

## **AUTOREFERAT**

**Opis dorobku i osiągnięć naukowych,  
w szczególności określonych w art. 219 ust. 1 pkt. 2  
Ustawy**

**dr inż. Mariusz Węglarski, prof. PRz  
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów  
wmar@prz.edu.pl**

**Autoreferat przygotowany zgodnie ze wzorem zalecanym przez  
Radę Doskonałości Naukowej  
Rzeszów 2020**



## SPIS TREŚCI

<b>1.</b>	<b>Imię i nazwisko .....</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Posiadane tytuły i stopnie naukowe .....</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych .....</b>	<b>5</b>
<b>4.</b>	<b>Omówienie osiągnięcia naukowego .....</b>	<b>6</b>
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego .....	6
4.2.	Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego.....	6
4.3.	Charakterystyka osiągnięcia naukowego.....	8
4.4.	Autonomiczny, półpasywny identyfikator-czujnik RFID [P_2].....	9
4.5.	Demonstrator autonomicznego czujnika RFID [P_6] .....	13
4.6.	Synteza anten dla identyfikatorów RFID [P_1, P_7, P_9, P_10, P_13].....	14
4.7.	Wyznaczanie parametrów materiałowych [P_8] .....	21
4.8.	Wyznaczanie parametrów chipów RFID [P_11].....	23
4.9.	Wyznaczanie parametrów anten RFID [P_4, P_12, P_5].....	26
4.10.	Wyznaczanie obszaru poprawnej pracy [P_13, P_14].....	31
4.11.	Implementacja techniki RFID [P_1, P_2, P_3].....	33
4.12.	Podsumowanie.....	39
<b>5.</b>	<b>Informacja o istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej .....</b>	<b>41</b>
<b>6.</b>	<b>Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę.....</b>	<b>43</b>
6.1.	Wprowadzenie .....	43
6.2.	Laboratorium HYBRID.....	44
6.3.	Udział w projektach .....	46
6.4.	Współpraca z przemysłem .....	48
6.5.	Działalność organizacyjna – podsumowanie .....	49
6.6.	Działalność dydaktyczna .....	49
6.7.	Osiągnięcia w zakresie popularyzacji nauki.....	50
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>53</b>





## 1. Imię i nazwisko

**Mariusz Węglarski**

## 2. Posiadane tytuły i stopnie naukowe

- 07.12.2005 – uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika, nadanego przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie. Temat rozprawy doktorskiej: „*Wyznaczanie cieplnych własności komponentów mikroukładu grubowarstwowego na podstawie identyfikacji dynamicznych zmian pola temperatury*”, promotor: dr hab. inż. Włodzimierz Kalita, prof. PRz, recenzenci: prof. dr hab. Stanisław Apanasewicz, prof. dr hab. inż. Włodzimierz Janke;
- 28.06.1996 – ukończenie z wynikiem bardzo dobrym z wyróżnieniem studiów wyższych magisterskich w Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, na Wydziale Elektrycznym, na kierunku elektrotechnika oraz uzyskanie tytułu magistra inżyniera w zakresie specjalności aparatura elektroniczna. Temat pracy magisterskiej: „*System wieloprocesorowy oparty na magistrali I2C*”, promotor: dr hab. inż. Włodzimierz Kalita, prof. PRz.

## 3. Przebieg zatrudnienia w jednostkach naukowych

- 30.09.2019 do chwili obecnej – zatrudnienie na stanowisku profesora uczelni w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych w Katedrze Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej;
- 01.01.2006-30.09.2019 – zatrudnienie na stanowisku adiunkta w Katedrze Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej;
- 01.10.2004-31.12.2005 – zatrudnienie na stanowisku asystenta w Zakładzie Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej;
- 01.10.1996-30.09.2004 – zatrudnienie na stanowisku asystenta w Zakładzie Układów Elektronicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej.

## 4. Omówienie osiągnięcia naukowego

### 4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 219 ust. 1 pkt. 2b Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) jest cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych nt.:

#### **Uwarunkowania syntezy autonomicznych półpasywnych identyfikatorów-czujników RFID**

### 4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego zostały wyselekcjonowane zgodnie z art. 179 ust. 6 ustawy z dnia 3 lipca 2018 roku Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669).

- [P\_1] **Węglarski M.**, Jankowski-Mihułowicz P., Chamera M., Dziedzic J., Kwaśnicki P.: *Designing Antennas for RFID Sensors in Monitoring Parameters of Photovoltaic Panels*, *Micromachines*, ISSN: 2072-666X, Vol. 11, No. 420, pp. 1-18, 2020 (DOI: 10.3390/s20010268, **IF 2019: 2.523**, lista **MNiSW 18XII2019: 70 p.**).
- [P\_2] **Węglarski M.**, Jankowski-Mihułowicz P.: *Factors Affecting the Synthesis of Autonomous Sensors with RFID Interface*, *Sensors*, ISSN: 1424-8220, Vol. 19, No. 20, 4392, pp. 1-44, 2019 (DOI: 10.3390/s19204392, **IF 2019: 3.275**, lista **MNiSW 18XII2019: 100 p.**).
- [P\_3] Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**, Lichoń W., Pilarz M.: *Efficiency Problem of FMCG Identification in HF RFID System with Multiplexed Antennas for Commercial Refrigerator*, In: Hanus R., Mazur D., Kreischer C. (eds) *Methods and Techniques of Signal Processing in Physical Measurements*. MSM2018, Lecture Notes in Electrical Engineering, ISBN: 978-3-030-11186-1, Vol. 548, pp. 119-140, **Springer**, Cham, 2019 (DOI: 10.1007/978-3-030-11187-8\_10, lista wydawnictw **MNiSW 17XII2019: 20 p.**).
- [P\_4] Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**, Lichoń W.: *A Procedure for Validating Impedance Parameters of HF/UHF RFID Transponder Antennas*, In: Hanus R., Mazur D., Kreischer C. (eds) *Methods and Techniques of Signal Processing in Physical Measurements*. MSM2018, Lecture Notes in Electrical Engineering, ISBN: 978-3-030-11186-1, Vol. 548, pp. 101-118, **Springer**, Cham, 2019 (DOI: 10.1007/978-3-030-11187-8\_9, lista wydawnictw **MNiSW on 17XII2019: 20 p.**).
- [P\_5] Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**: *A Method for Measuring the Radiation Pattern of UHF RFID Transponders*, *Metrology and Measurement Systems*, ISSN: 0860-8229, Vol. 23, No. 2, pp. 163-172, 2016 (DOI: 10.1515/mms-2016-0018, **IF 2016: 1.598**, lista **A MNiSW: 20 p.**).
- [P\_6] Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**, Pitera G., Kawalec D., Lichoń W.: *Development board of the autonomous semi-passive RFID transponder*, *Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, ISSN: 0239-7528, Vol. 64, No. 3,



- pp. 647-654, 2016 (DOI: 10.1515/bpasts-2016-0073, **IF 2016: 1.156, lista A MNiSW: 25 p.**).
- [P\_7] Tomaszewski G., Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**, Lichoń W.: *Inkjet-Printed Flexible RFID Antenna for UHF RFID Transponders*, Materials Science-Poland, ISSN: 2083-134X, Vol. 34, No. 4, pp. 760-769, 2016 (DOI: 10.1515/msp-2016-0097, **IF 2016: 0.610, lista A MNiSW: 15 p.**).
- [P\_8] Jankowski-Mihułowicz P., Lichoń W., Pitera G., **Węglarski M.**: *Determination of the Material Relative Permittivity in the UHF Band by Using T and Modified Ring Resonators*, International Journal of Electronics and Telecommunications, ISSN 0867-6747, Vol. 62, No. 2, pp. 129-134, 2016 (DOI: 10.1515/eletel-2016-0017, **Indexed on WoS, lista B MNiSW: 15 p.**).
- [P\_9] Jankowski-Mihułowicz P., Kawalec D., **Węglarski M.**: *Antenna Design for Semi-Passive UHF RFID Transponder with Energy Harvester*, Radioengineering, ISSN: 1210-2512, Vol. 24, No. 3, pp. 722-728, 2015 (DOI: 10.13164/re.2015.0722, **IF 2015: 0.590, lista A MNiSW: 20 p.**).
- [P\_10] Jankowski-Mihułowicz P., Tomaszewski G., **Węglarski M.**: *Flexible Antenna Design for HF RFID Semi-Passive Transponder in Ink-Jet Technology*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN: 0033-2097, No. 91(4), pp. 1-5, 2015 (DOI: 10.15199/48.2015.04.01, **lista B MNiSW: 14 p.**).
- [P\_11] Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**: *Determination of Passive and Semi-Passive Chip Parameters Required for Synthesis of Interrogation Zone in UHF RFID Systems*, Elektronika ir Elektrotechnika (Electronics and Electrical Engineering), ISSN: 1392-1215, Vol. 20, No. 9, pp. 65-73, 2014 (DOI: 10.5755/j01.eee.20.9.5007, **IF 2014: 0.561, lista A MNiSW: 15 p.**).
- [P\_12] Jankowski-Mihułowicz P., Pitera G., **Węglarski M.**: *The Impedance Measurement Problem in Antennas for RFID Technique*, Metrology and Measurement Systems, ISSN: 0860-8229, Vol. XXI, No 3, pp. 509-520, 2014 (DOI: 10.2478/mms-2014-0043, **IF 2014: 0.925, lista A MNiSW: 20 p.**).
- [P\_13] Jankowski-Mihułowicz P., Kalita W., Skoczylas M., **Węglarski M.**: *Modelling and Design of HF RFID Passive Transponders with Additional Energy Harvester*, International Journal of Antennas and Propagation, ISSN: 1687-5869, Vol. 2013, Article ID 242840, pp. 1-10, 2013 (DOI: 10.1155/2013/242840, **IF 2013: 0.827, lista A MNiSW: 20 p.**).
- [P\_14] Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**: *Determination of 3-Dimensional Interrogation Zone in Anticollision RFID Systems with Inductive Coupling by Using Monte Carlo Method*, Acta Physica Polonica A, ISSN: 0587-4246, Vol. 121, No. 4, pp. 936-940, 2012 (DOI: 10.12693/APhysPolA.121.936, **IF 2012: 0.531, lista A MNiSW: 15 p.**).

Oświadczenia współautorów określający indywidualny wkład każdego z nich w powstanie wyżej wymienionych prac zostały zamieszczone w załączniku nr 6 „Oświadczenia współautorów publikacji”.



