź. 2014, s. 279–282. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B21] P. Barmuta, **A. Lewandowski**, S. Liu, W. Wiatr i D. Schreurs, „General method of seven-term statistical calibration with partially defined standards”, w *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON)*, Gdańsk, Polska, 16–18 czer. 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899859. **Wkład: 15 %, MNiSW: 15**
- [B22] **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Comparison of 220-325 GHz vector-network-analyzer calibrations based on multiple rectangular-waveguide sections”, w *2010 40th European Microwave Conference (EuMC)*, Paryż, Francja, 28–30 wrz. 2010, s. 256–259. **Wkład: 60 %, MNiSW: 15**
- [B23] **A. Lewandowski**, M. Kotz, P. Barmuta, A. Rychter, M. Fijolek i W. Wiatr, „Integrated software environment for high-frequency metrology”, w *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON)*, Gdańsk, Polska, 16–18 czer. 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6900017. **Wkład: 60 %, MNiSW: 15**
- [B24] P. Linczuk, P. Zdunek, P. Barmuta, M. Kotz i **A. Lewandowski**, „GPU implementation of multiline TRL calibration for efficient Monte-Carlo uncertainty analysis”, w *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 9–11 maj. 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492106. **Wkład: 40 %, MNiSW: 15**
- [B25] M. Abramowicz i **A. Lewandowski**, „Electronic calibration unit for DC-8 GHz vector-network-analyzer measurements”, w *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 9–11 maj. 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7491937. **Wkład: 40 %, MNiSW: 15**
- [B26] P. Barmuta, M. Mercuri, P. J. Soh, P. Karsmakers, G. A. Vandenbosch, P. Leroux, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Radar range improvement using gradient-free optimization for health care applications”, w *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 9–11 maj. 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7491968. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**

Moje prace związane z nowymi technikami kalibracyjnymi i ich zastosowaniami prowadzone były w kilku obszarach. Podczas pobytu na stażu w NIST brałem udział w pracach dotyczących nowych metod kalibracji *on-wafer*. Ich efektem jest kalibracja z szeregowym rezystorem uwzględniająca zmiany temperatury otoczenia [A10]. **Mój udział w tej pracy polegał na zaproponowaniu metody określania impedancji charakterystycznej z pomiaru rezystora szeregowego, konsultacji aspektów numerycznych opracowanej metody oraz pomocy w redakcji manuskryptu.**

Z kolei podejście wieloczęstotliwościowe do kalibracji VNA zaproponowane w mojej rozprawie doktorskiej stało się inspiracją dla: ulepszenia metody [A10] – co opisano w [A11], ulepszenia klasycznej metody LRRM [A12], oraz opracowania nowych metod pomiaru własności materiałowych cieczy [B19], [B20]. **Mój udział we wszystkich tych pracach polegał na konsultacji opracowywanych rozwiązań.**

W pracy [B21] przedstawiono nową statystyczną metodę kalibracji pozwalającą na uwzględnienie dowolnej kombinacji wzorców o częściowo nieznanym parametrach. Podobne metody były już wcześniej

proponowane (patrz np. [35]) i opierają się one na numerycznym rozwiązaniu odpowiedniego problemu optymalizacyjnego. W pracy [B21] zaproponowano istotne usprawnienie polegające na uwzględnieniu obliczeń symbolicznych w formułowaniu problemu, co znacząco przyspiesze jego rozwiązanie. **Mój udział w tej pracy polegał na konsultacji zaproponowanego rozwiązania.**

**W stowarzyszonych ze sobą pracach [B22] oraz [Bp16] przedstawiłem wyniki moich prac dotyczących zastosowania metody wieloliniowej i wieloodbiciowej w kalibracji VNA pracującego w zakresie THz.** Wyniki te pokazują, że metoda wieloodbiciowa pozwala na uzyskanie lepszej powtarzalności pomiaru z głowicami THz niż metoda wieloliniowa ze względu na mniejszą liczbę pomiarów wymagających łączenia ze sobą głowic rozszerzających pasmo VNA do zakresu THz (tylko połączenie bezpośrednie wrót VNA dla pomiaru *thru*).