### 4.3. Charakterystyka osiągnięcia naukowego

Habilitant uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika, nadany przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Informatyki (WEil) Politechniki Rzeszowskiej (PRz), a tematem rozprawy było: *„Wyznaczanie cieplnych własności komponentów mikroukładu grubowarstwowego na podstawie identyfikacji dynamicznych zmian pola temperatury”*.

Od tego czasu uczestniczył w 25 projektach badawczo-rozwojowych, z czego w trzech był kierownikiem. Był pomysłodawcą i twórcą profesjonalnego Laboratorium zintegrowanych mikro- i nanotechnologii elektronicznych HYBRID (Laboratorium HYBRID), realizowanego w ramach dwóch projektów inwestycyjnych Unii Europejskiej oraz z funduszy własnych PRz, które wraz z laboratoriami radiowej identyfikacji obiektów (Laboratorium RFID) oraz kompatybilności elektromagnetycznej (Laboratorium EMC), wchodzi w skład unikalnego kompleksu badawczego stworzonego przy Katedrze Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych (KSEiT PRz).

Habilitant w swojej pracy naukowej zajmował się przede wszystkim technologicznymi uwarunkowaniami poprawnego projektowania hybrydowych układów elektronicznych, w tym głównie urządzeń techniki RFID. Wyniki badań, w których uczestniczył, zostały opisane w ponad 50 publikacjach (wypracowanych po uzyskaniu stopnia doktora; głównie w języku angielskim, z czego 13 prac zostało zamieszczonych w periodykach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports), 40 wystąpieniach konferencyjnych oraz ponad 100 raportach wewnętrznych z prac B+R+W. Na podstawie uzyskanych wyników zostały również zgłoszone 4 wnioski o ochronę patentową wynalazków (z czego na trzy wynalazki uzyskano już ochronę patentową). Z tego dorobku wybrano 14 pozycji ściśle ze sobą powiązanych tematycznie, które zostały przedstawione do oceny jako osiągnięcie naukowe pod wspólnym tytułem *„Uwarunkowania syntezy autonomicznych półpasywnych identyfikatorów-czujników RFID”*. Zostały one wypracowane po otrzymaniu stopnia doktora.

Od 2019 roku habilitant jest zatrudniony na stanowisku profesora uczelni (Politechniki Rzeszowskiej) w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych.

Obszerny wgląd w problematykę przedstawionego osiągnięcia naukowego dotyczącego budowy bezbaterijnego, autonomicznego półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID (autonomicznego czujnika RFID) został zaprezentowany w publikacji [P\_2]. Potrzeba i możliwość zaprojektowania takiego rozwiązania została dostrzeżona na etapie badań związanych z opracowaniem wniosku patentowego P.389862 [1], a następnie z przygotowaniem publikacji [2]. Zaproponowana koncepcja była rozwijana w kolejnych przedsięwzięciach B+R+W, w tym przede wszystkim w projekcie finansowanym przez NCBR w ramach Programu Badań Stosowanych (NCBR PBS1/A3/3/2012), którego habilitant był kierownikiem. Ostateczne wyniki uzyskane w trakcie realizacji grantu zostały zaprezentowane w publikacji [P\_6]. Są one także na bieżąco implementowane w pracach wykonywanych na rzecz przedsiębiorców, między innymi zostały wykorzystane w badaniach przemysłowych realizowanych dla firmy Aluron Zawiercie, w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (NCBR POIR.01.01.01-00-0407/16, umowa na badania przemysłowe RE-U-17311). Celem projektu było opracowanie półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID przeznaczonego do wykorzystywania w systemie obejmującym proces produkcji, dystrybucji, instalacji, eksploatacji, serwisu/konserwacji i utylizacji paneli fotowoltaicznych. Obecnie tematyka uwarunkowań syntezy identyfikatorów RFID jest kontynuowana w projekcie MNiSW pod nazwą *„Regionalna Inicjatywa Doskonałości”* (MNiSW: 027/RID/2018/1) oraz projekcie Podkarpackiego Centrum Innowacji pod nazwą *„Układ i sposób elektronicznego*



monitorowania procesu tankowania paliwa z wykorzystaniem techniki RFID” (PCI: RPO.RE.20.005 z funduszy UE, wskaźnikiem rozliczającym projekt jest dokonanie zgłoszenia patentowego), a także umowach badawczo-rozwojowych na bieżąco realizowanych dla przedsiębiorstw. Doświadczenie zdobyte w zakresie techniki RFID zaowocowało zgłoszeniem kolejnych dwóch wynalazków: nr P.420898 [3] i P.428157 [4], z czego pierwszy już uzyskał ochronę Urzędu Patentowego.

Duża część prac badawczych została ukierunkowana na zidentyfikowanie uwarunkowań technologicznych syntezy autonomicznych czujników RFID. Dzięki ogromnemu potencjałowi Laboratorium HYBRID, w projektach B+R+W można było wykorzystać różne techniki wytwarzania układów elektronicznych, a tym samym poszukiwać najlepszej metody integracji identyfikatora z obiektem. W tym zakresie prowadzono badania w kierunku zastosowania druku strumieniowego materiałów przewodzących [P\_7, P\_10], drukowanych układów grubowarstwowych [P\_1], wielowarstwowych struktur hybrydowych LTCC (ang. *Low Temperature Cofired Ceramic*) [P\_8]. Wprowadzenie urządzeń techniki RFID mogą zostać zrealizowane w dowolnej z wymienionych metod, lecz każdorazowo musi być ponowiony proces ich projektowania uwzględniający specyficzne warunki danej technologii. Problematyka związana z uwarunkowaniami syntezy komponentów półpasywnych identyfikatorów RFID, na bazie których rozwinięto koncepcję autonomicznego czujnika RFID znalazła odzwierciedlenie nie tylko w kolejnych artykułach naukowych, ale również w raportach przygotowywanych na potrzeby realizowanych projektów rządowych oraz badań przemysłowych i rozwojowych zleczanych przez przedsiębiorców.

Poza charakterystyką ogólnych uwarunkowań pracy współczesnych systemów RFID, w kolejnych punktach przygotowanej charakterystyki osiągnięcia naukowego przedstawiono prace związane z syntezą autonomicznych czujników RFID, w tym rozważano takie zagadnienia jak:

- uwarunkowania technologiczne procesu syntezy [P\_7, P\_10];
- synteza anten dla identyfikatorów RFID [P\_1, P\_9, P\_10, P\_13];
- wyznaczanie parametrów chipów RFID [P\_11];
- wyznaczanie parametrów anten RFID [P\_4, P\_12, P\_5];
- kreowanie obszaru poprawnej pracy IZ (ang. *Interrogation Zone*) [P\_13, P\_14].

Należy podkreślić, że nie można opracować uniwersalnej konstrukcji autonomicznego czujnika RFID, która mogłaby być zaimplementowana w każdej dowolnej aplikacji automatycznego systemu identyfikacji obiektów. Ponadto, w praktyce projektowania nowych rozwiązań niestety najczęściej stosowana jest metoda prób i błędów, a podstawowe parametry są szacowane na podstawie testów i doświadczenia zespołu wykonawców. Dlatego też konieczne jest poszukiwanie nowych kierunków rozwoju techniki RFID, a przedstawione osiągnięcie naukowe wpisuje się w tę potrzebę [P\_1, P\_2, P\_3].

#### **4.4. Autonomiczny, półpasywny identyfikator-czujnik RFID [P\_2]**

Upowszechnianie się techniki RFID wynika przede wszystkim z postępu w dziedzinie technologii układów elektronicznych, jak również z coraz lepszego poznania zjawisk determinujących możliwość bezprzewodowej wymiany informacji i przekazywania energii na odległość. Ciągłe obniżanie kosztów jednostkowych identyfikatorów oraz integracja z czujnikami różnych wielkości fizycznych pozwala na wprowadzenie tego rozwiązania do kolejnych obszarów działalności człowieka, w tym do jednych z najszybciej rozwijających się rynków, jakimi są dystrybucja produktów szybkozbywalnych FMCG (ang. *Fast Moving Consumer Goods*) oraz Internet produktów IoT (ang. *Internet of Things*). **Prace badawcze**



prowadzone przez habilitanta wpisują się w wymienione obszary techniki RFID, jak również dąży on do poszukiwania innych kierunków jej rozwoju np. zmierzających do pozyskania możliwości pełnej integracji identyfikatorów z wyrobami tekstylnymi, kreowania systemów nawigacji obiektów w pomieszczeniach użytkowych lub autonomicznych, bezbateryjnych i bezprzewodowych sieci sensorowych [P\_1, P\_2].