W ramach kierowanego przez mnie projektu SONATA (patrz Zał. 4 pkt. II J) prowadziłem też prace nad stworzeniem oprogramowania implementującego rozwijane w ramach tego projektu metody kalibracji i analizy niepewności w pomiarach VNA. **Wyniki tych prac przedstawiłem w artykule opisującym główne założenia powstającego oprogramowania [B23].** Z kolei w artykule [B24] przedstawiono implementację wieloliniowej kalibracji TRL [9] z wykorzystaniem przyspieszenia obliczeń na kartach GPU. **Mój udział w tej ostatniej pracy polegał na opracowaniu kodu wzorcowego implementowanej metody, pomocy w testowaniu implementacji GPU, oraz pomocy w redakcji artykułu.**

W artykule [B25], który podsumowuje pracę inżynierską inż. Michała Abramowicza (patrz Zał. 4 pkt. III J), przedstawiono realizację elektronicznego kalibratora VNA z wykorzystaniem technologii MEMS. Celem tej pracy było opracowanie taniego rozwiązania takiego kalibratora, jako konkurencyjnego rozwiązania wobec kosztownych urządzeń komercyjnych. **Mój udział w tej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji kalibratora i konsultacji jego realizacji, oraz na pomocy w redakcji artykułu.**

Artykuł [B26] opisuje usprawnienie systemu radarowego służącego do monitorowania stanu chorych w szpitalach, ośrodkach opieki społecznej, itp. Istotą tego usprawnienia jest wprowadzenie odpowiedniej korekty przecieku sygnału w systemie odbiorczym radaru. **Mój udział w tej pracy polegał na konsultacji rozwiązania i pomocy w redakcji artykułu.**

W artykule [A13] przedstawiono koncepcję szerokopasmowego łącza światłowodowego wykorzystującego technologię VCSEL. **Mój udział w tej pracy polegał na szerokopasmowych pomiarach parametrów rozproszenia tego łącza z wykorzystaniem VNA.** Praca ta była częścią projektu ADDAPT (patrz Zał. 4 pkt. II J).

#### d) pomiary wielkosygnalowe

*Czasopisma z listy JCR (6):*

- [A14] P. Barmuta, F. Ferranti, **A. Lewandowski**, L. Knockaert i D. Schreurs, „Efficient generation of X-parameters transistor models by sequential sampling”, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, t. 24, nr. 8, s. 530–532, sierp. 2014. **Wkład: 5 %, IF=1.703, MNiSW: 30**
- [A15] P. Barmuta, G. Avolio, F. Ferranti, **A. Lewandowski**, L. Knockaert i D. M.-P. Schreurs, „Hybrid nonlinear modeling using adaptive sampling”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 63, nr. 12, s. 4501–4510, grud. 2015. **Wkład: 5 %, IF=2.284, MNiSW: 35**
- [A16] P. Barmuta, F. Ferranti, G. P. Gibiino, **A. Lewandowski** i D. M.-P. Schreurs, „Compact behavioral models of nonlinear active devices using response surface methodology”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 63, nr. 1, s. 56–64, sty. 2015. **Wkład: 5 %, IF=2.284, MNiSW: 35**
- [A17] P. Barmuta, F. Ferranti, **A. Lewandowski** i D. M.-P. Schreurs, „Dynamic constraints for large-signal measurements on arbitrary grids”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 64, nr. 11, s. 3956–3964, list. 2016. **Wkład: 5 %, IF=2.897, MNiSW: 35**



- [A18] P. Barmuta, G. P. Gibiino, F. Ferranti, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Design of experiments using centroidal Voronoi tessellation”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 64, nr. 11, s. 3965–3973, list. 2016. **Wkład: 5 %, IF=2.897, MNiSW: 35**
- [A19] P. Barmuta, D. Ribeiro, K. Wang, G. Avolio, M. Rajabi, **A. Lewandowski**, G. P. Gibiino, J. Szatkowski, D. Schreurs, P. Hale i in., „Comparing LSNA calibrations: large-signal network analyzer round robin”, *IEEE Microwave Magazine*, t. 17, nr. 2, s. 59–64, lut. 2016. **Wkład: 5 %, IF=3.029, MNiSW: 30**

*Czasopisma spoza listy JCR (1):*

- [B27] P. Barmuta, **A. Lewandowski**, K. Łukasik, D. Schreurs i L. Dobrzański, „Small-signal microwave measurements and modeling of GaN FET devices manufactured by ITME”, *Przegląd Elektrotechniczny*, t. 91, nr. 9, s. 9–12, wrz. 2015. **Wkład: 15 %, MNiSW: 10**

*Publikacje recenzowane w materiałach z konferencji międzynarodowych (12):*

- [B28] P. Barmuta, G. P. Gibiino, F. Ferranti, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Nonlinear behavioral models of HEMTs using response surface methodology”, w *2014 International Conference on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO)*, Pawia, Włochy, 14–16 maj. 2014. DOI: 10.1109/NEMO.2014.6995706. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B29] P. Barmuta, G. Avolio, F. Ferranti, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Large-signal modeling of on-wafer microwave transistors based on response surface methodology”, w *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Phoenix, AZ, USA, 17–22 maj. 2015. DOI: 10.1109/MWSYM.2015.7167029. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B30] P. Barmuta, F. Ferranti, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Adaptive sampling method for experiments with fixed-grid variables in measurements of nonlinear active devices”, w *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, Paryż, Francja, 7–10 wrz. 2015, s. 638–641. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B31] P. Barmuta, F. Ferranti, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Efficient behavioral model extraction of nonlinear active devices using adaptive sampling with compact nonlinearity measure”, w *2015 German Microwave Conference*, Norymberga, Niemcy, 16–18 mar. 2015, s. 390–393. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B32] P. Barmuta, F. Ferranti, K. Łukasik, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Concurrent surrogate modeling and adaptive sampling in load-pull measurements”, w *2015 Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits Workshop (INMMiC)*, Taormina, Włochy, 1–2 paź. 2015. DOI: 10.1109/INMMiC.2015.7330379. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B33] P. Barmuta, K. Łukasik, F. Ferranti, G. P. Gibiino, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Load-pull measurements using centroidal Voronoi tessellation”, w *2017 89th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Honolulu, HI, USA, 9 czer. 2017. DOI: 10.1109/ARFTG.2017.8000848. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B34] G. Snawadzki, **A. Lewandowski**, G. Avolio i D. Schreurs, „1.3 GHz power amplifier design using a measurement-based transistor package model”, w *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON)*, Gdańsk, Polska, 16–18 czer. 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6899879. **Wkład: 25 %, MNiSW: 15**
- [B35] P. Zawada, P. Barmuta, T. S. Nielsen, D. Schreurs i **A. Lewandowski**, „Systematic procedure for load-pull X-parameters measurements for high-efficiency GaN HEMT PA design”, w *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar, and Wireless Communication (MIKON)*, Gdańsk, Polska, 16–18 czer. 2014. DOI: 10.1109/MIKON.2014.6900008. **Wkład: 10 %, MNiSW: 15**