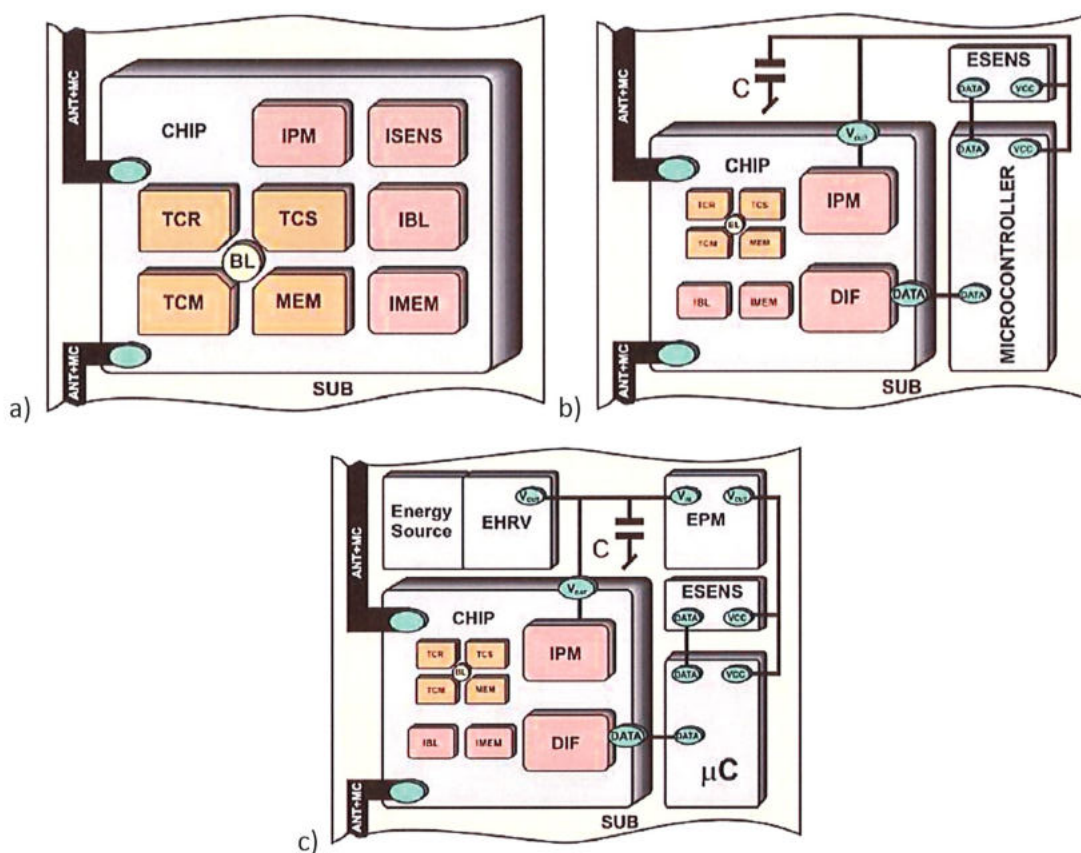
Budowa wewnętrzna urządzeń techniki RFID jest uzależniona od bardzo wielu czynników [5]. W głównej mierze zdeterminowana jest przez pasmo pracy oraz wykorzystywane częstotliwości robocze ( $f_0$ ) i związane z tym fizyczne podstawy przekazywania energii i informacji w systemach indukcyjnie sprzężonych pasma LF ( $f_0 \in (100 \text{ kHz}-135 \text{ kHz})$ ) i HF ( $f_0 = 13,56 \text{ MHz}$ ) oraz w systemach opartych na propagacji fal radiowych pasma UHF ( $f_0 \in (860 \text{ MHz}-960 \text{ MHz})$ ). Część wymagań konstrukcyjnych wynika wprost ze specyfikacji protokołów komunikacyjnych (np. ISO/IEC 15693, 14443 lub 18000-3 dla pasma HF oraz EPC Class 1 Gen 2 – ISO/IEC 18000-63 dla pasma UHF) [6, 7]. Do kolejnych czynników należy zaliczyć: rodzaj obiektu, dla którego jest przeznaczony identyfikator i związane z tym wymagania eksploatacyjne (tj. odporność na warunki środowiskowe, niskie koszty implementacji, elastyczność, możliwość pełnej integracji); potrzebę uzupełnienia identyfikatorów o dodatkowe funkcje (tj. detekcja lub pomiar wartości różnych wielkości fizycznych, zasilanie rezerwowe, możliwość pozyskiwania energii ze środowiska pracy); przyjęty dla danej aplikacji zakres czytania, który zależy głównie od mocy i wielkości układów antenowych, ale także czułości obwodów wejściowych (przy założeniu stałych warunków propagacji fali radiowej); wykorzystane rozwiązania układowe (chipy, mikrokontrolery lub inne struktury mikroelektroniczne), które bardzo często są ujmowane w standardy kreowane przez producentów działających w branży techniki RFID. Należy zaznaczyć, że powyżej zostały wymienione tylko podstawowe czynniki, które wpływają na sposób prowadzenia syntezy urządzeń RFID spośród wielu innych rozpatrywanych przy analizie prezentowanego osiągnięcia naukowego.

**Wprowadzenie przez habilitanta określenia czujnik RFID podkreśla znaczenie funkcji pomiarowych, które mogą być realizowane przez elektroniczne identyfikatory RFID.** Obecnie na rynku komercyjnym najczęściej spotykane są rozwiązania chipów RFID, w których istnieje możliwość wykonywania pomiaru temperatury wewnętrznej struktury półprzewodnikowej (Rys. 1.a) [8, 9] lub dołączenia – poprzez cyfrowy interfejs szeregowy typu SPI lub I2C – inteligentnych, mikroprocesorowych systemów pomiarowych (Rys. 1.b) z dodatkowymi przetwornikami różnych wielkości fizycznych (wilgotności [10], temperatury [11], natężenia światła [11], ciśnienia [P\_13], przyspieszenia [12], gazu [13] itp.). Są one głównie dedykowane do projektowania identyfikatorów półpasywnych (najczęściej zasilanych bateryjnie), które mogą działać (np. realizować funkcje akwizycji danych) zarówno w obszarze poprawnej pracy IZ [P\_13, P\_14] jak i autonomicznie poza nim (np. w przypadku braku aktywności czytnika/programatora). Duże zapotrzebowanie energetyczne dla dodatkowych bloków funkcjonalnych, a tym samym konieczność stosowania elektrochemicznego źródła zasilania jest na tyle kłopotliwa [14], że nie zdobyły one dotychczas istotnego znaczenia na rynku komercyjnym. Dlatego też w wielu rozważaniach literaturowych rozpatrywane są opcje pozyskiwania energii ze środowiska (Rys. 1.c), w tym głównie promieniowania świetlnego [15], termicznego lub drgań mechanicznych [16, 17]. Możliwa do uzyskania moc wyjściowa tego typu układów zasilania [14, 16] jest na tyle duża, że z powodzeniem wystarcza do permanentnego działania współczesnych systemów cyfrowych. Wadą natomiast jest problem ze zintegrowaniem układu pozyskiwania dodatkowej energii i identyfikatora RFID w jednej



wspólnej strukturze, przy zachowaniu warunku minimalnych rozmiarów, niskich kosztów wytwarzania i przede wszystkim łatwości łączenia ze znakowanym obiektem.

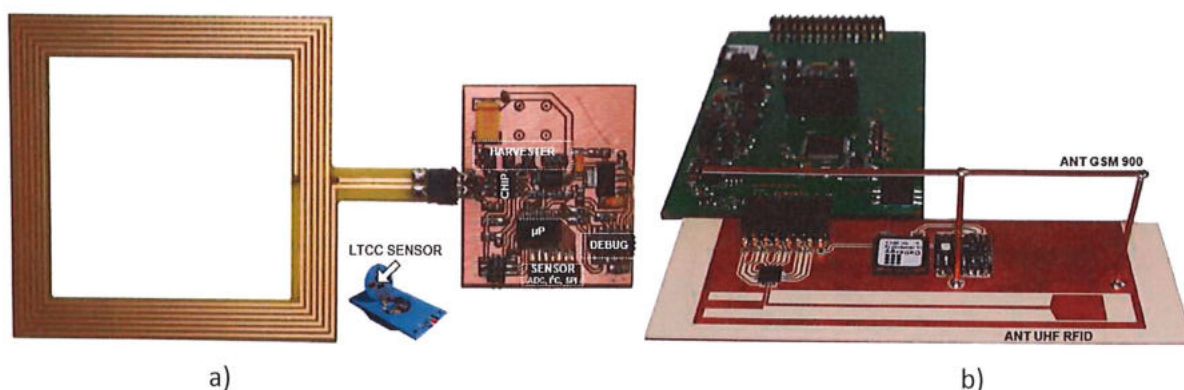
W przedstawioną potrzebę rozwijania urządzeń techniki RFID i poszukiwania nowych rozwiązań oraz ich implementacji w rzeczywistych systemach automatycznej identyfikacji obiektów wpisuje się idea autonomicznego czujnika RFID, wypracowana przez habilitanta na podstawie doświadczenia zdobytego przy realizacji kolejnych projektów badawczo-rozwojowych. Uzyskane wyniki podsumował on w publikacji [P\_2]. Między innymi zasugerował modele układów akwizycji danych oraz kondycjonowania i magazynowania energii, które mogłyby pracować w bardzo niekorzystnych warunkach ograniczonej wydajności źródła zasilania. Są one poparte badaniami mającymi na celu wykorzystanie pola elektromagnetycznego generowanego przez systemy radiokomunikacyjne powszechnego użytku (niezwiązane z pracą rozważanego systemu RFID) do zasilania identyfikatorów. Zaprezentowane podejście pozwala na łatwą i pełną integrację technologiczną wszystkich komponentów urządzenia.



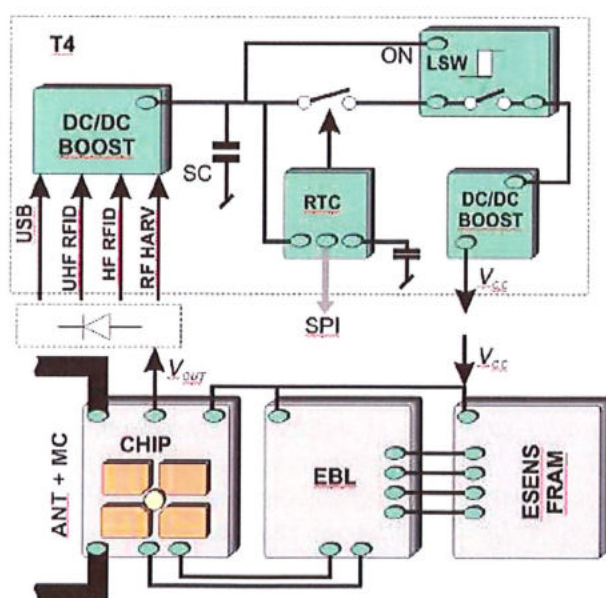
**Rys. 1.** Koncepty budowy identyfikatora-czujnika RFID: a) identyfikator-czujnik pasywny; b) platforma cyfrowa czujnika pasywnego; a) i b) quasi-autonomiczny czujnik półpasywny po dołączeniu dodatkowego źródła zasilania; c) autonomiczny czujnik RFID z dodatkowym układem pozyskiwania energii; TCM, TCR, TCS – odpowiednio modulator, prostownik, regulator napięcia w obwodach wejściowych chipu; MEM – podstawowa pamięć danych; BL – część cyfrowa chipu; IBL – cyfrowy blok akwizycji danych; ISENS – wewnętrzne czujniki; IMEM – poszerzona pamięć danych; IPM – układ pozyskiwania i zarządzania dodatkową energią; DIF – cyfrowy interfejs; ESENS – zewnętrzne czujniki; EHRV – układ pozyskiwania energii środowiska; EPM – zewnętrzny układ zarządzania energią; ANT+MC – obwód anteny z układem dopasowania; C – pojemność / superkondensator / magazyn energii

Koncepcja quasi-autonomicznego czujnika została odzwierciedlona w projekcie (Rys. 2.a) opartym na dwuportowej pamięci STM M24LR64E-R [18] pracującej w paśmie HF ( $f_0 = 13,56$  MHz), zgodnie ze standardem ISO/IEC 15693, ISO/IEC 18000-3 tryb 1 [19]. Natomiast konstrukcja autonomicznego identyfikatora-czujnika RFID z układem gromadzącym energię ze środowiska pracy aplikacji (zgodnie z rysunkiem 1.c) została zrealizowana przy wykorzystaniu chipu IDS/AMS SL900A (Rys. 2.b) [9], pracującego w paśmie UHF. Energię niezbędną do działania bloków pomiarowych pozyskano z pasma 925-960 MHz (pasmo pracy stacji bazowych telefonii komórkowej GSM900), za pośrednictwem bloku radiowego P.2110 [20], opracowanego we współpracy z kanadyjską firmą PowerCast.