- [B36] K. R. Łukasik, P. Barmuta, T. Nielsen, K. Madziar, D. Schreurs i **A. Lewandowski**, „Hybrid load-pull system using a two-source nonlinear vector network analyzer”, w *2015 Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits Workshop (INMMiC)*, Taormina, Włochy, 1–2 paź. 2015. DOI: 10.1109/INMMIC.2015.7330378. **Wkład: 10 %, MNiSW: 15**
- [B37] G. P. Gibiino, P. Barmuta, R. Cignani, D. Niessen, **A. Lewandowski**, L. Dobrzański, D. Schreurs i A. Santarelli, „Double-pulse characterization of GaN-on-Sapphire FETs for technology development”, w *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 9–11 maj. 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7492072. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**
- [B38] P. Barmuta, F. Verbeyst, **A. Lewandowski** i D. Schreurs, „Optimization of a next-generation comb generator for accurate large-signal measurements on a user-defined frequency grid”, w *2014 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-wave Circuits (INMMiC)*, Leuven, Belgia, 2–4 kw. 2014. DOI: 10.1109/INMMIC.2014.6815077. **Wkład: 10 %, MNiSW: 15**
- [B39] P. Zawada, P. Gontarek, P. Barmuta, M. Grzegorzółka i **A. Lewandowski**, „Phase-error compensation of a pulsed power amplifier with a vector modulator in radar applications”, w *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 9–11 maj. 2016. DOI: 10.1109/MIKON.2016.7491941. **Wkład: 5 %, MNiSW: 15**

Moje prace związane z wielosygnałowymi pomiarami aktywnych obwodów w.cz. skoncentrowane były w kilku obszarach. Ciąg publikacji [A14]–[A18] oraz [B28]–[B33] stanowił podstawę dla rozprawy doktorskiej dr. inż. Pawła Barmuty. Praca ta była realizowana w formie podwójnego doktoratu Politechniki Warszawskiej i Katholike Universitaet Leuven (KUL) w Belgii, a ja byłem jednym z członków powołanej przez KUL komisji nadzorującej przebieg studiów doktoranta i oceniającej jego rozprawę. Rozprawa ta dotyczyła adaptacyjnego planowania eksperymentów w wielosygnałowych pomiarach obwodów w.cz. (patrz Zał. 4 pkt. III K). **Mój udział w wymienionych pracach polegał na konsultacji i pomocy redakcyjnej.**

W pracy [B34], będącej podsumowaniem pracy magisterskiej mgr. inż. Grzegorza Snawadzkiego (patrz Zał. 4 pkt. III J), opisano projekt i wykonanie wzmacniacza mocy na pasmo 1.3 GHz w oparciu o schemat zastępczy tranzystora wyznaczony na podstawie pomiarów małosygnałowych. Istotą tego podejścia było wyznaczenie elementów pasożytniczych tranzystora, tak aby możliwe było wyznaczenie przebiegów prądu i napięcia na końcówkach tranzystora wewnętrznego. Przebiegi tych wartości były następnie optymalizowane w celu uzyskania pożądaných własności wzmacniacza – w przypadku [B34] chodziło o maksymalizację mocy wyjściowej i minimalizację zniekształceń intermodulacyjnych. W ramach pracy zostały też wytworzone specjalne sondy *on-wafer* w celu pomiaru tranzystora. **Mój udział w [B34] polegał na zaproponowaniu koncepcji rozwiązania, konsultacji i pomocy w redakcji artykułu.**

Artykuł [B35] jest podsumowaniem pracy magisterskiej mgr. inż. Pawła Zawady (patrz Zał. 4 pkt. III J) i dotyczy projektowania wzmacniacza mocy z tranzystorem GaN HEMT w oparciu o pomiar tzw. parametrów X [36]. Praca ta była wykonywana we współpracy z KU Leuven w Belgii oraz Keysight Technologies. **Mój udział w tej pracy polegał na konsultacji i pomocy redakcyjnej.**

W artykule [B36], podsumowującym pracę magisterską mgr. inż. Konstantego Łukasika (patrz Zał. 4 pkt. III J), przedstawiono koncepcję realizacji strojenia *load-pull* z wykorzystaniem połączenia pasywnego strojenia i aktywnego strojenia poprzez wstrzykiwanie sygnału w.cz. o odpowiednio dobranej amplitudzie i fazie. Praca ta była wykonywana we współpracy z KU Leuven w Belgii. **Mój udział w tej pracy polegał na konsultacji i pomocy redakcyjnej.**

W artykułach [B27], [B37] przedstawiono wyniki pracy dotyczących mało- i wielosygnałowego modelowania tranzystorów GaN HEMT wytwarzanych przez ITME. **Mój udział w pracy [B27] polegał na pomiarach parametrów rozproszenia tranzystorów dostarczonych przez ITME, konsultacji oraz pomocy redakcyjnej. Z kolei mój wkład do [B37] polegał na pomocy w redakcji artykułu.**

W pracy [B38] przedstawiono nową koncepcję doboru parametrów generatora synchronizującego dla pomiarów wielkosygnałowym VNA. Istotą tej koncepcji jest optymalizacja ciągu bitowego definiującego przebieg synchronizujący pod kątem uzyskania zadanego widma amplitudowego. **Mój wkład do tej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji, konsultacji oraz pomocy w redakcji artykułu.**

Artykuł [A19] opisuje wyniki porównania pomiarów wzorca weryfikacyjnego dla wielkosygnałowych pomiarów VNA, które zostały wykonane w ramach konkursu zorganizowanego na konferencji International Microwave Symposium 2016. **Mój wkład do tej pracy polegał na konsultacji i pomocy w redakcji artykułu.**

W pracy [B39] przedstawiono koncepcję przestrajania charakterystyki anteny fazowanej dla radaru z wykorzystaniem modulacji IQ. **Mój wkład do tej pracy polegał na zaproponowaniu koncepcji, konsultacji i pomocy w redakcji artykułu.**

## Publikacje przed doktoratem

*Czasopisma z listy JCR (4):*

- [Ap1] D. F. Williams, **A. Lewandowski**, T. S. Clement, J. C. Wang, P. D. Hale, J. M. Morgan, D. A. Keenan i A. Dienstfrey, „Covariance-based uncertainty analysis of the NIST electrooptic sampling system”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 54, nr. 1, s. 481–491, sty. 2006. **Wkład: 10 %, IF=2.027, MNiSW: 32**
- [Ap2] P. D. Hale, A. Dienstfrey, J. C. Wang, D. F. Williams, **A. Lewandowski**, D. A. Keenan i T. S. Clement, „Traceable waveform calibration with a covariance-based uncertainty analysis”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, t. 58, nr. 10, s. 3554–3568, paź. 2009. **Wkład: 5 %, IF=2.076, MNiSW: 32**
- [Ap3] D. Williams, **A. Lewandowski**, D. LeGolvan i R. Ginley, „Electronic vector-network-analyzer verification”, *IEEE Microwave Magazine*, t. 10, nr. 6, s. 118–123, czer. 2009. **Wkład: 15 %, IF=0.896, MNiSW: 32**
- [Ap4] **A. Lewandowski**, D. F. Williams, P. D. Hale, J. C. Wang i A. Dienstfrey, „Covariance-based vector-network-analyzer uncertainty analysis for time-and frequency-domain measurements”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, t. 58, nr. 7, s. 1877–1886, lip. 2010. **Wkład: 65 %, IF=2.025, MNiSW: 32**

*Czasopisma spoza listy JCR (1):*

- [Bp1] **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Analysis of errors in on-wafer measurements due to multimode propagation in CB-CPW”, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, nr. 2, s. 16–22, lut. 2005. **Wkład: 80 %, MNiSW: 9**

*Publikacje recenzowane w materiałach z konferencji międzynarodowych (15):*

- [Bp2] **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Errors in on-wafer measurements due to multimode propagation”, w *2004 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, t. 2, Warszawa, Polska, 17–19 maj. 2004, s. 759–762. **Wkład: 80 %, MNiSW: 15**
- [Bp3] **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Verification of CAD models for microstrip components using FD-TD method”, w *2002 14th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, t. 2, Gdańsk, Polska, 20–22 maj. 2002, s. 357–360. **Wkład: 80 %, MNiSW: 15**
- [Bp4] **A. Lewandowski**, G. Kompa, W. Mwema i W. Wiatr, „A 24 GHz PHEMT-based oscillator”, w *2002 International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, t. 2, Gdańsk, Polska, 20–22 maj. 2002, s. 377–380. **Wkład: 60 %, MNiSW: 15**