Należy nadmienić, że dzięki podjętej współpracy z firmą PowerCast habilitant brał również udział w opracowaniu modułu wykorzystującego inne systemy telekomunikacyjne (UMTS, LTE, WiFi).



**Rys. 2.** Praktyczna realizacja czujnika RFID: a) quasi-autonomiczny czujnik RFID pracujący w paśmie HF z czujnikiem ciśnienia LTCC; b) autonomiczny czujnik RFID pracujący w paśmie UHF: ANT GSM 900 – antena układu pozyskującego energię z pola elektromagnetycznego systemu powszechnego użytku (GSM 900) współpracująca z modułem PowerCast P2110; ANT UHF RFID – antena systemu RFID pasma UHF współpracująca z chipem IDS/AMS SL900A



**Rys. 3.** Schemat ideowy układu pozyskiwania energii dedykowanego dla autonomicznych czujników RFID: DC/DC BOST – energooszczędny regulator typu Boost Silicon Labs TS3310; SC – superkondensator Cellergy CLC03P025F12; LSW – niksoomowy przetwornik Texas Instruments TPS22934; RTC – zegar czasu rzeczywistego Abracon AB1815; EBL – cyfrowy blok akwizycji danych



Ponieważ w układach pozyskujących energię z systemów telekomunikacyjnych można uzyskać niewielką moc wyjściową (np. w paśmie GSM 0,9 GHz lub 1,8 GHz – do  $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , WiFi 2,4 GHz –  $0,01 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  [21]), dlatego przy projektach szczególną uwagę zwrócono na bilans energetyczny zastosowanego systemu akwizycji danych i układu zasilania oraz ładowania superkondensatora. W publikacji [P\_2] omówione zostały aspekty dotyczące konstruowania bloków kondycjonujących i magazynujących energię pozyskiwaną z pola elektromagnetycznego. Najbardziej zaawansowana wersja harvester'a została opracowana w ramach projektu NCBR PBS1/A3/3/2012 dla autonomicznych, półpasywnych identyfikatorów-czujników RFID (Rys. 3). Układ pozwala na ładowanie superkondensatora z trzech źródeł (systemu RFID pasma HF, UHF oraz GSM), nawet przy bardzo małej intensywności pola elektromagnetycznego (minimalne napięcie pracy 0,85 V z histerezą 0,02 V) [P\_6].

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 2] polegał na:** opracowaniu koncepcji budowy autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID z uwzględnieniem bieżącego stanu wiedzy oraz możliwości aplikacji bezbateryjnych węzłów pomiarowych w rzeczywistych warunkach funkcjonowania systemów RFID; specyfikacji uwarunkowań układowych i technologicznych; ewaluacji modelowych rozwiązań konstrukcyjnych i ich charakterystyce pod względem funkcjonalnym; przygotowaniu procesu technologicznego i ewaluacji kolejnych wersji testowych; nadzorowaniu prac projektowych; częściowym opracowaniu i testowaniu poprawności działania prezentowanych implementacji układowych; opracowaniu manuskryptu i koordynacji jego procesu wydawniczego. Procentowy udział habilitanta: 60%.

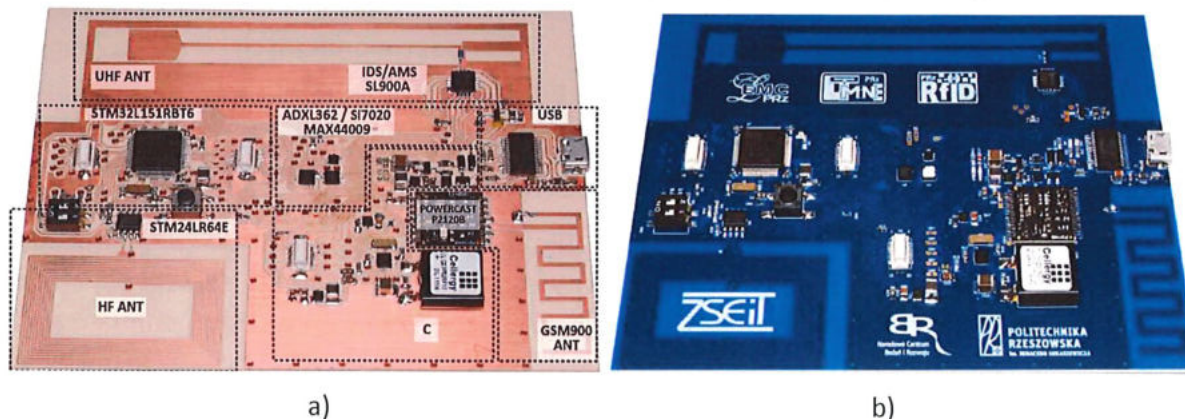
#### **4.5. Demonstrator autonomicznego czujnika RFID [P\_6]**

Problematyka projektowania bezbateryjnych, autonomicznych, półpasywnych identyfikatorów-czujników RFID została rozwinięta w publikacji [P\_6]. Habilitant zaprezentował w niej rozbudowany demonstrator (Rys. 4) opracowany w ramach grantu NCBR PBS1/A3/3/2012, którego był kierownikiem. Zaproponowana koncepcja wpisuje się w prognozy rozwoju systemów automatycznej identyfikacji obiektów. Przewiduje się, że w przyszłości w pamięci chipu będą przechowywane nie tylko szczegółowe informacje o znakowanym obiekcie, ale również dane pomiarowe pozyskiwane na bieżąco z otoczenia za pośrednictwem wbudowanych czujników różnych wielkości fizycznych. Ponadto autonomiczny sensor RFID będzie aktywny permanentnie bez konieczności stosowania źródła baterijnego, gdyż energia będzie pozyskiwana ze środowiska.

Autonomiczny czujnik RFID przedstawiony w [P\_6] zaprojektowano do pracy w dwóch pasmach częstotliwości HF (zgodnie z protokołem ISO IEC 15693) oraz UHF (EPC Class 1 Gen 2 / ISO IEC 18000-63) oraz do czerpania dodatkowej energii z systemu telekomunikacyjnego powszechnego użytku (GSM 900). W projekcie zostały wykorzystane odpowiednio chipy STM M24LR64E oraz IDS/AMS SL900A, wyposażone w szeregowo łącza danych (odpowiednio I2C i SPI), które pozwalają na komunikację z mikroprocesorowym blokiem pomiarowym z zaimplementowanym 3-osiowym akcelerometrem MEMS (Analog Devices ADXL362), czujnikiem wilgotności i temperatury (Silicon Labs Si7020) oraz natężenia oświetlenia (Maxim Integrated MAX44009). Autonomiczna praca urządzenia została uzyskana poprzez zastosowanie modułu PowerCast P2120B pozyskującego energię z pola elektromagnetycznego w paśmie 930-975 MHz (GSM 900). W urządzenie wbudowano również superkondensator wraz z odpowiednim układem ładowania i zarządzania zasilaniem oraz system sterujący oparty na 32-bitowym mikrokontrolerze z rdzeniem ARM



(STM32L151RBT6 typu Low Power). Należy podkreślić, że dzięki zabiegom habilitanta demonstrator został wytworzony na linii montażowej zakładu produkcyjnego Elmak Sp. z o. o. (Rys. 4.b) i został przygotowany jako zestaw demonstracyjny dla potencjalnych projektantów systemów RFID. Ponadto przy udziale habilitanta przeprowadzono badania rynku odbiorców w kierunku rozpoznania potrzeby wdrażania tego typu systemów oraz czynników wpływających na podejmowanie decyzji w tym zakresie [22, 23].



Rys. 4. Demonstrator autonomicznego czujnika RFID: a) wersja testowa zrealizowana w Laboratorium HYBRID; b) wersja produkcyjna zrealizowana w firmie Elmak Sp. z o.o.

W trakcie realizacji projektu habilitant zwrócił uwagę na wiele uwarunkowań decydujących o skuteczności działania demonstratora w przyszłościowej aplikacji systemu RFID, które zostały szczegółowo rozwinięte w kolejnych publikacjach przedmiotowego osiągnięcia naukowego.

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P\_6] polegał na:** ewaluacji przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych demonstratora autonomicznego półpasywnego identyfikatora RFID; skorelowaniu parametrów wykonanych układów rozwojowych z założeniami projektowymi; wskazaniu i oszacowaniu wpływu parametrów procesów technologicznych na poprawność projektowania / modelowania komponentów demonstratora; opracowaniu opisu manuskryptu w części dotyczącej aspektów układowej budowy demonstratora i technicznego wykonania obwodów PCB w Laboratorium HYBRID. Procentowy udział habilitanta: 25%.