- [Bp5] **A. Lewandowski**, K. Kucy i D. Startek, „High-speed DDS-based generator of pulses with an arbitrary frequency modulation”, w *2006 16th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 22–24 maj. 2006, s. 125–128. **Wkład: 60 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp6] P. D. Hale, D. Williams, A. Dienstfrey, C. Wang, **A. Lewandowski**, T. Clement i D. Keenan, „Complete waveform characterization at NIST”, w *2008 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Broomfield, CO, USA, 8–13 czer. 2008, s. 680–681. **Wkład: 5 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp7] D. Williams, **A. Lewandowski**, D. LeGolvan, R. Ginley, C.-M. Wang i J. Splett, „Use of electronic calibration units for vector-network-analyzer verification”, w *2009 74th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Broomfield, CO, USA, 30 list.–4 grud. 2009. DOI: 10.1109/ARFTG74.2009.5439107. **Wkład: 15 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp8] G. Kędzierski, K. Korszeń, **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Towards establishing traceable coaxial Type-N scattering-parameter measurements at NIT”, w *2010 International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Wilno, Litwa, 14–16 czer. 2010, s. 1–4. **Wkład: 25 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp9] T. M. Wallis i **A. Lewandowski**, „Statistical measurement techniques for equivalent source mismatch of 1.85 mm power splitter”, w *2008 72nd Microwave Measurement Symposium (ARFTG)*, Portland, OR, USA, 9–12 grud. 2008, s. 50–53. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp10] **A. Lewandowski**, D. LeGolvan, R. A. Ginley, T. M. Wallis, A. Imtiaz i P. Kabos, „Wideband measurement of extreme impedances with a multistate reflectometer”, w *2008 72nd Microwave Measurement Symposium (ARFTG)*, Portland, OR, USA, 9–12 grud. 2008, s. 45–49. **Wkład: 60 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp11] **A. Lewandowski** i D. Williams, „Characterization and modeling of random vector network analyzer measurement errors”, w *2008 17th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, IEEE, Wrocław, Polska, 19–21 maj. 2008, s. 1–4. **Wkład: 80 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp12] **A. Lewandowski** i D. Williams, „Stochastic modeling of coaxial-connector repeatability errors”, w *2009 74th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Broomfield, CO, USA, 30 list.–4 grud. 2009. DOI: 10.1109/ARFTG74.2009.5439104. **Wkład: 80 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp13] **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Correction for line length errors and center-conductor-gap variation in the coaxial multilines through-reflect-line calibration”, w *2009 74th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, Broomfield, CO, USA, 30 list.–4 grud. 2009. DOI: 10.1109/ARFTG74.2009.5439110. **Wkład: 80 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp14] **A. Lewandowski**, W. Wiatr i J. Dobrowolski, „Multi-frequency approach to the coaxial multilines through-reflect-line calibration”, w *2010 18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Wilno, Litwa, 14–16 czer. 2010, s. 1–4. **Wkład: 80 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp15] W. Wiatr i **A. Lewandowski**, „Multiple reflect technique for wideband one-port VNA calibration”, w *2006 16th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Kraków, Polska, 22–24 maj. 2006, s. 37–40. **Wkład: 20 %**, **MNiSW: 15**
- [Bp16] **A. Lewandowski** i W. Wiatr, „Calibration of a 220–325 GHz vector-network-analyzer with multiple rectangular-waveguide sections”, w *2010 International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Wilno, Litwa, 14–16 czer. 2010, s. 1–4. **Wkład: 60 %**, **MNiSW: 15**

## Pozostała literatura

- [1] „IEEE Standard for Precision Coaxial Connectors (DC to 110 GHz)”, *IEEE Std 287-2007 (Revision of IEEE Std 287-1968)*, wrz. 2007. DOI: 10.1109/IEEESTD.2007.4317507.

- [2] J. A. Jargon, D. F. Williams, T. M. Wallis, D. X. LeGolvan i P. D. Hale, „Establishing traceability of an electronic calibration unit using the NIST Microwave Uncertainty Framework”, w *79th ARFTG Microwave Measurement Conference*, czer. 2012. DOI: 10.1109/ARFTG79.2012.6291181.
- [3] J. A. Jargon, C. Cho, D. F. Williams i P. D. Hale, „Physical models for 2.4 mm and 3.5 mm coaxial VNA calibration kits developed within the NIST microwave uncertainty framework”, w *2015 85th Microwave Measurement Conference (ARFTG)*, maj 2015. DOI: 10.1109/ARFTG.2015.7162913.
- [4] I. Kasa, „Closed-Form Mathematical Solutions to Some Network Analyzer Calibration Equations”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, t. IM-23, nr. 4, s. 399–402, grud. 1974.
- [5] G. F. Engen, „Calibrating the Six-Port Reflectometer by Means of Sliding Terminations”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. MTT-26, nr. 12, s. 951–957, grud. 1978.
- [6] W. Wiatr, „A method for embedding network characterization with application to low-loss measurements”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, t. 36, s. 487–490, czer. 1987.
- [7] W. Wiatr, „Statistical VNA calibration technique using thru and multiple reflect terminations”, w *2008 Int. Conf. Microw. Radar and Wireless Commun. (MIKON)*, maj 2008.
- [8] J. P. Hoffmann, P. Leuchtmann i R. Vahldieck, „Over-determined offset short calibration of a VNA”, w *2008 71st ARFTG Microw. Meas. Conf.*, czer. 2008. DOI: 10.1109/ARFTG.2008.4633318.
- [9] R. Marks, „A multiline method of network analyzer calibration”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. 39, nr. 7, s. 1205–1215, lip. 1991.
- [10] A. Rumiantsev i N. Ridler, „VNA calibration”, *IEEE Microw. Mag.*, t. 9, nr. 3, s. 86–99, 2008.
- [11] W. Wiatr, „Line-length optimization of offset-short standards for broadband VNA calibration”, w *Proc. of 18<sup>th</sup> International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Vilnius, Lithuania, czer. 2010.
- [12] L. J. Opalski, „Optimization of a broadband vector network analyzer calibration”, w *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, t. SPIE 8903, czer. 2013, 89031W-1–89031W-7.
- [13] J. Juroshek, „A Study of Measurements of Connector Repeatability Using Highly Reflecting Loads (Short Paper)”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. 35, nr. 4, s. 457–460, kw. 1987.
- [14] J. P. Hoffmann, P. Leuchtmann i R. Vahldieck, „Pin gap investigations for the 1.85 mm coaxial connector”, w *Proc. 2007 Europ. Microw. Conf.*, paź. 2007, s. 388–391.
- [15] J. P. Hoffmann, P. Leuchtman, J. Ruefenacht i K. Wong, „S-parameters of slotted and slotless coaxial connectors”, w *2009 74th ARFTG Microw. Meas. Conf.*, list. 2009. DOI: 10.1109/ARFTG74.2009.5439109.
- [16] J. P. Hoffmann, J. Ruefenacht, M. Wollensack i M. Zeier, „Comparison of 1.85mm line reflect line and offset short calibration”, w *2010 76th ARFTG Microw. Meas. Conf.*, list. 2010. DOI: 10.1109/ARFTG76.2010.5700047.
- [17] J. Hoffmann, M. Wollensack, J. Ruefenacht i M. Zeier, „Extended S-parameters for imperfect test ports”, *Metrologia*, t. 52, nr. 1, s. 121–129, sty. 2015.
- [18] K. Wong i J. Hoffmann, „Improving VNA measurement accuracy by including connector effects in the models of calibration standards”, w *2013 82nd ARFTG Microw. Meas. Conf.*, list. 2013. DOI: 10.1109/ARFTG-2.2013.6737334.
- [19] T. E. MacKenzie i A. E. Sanderson, „Some Fundamental Design Principles for the Development of Precision Coaxial Standards and Components”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. 14, nr. 1, s. 29–39, sty. 1966.
- [20] W. C. Daywitt, „A simple technique for investigating defects in coaxial connectors”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. 35, nr. 4, s. 460–464, kw. 1987.