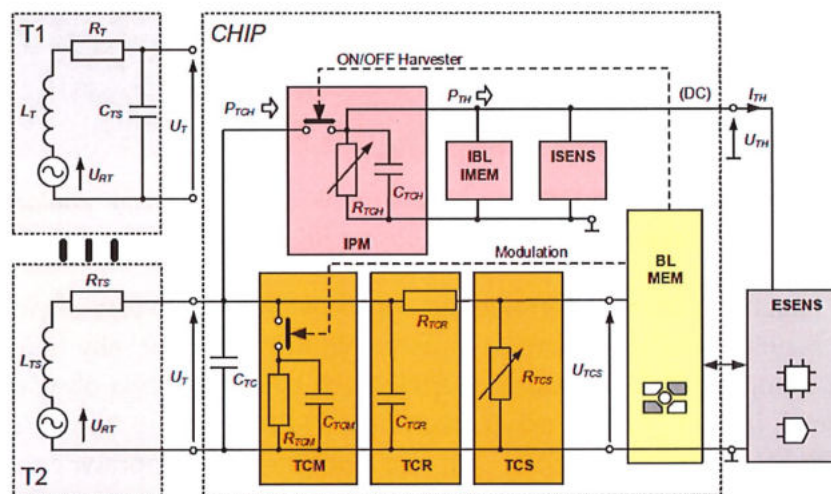
#### 4.6. Synteza anten dla identyfikatorów RFID [P\_1, P\_7, P\_9, P\_10, P\_13]

Anteny identyfikatorów RFID są projektowane pod kątem zastosowania w docelowej aplikacji. W zależności od planowanej implementacji mogą być realizowane w technologii PCB, LTCC, na podłożach ceramicznych, szklanych, metalowych, elastycznych itp., poprzez wykorzystanie sitodruku lub innych technik poligraficznych dostosowanych do potrzeb wytwarzania układów elektronicznych. Zastosowanie innowacyjnych procesów wytwórczych oraz nowych materiałów konstrukcyjnych, pociąga za sobą konieczność modyfikacji dotychczasowej budowy identyfikatorów zarówno w odniesieniu do wzorów obwodów antenowych jak i układów dopasowania lub sposobów dołączania chipu. Zadanie to jest utrudnione ze względu na brak pełnej informacji o parametrach materiałów funkcjonalnych oraz wpływu dokładności procesu technologicznego na właściwości uzyskiwanych warstw elektronicznych. Ponadto konieczne jest przebadanie rozwijanych konstrukcji pod kątem kompatybilności materiałowej i procesowej, szczególnie w przypadku stosowania nietypowych laboratoryjnych urządzeń wytwórczych.



W tym kontekście, w publikacjach [P\_1], [P\_7], [P\_9], [P\_10] i [P\_13] habilitant przedstawił uwarunkowania syntezy anten dedykowanych do pracy w półpasywnych identyfikatorach RFID, zarówno dla pasma UHF jak i HF. Zwrócił w nich szczególną uwagę na najistotniejsze aspekty know-how wypracowanego w Laboratorium HYBRID. Badania były prowadzone w różnych kierunkach, w tym między innymi związanych z ustalaniem parametrów pracy urządzenia drukującego, jakością i trwałością wytwarzanych warstw przewodzących, doбором i wstępnym kondycjonowaniem materiału podłożowego, past i tuszów, koniecznością przewidzenia stopnia przeskalowania wzoru w stosunku do oczekiwanego wydruku itp. Należy podkreślić, że w celu opracowania efektywnie działającego elektronicznego układu RF, konieczne jest zidentyfikowanie nie tylko wpływu dokładności zastosowanych procesów, ale również poznanie parametrów użytych nowych materiałów [P\_8] i umiejętne wykorzystanie tej wiedzy na etapie projektowym.

Problematykę projektowania oraz dopasowywania impedancyjnego anteny i chipu RFID należy rozważać odmiennie dla pasm HF i UHF, przy czym nie można stosować rozwiązań znanych z typowych  $50\ \Omega$  lub  $75\ \Omega$  torów sygnałowych. Uwarunkowania syntezy anten dla czujników RFID pasma UHF habilitant poddał dyskusji w publikacji [P\_1], [P\_7] i [P\_9]. Natomiast problematykę związaną z projektowaniem rozwiązań dedykowanych do pracy w warunkach sprzężenia indukcyjnego (pasmo HF) przybliżył w publikacjach [P\_10] i [P\_13]. W obu przypadkach szczególną uwagę zwrócił na projektowanie obwodów indukcyjnych dla identyfikatorów półpasywnych, wyposażonych w układ pozyskiwania energii, z możliwością jej udostępniania dla dodatkowych bloków funkcjonalnych.



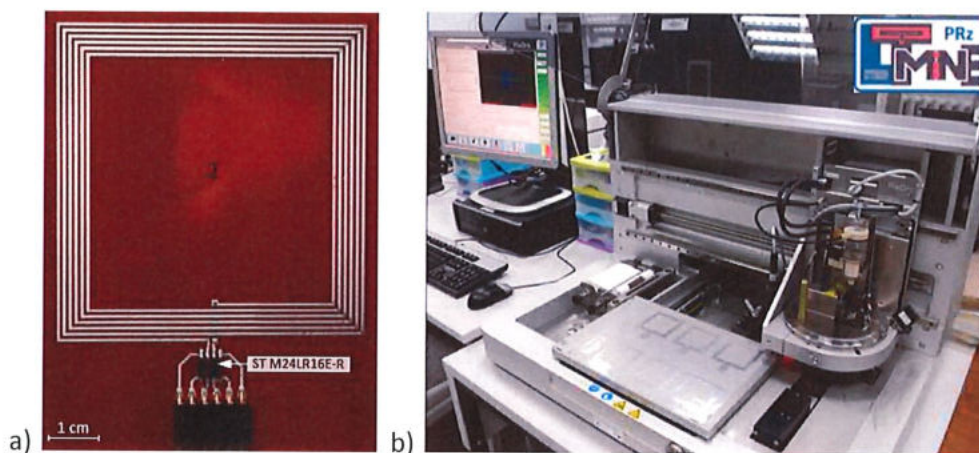
**Rys. 5.** Zmodyfikowany model półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID (oznaczenia bloków zgodnie z rysunkiem 1.: T1 – model równoległy anteny; T2 – równoważny model szeregowy anteny;  $L_T$  – indukcyjność własną pętli antenowej;  $R_T$  – rezystancja ścieżek oraz straty ciepła w pętli antenowej;  $C_{TS}$  – wypadkowa wszystkich pojemności międzyzwojowych;  $R_{TS}$  i  $L_{TS}$  – rezystancja i indukcyjność szeregowego obwodu antenowego;  $U_{TH}$  i  $I_{TH}$  – stałe napięcie i prąd na wyjściu bloku pozyskującego energię;  $U_{RT}$  – napięcie indukowane w pętli antenowej;  $P_{TCH}/P_{TH}$  – moc wejściowa/wyjściowa układu pozyskującego energię;  $R_{TCR}$ ,  $R_{TCS}$ ,  $R_{TCM}$ ,  $R_{TCH}$  – odpowiednio rezystancja prostownika napięcia, regulatora napięcia, modulatora, harwestera;  $C_{TCM}$  – pojemność modulatora;  $C_{TC}$  – wypadkowa pojemność bloków wewnętrznych chipu

W paśmie HF ( $f_0 = 13,56\ \text{MHz}$ ) obwód antenowy jest realizowany w postaci pętli o rozmiarach dużo mniejszych od długości fali ( $\lambda \approx 22\ \text{m}$ ). Największa wartość napięcia  $U_T$  wytwarzanego na zaciskach jest uzyskiwana wtedy, gdy występuje rezonans równoległy



pomiędzy indukcyjnością  $L_{TS}$  zastępczego obwodu szeregowego anteny, a pojemnością  $C_{TC}$  obwodów wejściowych aktywnego chipu (Rys. 5). Wtedy też występują najlepsze warunki do pozyskiwania energii z sygnału wygenerowanego przez czytnik/programator. W przypadku jej nadmiaru, jej część może być przejęta i wykorzystana do realizacji nietypowych zadań (np. akwizycji danych pomiarowych). Dlatego też podstawowy model pasywnego identyfikatora został uzupełniony o układ pozyskiwania dodatkowej energii (IPM).

W celu prowadzenia prac aplikacyjnych w zakresie autonomicznego czujnika RFID pasma HF, w szczególności określenia wpływu doboru technologii wykonania na proces syntezy anten oraz modelowania i wyznaczania obszaru IZ w warunkach zwiększonego obciążenia generowanego przez dodatkowe bloki funkcjonalne, habilitant zrealizował dwa różne projekty (przeznaczone do współpracy z chipem STM M24LR16E-R [18]). W pierwszym przypadku [P\_13] zastosowana została typowa technologia PCB i standardowe podłoże FR-4 (Rys. 2.a), w drugim (Rys. 6.a) [P\_10] – druk strumieniowy (Rys. 6.b) na podłożu elastycznym DuPont Kapton HN-500, przy użyciu tuszy z nanocząsteczkami srebra NPS-J firmy Harima.



Rys. 6. Antena drukowana: a) identyfikator pracujący w paśmie HF na podłożu elastycznym; b) drukarka strumieniowa w trakcie realizacji anten pasma HF – wyposażenie Laboratorium HYBRID

Głównym wyznacznikiem poprawnego opracowania struktury było porównanie wyznaczonych i zasymulowanych wartości impedancji, dobranej tak, aby indukcyjność pętli antenowej wraz z pojemnością obwodów wejściowych chipu tworzyła obwód rezonansowy dla częstotliwości  $f_0$  [P\_5, P\_11]. W przypadku anteny PCB uzyskano bardzo dużą zgodność wyników pomiarów i symulacji (Tab. 1), co potwierdza poprawne odwzorowanie uwarunkowań technologicznych w modelach numerycznych. W przypadku anten elastycznych można stwierdzić zbieżność pomiarów dla kolejnych próbek testowych i nieco zwiększone wartości w stosunku do tych otrzymanych z obliczeń numerycznych dla sporządzonego modelu (Tab. 2). Natomiast rozbieżności wynikały głównie z korekt wprowadzanych w ustawieniach procesu technologicznego, mających na celu zwiększenie dokładności odwzorowania opracowanego projektu.

Tab. 1. Impedancja anteny PCB dedykowanej do pracy w paśmie HF [P\_13]

	Model	Sample
$R_{TS}, \Omega$	8,59	8,68
$L_{TS}, \mu H$	5,08	5,10



**Tab. 2.** Impedancja drukowanej anteny elastycznej dedykowanej do pracy w paśmie HF [P\_10]

	Model	S.#1	S.#2	S.#3	S.#4	S.#5	S.#6	S.#7
$R_{TS}, \Omega$	39,3	46,5	39,5	35,8	35,3	35,5	41,0	51,1
$L_{TS}, \mu\text{H}$	5,04	5,50	5,52	5,48	5,46	5,49	5,48	5,51

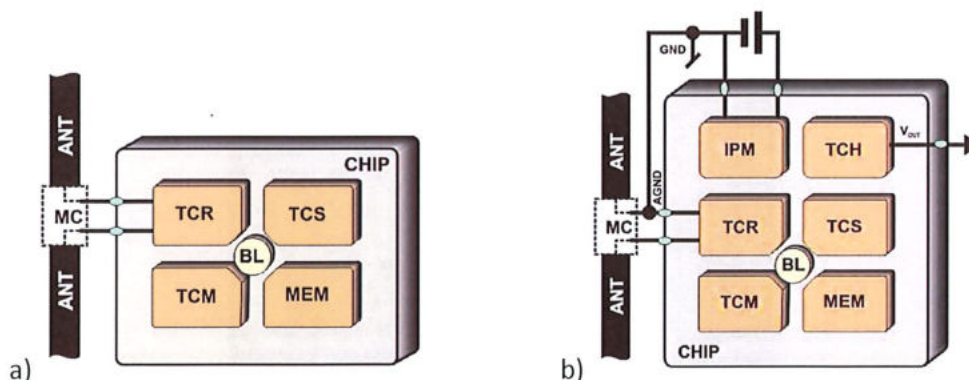
Obie wersje anten zostały wykorzystane do zbudowania czujników RFID, w których zastosowano ten sam mikroprocesorowy system akwizycji danych (oparty na mikrokontrolerze Low Power C8051F988) oraz umożliwiający pomiar różnych wielkości fizycznych, w tym również pochodzących z grubowarstwowego czujnika ciśnienia LTCC, opracowanego w ramach wcześniejszych badań realizowanych w KSEiT [24]. W projekcie [P\_13], stanowiącym wstęp do budowy autonomicznego czujnika RFID, habilitant zwrócił szczególną uwagę na bilans energetyczny układu elektronicznego poprzez odpowiedni dobór komponentów oraz implementację mikroprocesorowego systemu zarządzania mocą.