- [21] J. Baker-Jarvis, „TN 1341: Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements”, NIST, spraw. tech., 1990.
- [22] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, B. F. Riddle, R. T. John, P. Kabos, C. L. Holloway, R. G. Geyer i C. A. Grosvenor, „TN 1536: Measuring the Permittivity and Permeability of Lossy Materials: Solids, Liquids, Metals, Building Materials, and Negative-Index Materials”, NIST, spraw. tech., 2005.
- [23] K. Lauer, N. Wagner i P. Felix-Henningsen, „A new technique for measuring broadband dielectric spectra of undisturbed soil samples”, *Eur. J. Soil Sci.*, t. 63, nr. 2, s. 224–238, 2012.
- [24] P. Bobrov, A. Repin i O. Rodionova, „Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Property Measurements”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, t. 53, nr. 5, s. 2366–2372, 2015.
- [25] K. Folgero, „Bilinear calibration of coaxial transmission/reflection cells for permittivity measurement of low-loss liquids”, *Meas. Sci. Technol.*, t. 7, nr. 9, s. 1260, 1996.
- [26] J. Bauer R. F. i P. Penfield, „De-Embedding and Unterminating”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. MTT-22, nr. 3, s. 282–288, mar. 1974.
- [27] J. Randa, W. Wiatr i R. L. Billinger, „Comparison of adapter characterization methods”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. 47, nr. 12, s. 2613–2620, grud. 1999.
- [28] N. Wagner, K. Emmerich, F. Bonitz i K. Kupfer, „Experimental Investigations on the Frequency- and Temperature-Dependent Dielectric Material Properties of Soil”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, t. 49, nr. 7, s. 2518–2530, 2011.
- [29] N. Wagner, T. Bore, J.-C. Robinet, D. Coelho, F. Taillade i S. Delepine-Lesoille, „Dielectric relaxation behavior of Callovo-Oxfordian clay rock: A hydraulic-mechanical-electromagnetic coupling approach”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, t. 118, nr. 9, s. 4729–4744, wrz. 2013. DOI: 10.1002/jgrb.50343.
- [30] T. Bore, M. Schwing, M. L. Serna, J. Speer, A. Scheuermann i N. Wagner, „A New Broadband Dielectric Model for Simultaneous Determination of Water Saturation and Porosity”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, t. 56, nr. 8, s. 4702–4713, sierp. 2018.
- [31] D. A. Robinson, C. S. Campbell, J. W. Hopmans i in., „Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review”, *Vadose Zone J.*, t. 7, nr. 1, s. 358–389, 2008.
- [32] L. C. Oldfield, J. P. Ide i E. J. Griffin, „A Multistate Reflectometer”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, t. 34, nr. 2, s. 198–201, czer. 1985.
- [33] M. A. Malicki i R. T. Walczak, „Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity”, *Eur. J. Soil Sci.*, t. 50, nr. 3, s. 505–514, 1999.
- [34] D. Ba i P. Sabouroux, „EpsiMu, a a toolkit for permittivity and permeability measurement in microwave domain at real time of all materials: applications to solid and semisolid materials”, *Microwave Opt. Technol. Lett.*, t. 52, nr. 12, s. 2643–2648, 2010.
- [35] D. Williams, J. Wang i U. Arz, „An optimal vector-network-analyzer calibration algorithm”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, t. 51, nr. 12, s. 2391–2401, grud. 2003.
- [36] D. E. Root, J. Xu, J. Horn, M. Iwamoto i G. Simpson, „Device modeling with NVNAs and X-parameters”, w *2010 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits*, kw. 2010, s. 12–15.

Arkadiusz Lewandowski