Zgodnie ze sztuką projektowania przedstawioną w publikacji [P\_9], dla efektywnie działającego systemu radiowego w paśmie UHF, musi zostać spełniona zależność  $Z_{TA} = Z_{TC}^*$  przy  $P_{Tmin}$  [P\_11] oznaczająca stan dopasowania impedancyjnego anteny i obwodów wejściowych chipu (przy czym reaktancja anteny  $X_{TA}$  ma charakter indukcyjny, a chipu  $X_{TC}$  – pojemnościowy). Wówczas współczynnik przenoszenia mocy wyrażony zależnością:

$$\tau = \frac{4 \operatorname{Re}(Z_{TA}) \operatorname{Re}(Z_{TC})}{\operatorname{Re}(Z_{TA} + Z_{TC})^2 + \operatorname{Im}(Z_{TA} + Z_{TC})^2} \quad (1)$$

wynosi  $\tau = 1$ , co zapewnia maksymalną sprawność pozyskiwania energii.

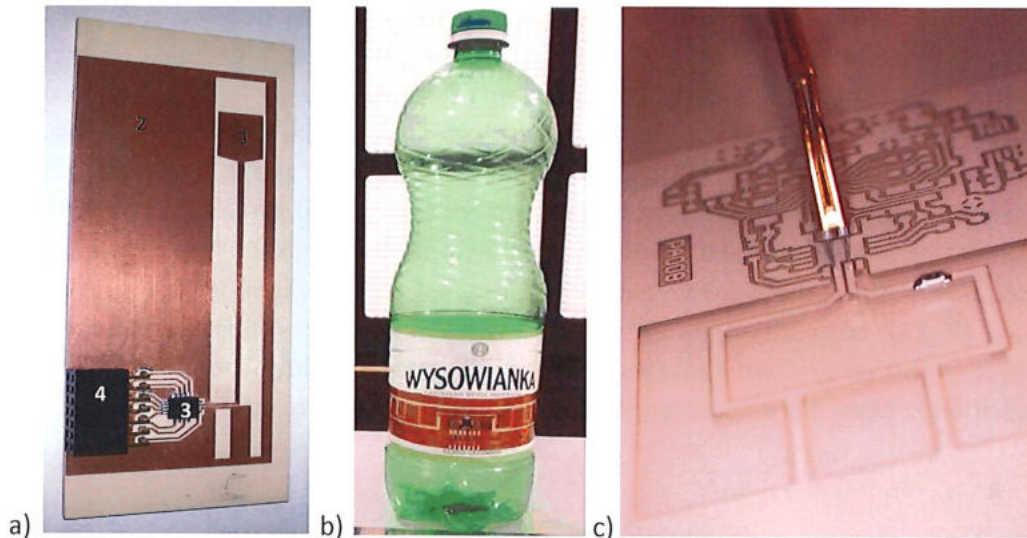
W klasycznych identyfikatorach pasywnych (Rys. 7.a) stosuje się kilka podstawowych metod pozwalających na opracowanie konstrukcji anten o dużej reaktancji [25]. Niestety nie sprawdzają się one w przypadku identyfikatorów półpasywnych (np. układu IDS/AMS SL900A) z wyprowadzeniem  $V_{OUT}$ , w których antena i chip są umieszczone na wspólnej masie w celu ułatwienia implementacji funkcji zasilania z dodatkowego źródła (Rys. 7.b). Dlatego też w tej sytuacji konieczne jest wykorzystanie symetrycznych lub niesymetrycznych anten z otwartymi ramionami, w których dopasowanie jest realizowane poprzez użycie struktur mikropaskowych lub biernych komponentów SMD (np. kondensatorów blokujących składową stałą prądu) co wpływa na docelowy kształt anteny. Powyższe wymagania stoją w sprzeczności z potrzebą minimalizacji rozmiarów identyfikatora.



**Rys. 7.** Dołączanie anteny do chipu pasma UHF: a) konstrukcja pasywna; b) konstrukcja półpasywna z układem pozyskiwania energii; GND – masa chipu, AGND – masa anteny

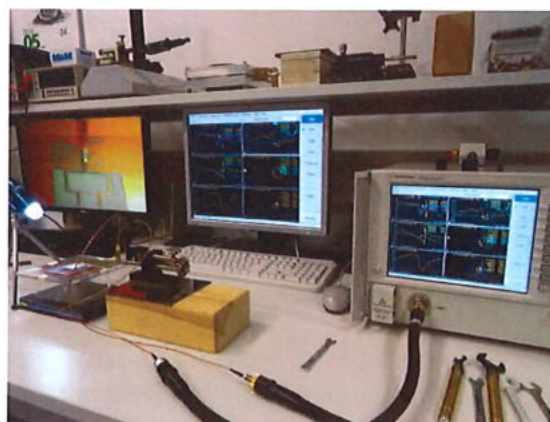
W publikacjach [P\_1], [P\_7] i [P\_9] habilitant zaprezentował konstrukcje anten przeznaczone do współpracy z chipem IDS/AMS SL900A w paśmie UHF. Antena PCB [P\_9] (Rys. 8.a) została zaprojektowana pod kątem wykorzystania w autonomicznym czujniku RFID,

w projekcie finansowanym przez NCBR w ramach Programu Badań Stosowanych (NCBR PBS1/A3/3/2012), którego habilitant był kierownikiem. Antenę [P\_7] (Rys. 8.b) wykonano w technologii druku strumieniowego materiałów funkcjonalnych. Warstwy przewodzące z tuszu Harima NPS-J nanoszono na podłoże DuPont Kapton HN-500. Obie anteny zostały wykonane w Laboratorium HYBRID przy użyciu specjalistycznej aparatury technologicznej, w tym między innymi precyzyjnego plotera obwodów drukowanych CNC LPKF ProtoMat S100 i rozwojowej drukarki strumieniowej PixDro LP50 (Rys. 6.b).



**Rys. 8.** Anteny UHF dedykowane do pracy z chipem IDS/AMS SL900A: a) antena PCB: 1 – radiator, 2 – masa, 3 – chip, 4 – złącze; b) identyfikator na podłożu elastycznym, umieszczony na znakowanym obiekcie; c) antena na podłożu szklanym w trakcie pomiarów parametrów impedancyjnych

Antena na podłożu szklanym [P\_1] (Rys. 8.c) została zaprojektowana pod kątem implementacji w rzeczywistym systemie (z przeznaczeniem do użytkowania w pobliżu obiektów metalowych) rozwijanym na zamówienie przedsiębiorcy (projekt NCBR POIR.01.01.01-00-0407/16, umowa na badania przemysłowe RE-U-17311 z firmą Aluron), którego habilitant był jednym z głównych wykonawców. Została ona wykonana na liniach technologicznych firmy ML System w ramach współpracy w realizacji badań. Warstwy przewodzące nadrukowano przy użyciu sitodruku srebrną pastą Johnson Matthey AG1616-77 stosowaną w procesie wytwarzania laminowanych pakietów paneli fotowoltaicznych.

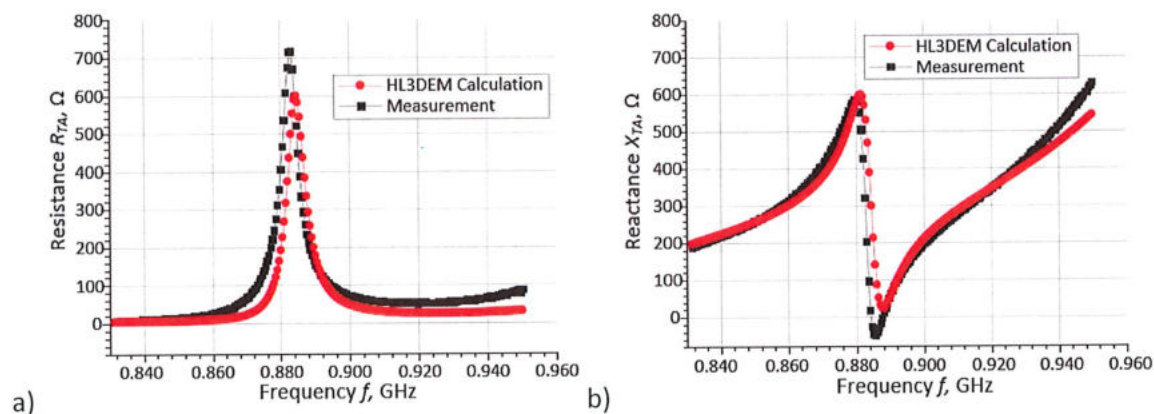


**Rys. 9.** Stanowisko do wyznaczania parametrów impedancyjnych.



Projekty układów antenowych zostały przygotowane w programie Mentor Graphics HyperLynx 3D EM (HL3DEM). Do obliczeń przyjęto wyznaczone w warunkach laboratoryjnych parametry podłoży (grubość, przenikalność dielektryczną, tangens kąta stratności), warstw przewodzących (grubość, rezystancję) oraz założonego wzoru zwojów (liczbę pętli, długość boku, odległość między zwojami, szerokość ścieżki). Impedancję wyznaczono na podstawie parametrów S zmierzonych przy użyciu dwuportowego, wektorowego analizatora obwodów (VNA Agilent PNA-X N5242A) dostępnego w Laboratorium RFID (Rys. 9).

Wyznacznikiem poprawności funkcjonowania wytworzonych anten była zgodność zmierzonych i obliczonych wartości impedancji (Rys. 10, Tab. 3, Rys. 11), która powinna być sprzężona z obwodami wejściowymi chipu [P\_5, P\_11].

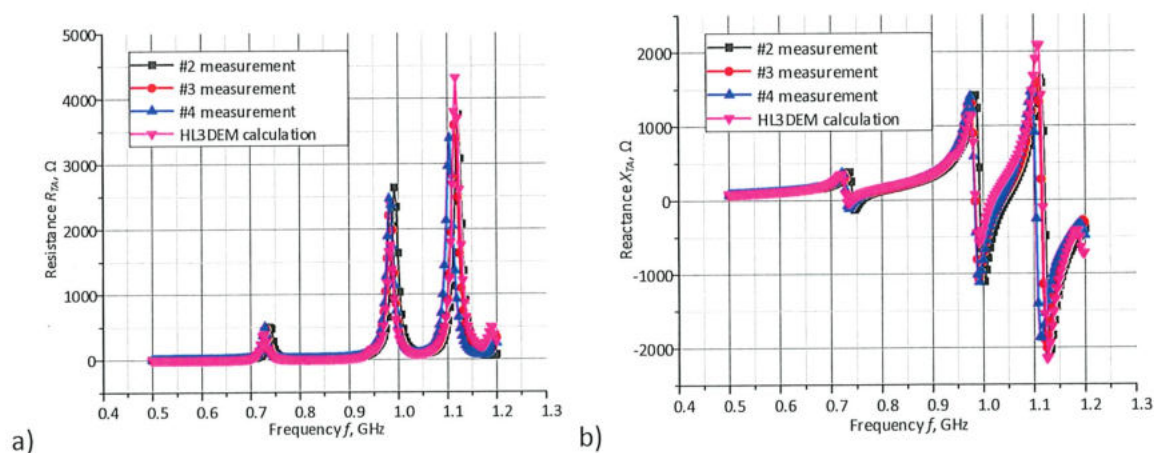


Rys. 10. Impedancja anteny PCB, dedykowanej do pracy w paśmie UHF [P\_9]: a) część rzeczywista, b) część urojona

Tab. 3. Impedancja drukowanej anteny elastycznej dedykowanej do pracy w paśmie UHF [P\_7]

	Model 1	Model 2	S.#1	S.#2	S.#3	S.#4	S.#5	S.#6	S.#7
Re(Z), $\Omega$	37	51	129	130	114	113	115	110	107
Im(Z), $\Omega$	336	479	433	455	440	447	447	431	449

Model 1 – umieszczenie anteny w wolnej przestrzeni  
 Model 2 – umieszczenie anteny na zakrzywionej powierzchni butelki PET



Rys. 11. Impedancja drukowanej anteny na podłożu szklanym dedykowanej do pracy w paśmie UHF [P\_1]: a) część rzeczywista, b) część urojona



W odniesieniu do anteny na podłożu PCB i szklanym stwierdzono dużą zbieżność wyników symulacji z pomiarami na stanowisku badawczym. Dlatego też należy uznać, że wytwarzanie obwodów antenowych na szkle w procesie sitodruku lub w standardowej technologii PCB pozwala na dokładne odwzorowanie opracowanych modeli i uzyskanie kolejnych układów testowych o powtarzalnych parametrach, przy typowych niedokładnościach procesu produkcyjnego. W odniesieniu do anten elastycznych zbieżność wyników jest nieco gorsza, niemniej jednak podobna dla kolejnych próbek testowych, co świadczy o powtarzalności procesu technologicznego. Zwiększona wartość zarówno rezystancji jak i reaktancji w odniesieniu do obliczeń modelowych, wynika ze stwierdzonych defektów w wydrukach ścieżek oraz niedokładności odwzorowania zaprojektowanego wzoru. Należy jednak zaznaczyć, że druk strumieniowy (technologia ink-jet) jest najslabiej poznaną metodą wytwarzania obwodów antenowych, pomimo wielu zalet predysponujących go do zastosowania w wielkoseryjnym znakowaniu produktów [26].

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 1] polegał na:** specyfikacji uwarunkowań układowych i technologicznych wykonania anten półpasywnych identyfikatorów RFID przeznaczonych do integracji z panelami PV; ewaluacji modelowych rozwiązań konstrukcyjnych i ich charakterystyce pod względem funkcjonalnym; przygotowaniu procesu technologicznego i ewaluacji kolejnych wersji testowych; nadzorowaniu prac projektowych; częściowym opracowaniu i testowaniu poprawności działania prezentowanych implementacji układowych; opracowaniu manuskryptu i koordynacji jego procesu wydawniczego. Procentowy udział habilitanta: 40%.

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 7] polegał na:** przeprowadzeniu analizy problemów występujących przy wytwarzaniu obwodów elektrycznych w technologii ink-jet; przygotowaniu materiałów i urządzeń niezbędnych do wykonania eksperymentów technologicznych; zdefiniowaniu wpływu parametrów materiałowych oraz dokładności procesów technologicznych na stopień odwzorowania modeli projektowych; opracowaniu części manuskryptu. Procentowy udział habilitanta: 15%.

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 9] polegał na:** ewaluacji przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych anteny półpasywnego identyfikatora RFID z układem pozyskiwania energii; zdefiniowaniu wpływu parametrów technologii wykonywania struktur elektronicznych na poprawność procesu modelowania układów antenowych; przygotowaniu i walidacji procesu technologicznego w Laboratorium HYBRID; zredagowaniu treści manuskryptu i opracowaniu opisu dotyczącego technologicznych aspektów pracy. Procentowy udział habilitanta: 25%.

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 10] polegał na:** ewaluacji opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych anten wykonywanych na podłożu elastycznym; zdefiniowaniu wpływu parametrów procesu druku strumieniowego na stopień odwzorowania modeli projektowych; przygotowaniu i walidacji procesów technologicznych przeprowadzanych w Laboratorium HYBRID; zredagowaniu treści manuskryptu i opracowaniu opisu dotyczącego technologicznych aspektów pracy. Procentowy udział habilitanta: 30%.

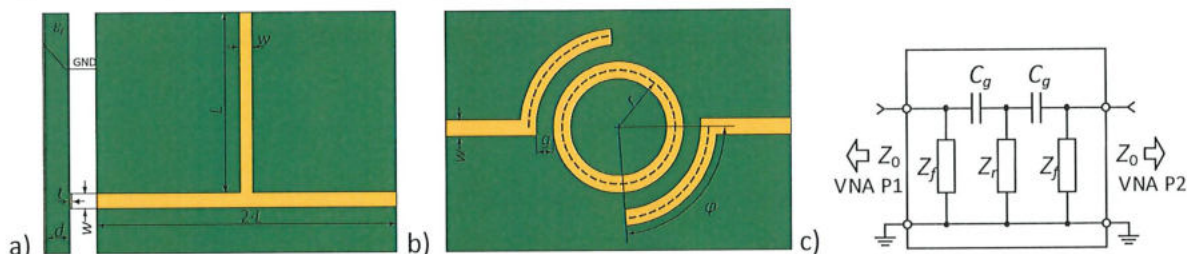
**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 13] polegał na:** implementacji chipu RFID z układem pozyskiwania energii w modelowych układach testowych wykorzystywanych na stanowisku badawczym; ewaluacji zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych identyfikatora-czujnika RFID oraz skorelowaniu założeń projektowych i parametrów wykonanych modułów testowych z uwzględnieniem specyfiki procesów technologicznych dostępnych w Laboratorium HYBRID; zredagowaniu treści manuskryptu i opracowaniu opisu dotyczącego technicznych aspektów przygotowania eksperymentu. Procentowy udział habilitanta: 25%.



#### 4.7. Wyznaczanie parametrów materiałowych [P\_8]

Przy projektowaniu anten identyfikatorów RFID należy również zwrócić uwagę na własności materiałów stosowanych zarówno w ich konstrukcji, jak i w strukturze znakowanego obiektu [P\_8]. Niestety pojawia się tutaj problem dostępu do informacji o podstawowych parametrach materiałów np. podłoży (w tym głównie przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$  oraz tangensa kąta stratności  $\text{tg}\delta$ ). W notach katalogowych producentów najczęściej podawane są wartości parametrów jako stałe dla określonego przedziału częstotliwości lub dla kilku wybranych częstotliwości (i zwykle są one wyznaczone dla częstotliwości podstawowej i jej harmonicznych, co jeszcze bardziej zwiększa niedokładność wyznaczenia wartości parametru odczytywanego poprzez aproksymację pomiarów dla przyjętych punktów), wskazanych według potrzeb największej grupy potencjalnych odbiorców przemysłowych. Należy przy tym zaznaczyć, że ten sam skład materiałowy, podobna lub nawet zbieżna nazwa nie zawsze oznaczają wyrób o tych samych własnościach. Na przykład przenikalność dielektryczna dla materiału FR4 nie dość, że zmienia się wraz ze wzrostem częstotliwości i procentową zawartością żywicy, to również zależy od układu włókien szklanych [27].

Do wyznaczenia parametrów dielektrycznych materiałów można wykorzystać procedury IPC-TM-650 – Test Method Manual, Section 2.5 – Electrical Test Methods [28] zaproponowane przez IPC (Association Connecting Electronics Industries). Są one dedykowane do określonych pasm częstotliwości i wymagają stosowania specjalnych stanowisk badawczych, które rzadko są na wyposażeniu laboratoriów. Projektanci urządzeń RF natomiast częściej dysponują drogą, lecz uniwersalną aparaturą pomiarową (np. dwuportowym wektorowym analizatorem obwodów) oraz stosownym oprogramowaniem narzędziowym. W takim przypadku opierając się na doświadczeniu i teoretycznych podstawach działania rezonatorów mikrofalowych można uzyskać dokładniejsze wyniki wyznaczania parametrów dielektrycznych.



Rys. 12. Model rezonatora mikropaskowego: a) rezonator typu T; b) zmodyfikowany rezonator pierścieniowy; c) impedancja wypadkowa zmodyfikowanego rezonatora pierścieniowego

Dlatego też na potrzeby prowadzenia prac badawczych w zakresie projektowania identyfikatorów RFID konieczne było przygotowanie własnych procedur pozyskiwania dokładnych informacji o własnościach podłoży wykorzystywanych w Laboratorium HYBRID, którego habilitant jest opiekunem. W publikacji [P\_8] habilitant przedstawił problematykę związaną z wyznaczeniem parametrów dielektrycznych dla dowolnej częstotliwości w paśmie UHF (w przedziale od 300 MHz do 3 GHz). W badaniach wykorzystano rezonator typu T oraz zmodyfikowaną wersję rezonatora pierścieniowego (Rys. 12). Projekty konstrukcji dla poszczególnych częstotliwości roboczych opracowano tak, aby ich impedancja, opisana zależnością (2), odpowiadała wartości  $50 \Omega$  (impedancji wejściowej portów analizatora VNA). W tym celu habilitant przygotował odpowiednie procedury obliczeniowe oparte na

zależnościach otrzymanych z analizy linii mikropaskowych składających się na poszczególne rezonatory [P\_8, 29].

Przy założeniu  $w > d$ , przyjętym w pracach eksperymentalnych (procedury obliczeniowe dostosowano również dla przypadków gdzie  $w < d$  lub  $w = d$ ), impedancję wejściową zaprojektowanych konstrukcji można przedstawić w postaci:

$$Z_f = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_e} \cdot \left( 1.393 + \frac{w_e}{d} + \frac{2}{3} \ln \left( \frac{w_e}{d} + 1.444 \right) \right)} \quad (2)$$

gdzie efektywna stała dielektryczna została zdefiniowana jako:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \left( 1 + 12 \cdot \frac{d}{w_e} \right)^{-0.5} \quad (3)$$

efektywna szerokość struktury mikropaskowej jako:

$$w_e = w + \frac{t}{\pi} \left( 1 + \ln \left( \frac{2 \cdot d}{t} \right) \right) \quad (4)$$

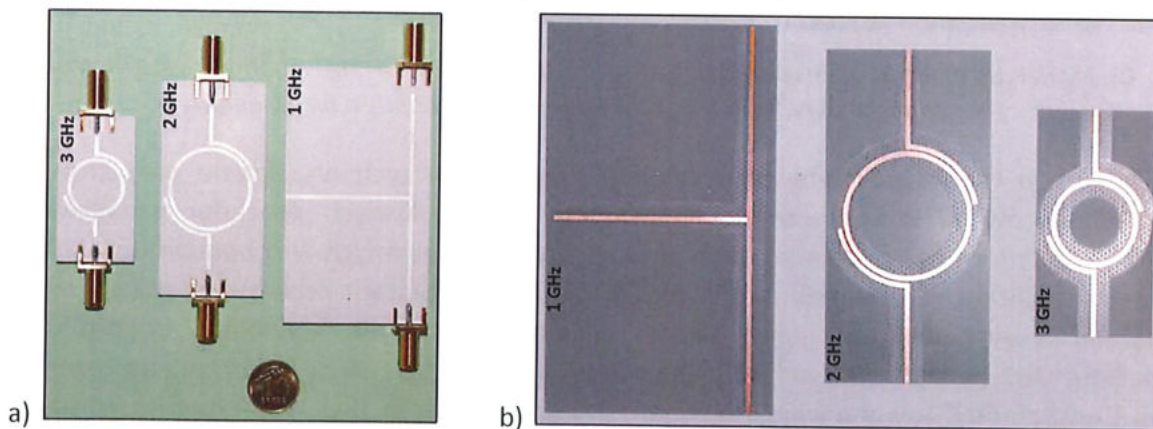
a pozostałe wielkości zostały opisane na modelowych rysunkach 12.a i 12.b. Podstawowa częstotliwość rezonansowa struktury jest zależna od długości elementu strojenowego  $L$  (w przypadku rezonatora T) lub promienia pętli wewnętrznej  $r$  (dla rezonatora pierścieniowego) zgodnie z zależnościami:

$$L = \frac{nc}{4f_0\sqrt{\varepsilon_e}}, \quad r = \frac{c}{2\pi f_0\sqrt{\varepsilon_e}} \quad (5)$$

W przypadku rezonatora pierścieniowego należy jeszcze określić kąt opisujący długość odcinka sprzężenia pomiędzy głównym pierścieniem a ścieżkami zasilającymi:

$$\varphi = \frac{\lambda}{4r}, \text{ rad} \quad (6)$$

i impedancję wypadkową wszystkich komponentów (Rys. 12.c).

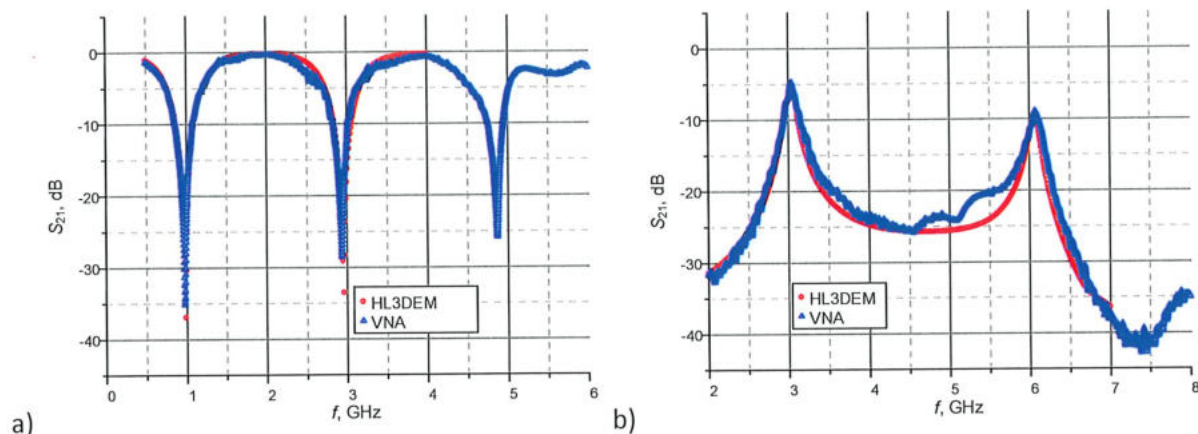


Rys. 13. Rezonatory testowe: a) na podłożu PCB; b) na podłożu LTCC

Na podstawie zależności (2)-(6) oraz wykonanych rezonatorów (Rys. 13) zostały wyznaczone parametry dielektryczne podłoży używanych w projektach badawczych



prowadzonych w KSEiT, w tym przebadano materiały dedykowane dla obwodów drukowanych PCB, ink-jet oraz ceramicznych LTCC. Uzyskane wyniki zostały zweryfikowane na podstawie obliczeń numerycznych w środowisku Mentor Graphics HyperLynx 3D EM (HL3DEM) (Rys. 14).



Rys. 14. Przykładowe wyniki potwierdzające słuszność opracowanej metody: a) rezonator typu T, podłoże LTCC FERRO A6-5,  $f_0 = 1$  GHz; b) zmodyfikowany rezonator pierścieniowy, podłoże ISOLA FR408,  $f_0 = 3$  GHz

Wkład habilitanta w powstanie pracy [P\_8] polegał na: opracowaniu koncepcji wykonania modeli rezonatorów w technologii PCB oraz LTCC, w aspekcie możliwości wytwórczych Laboratorium HYBRID; wstępnej identyfikacji parametrów materiałowych z uwzględnieniem wpływu procesów technologicznych planowanych do wykorzystania; przeprowadzeniu badań eksperymentalnych rezonatorów testowych i weryfikacji otrzymanych wyników pomiarów; opracowaniu części manuskryptu; korekcie kolejnych wersji manuskryptu w procesie wydawniczym. Procentowy udział habilitanta: 30%.

#### 4.8. Wyznaczanie parametrów chipów RFID [P\_11]

Habilitant śledząc literaturę, zarówno naukowo-badawczą jak i techniczną udostępnianą przez producentów, zwrócił uwagę na wiele braków i nieścisłości w definicji i wyznaczaniu parametrów urządzeń techniki RFID. Spostrzeżenie to odnosi się w szczególności do rozwiązań dedykowanych dla pasma UHF, uzupełnianych o dodatkowe funkcje, które mogłyby być wykorzystane w pracach nad autonomicznymi czujnikami RFID. Wynika to z faktu, że niektóre zjawiska występujące w tego typu układach radiowych muszą być rozważane inaczej, niż jest to przyjęte w klasycznej teorii anten [P\_11, P\_12], w przeciwnym wypadku dochodzi do zafałszowania pomiarów. Dlatego też konieczne było, aby warsztat badawczy habilitanta został uzupełniony o możliwość samodzielnego pozyskiwania danych potrzebnych do przeprowadzenia skutecznej syntezy komponentów systemów automatycznej identyfikacji obiektów. W szczególności w publikacji [P\_11] zwrócił on uwagę na wyznaczanie impedancji chipów RFID i zaprezentował nietypowe stanowisko pomiarowe do wyznaczania impedancji  $Z_{TC}$  i czułości chipu  $P_{Tmin}$ , razem z omówieniem zasad stanowiących podstawy działania systemów RFID [30, 31].

Problemem w tym przypadku jest to, że parametr  $Z_{TC}$  wyrażony liczbą zespoloną:

$$Z_{TC} = R_{TC} + jX_{TC} = R_{TC} + \frac{1}{j\omega C_{TC}} \quad (7)$$

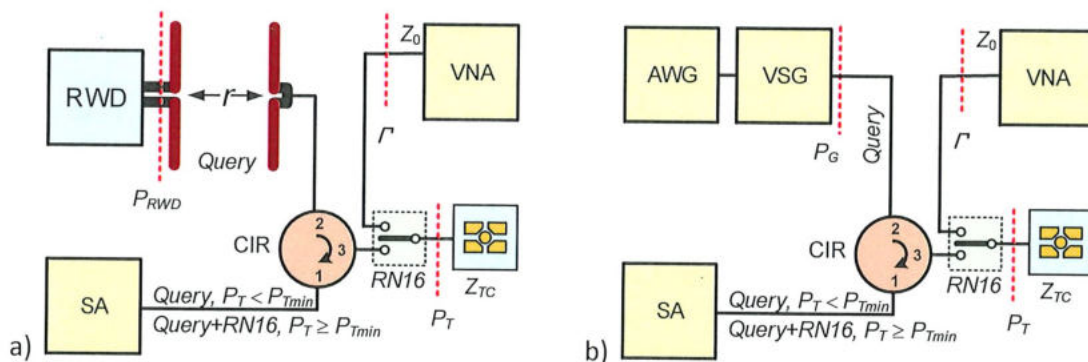


ulega zmianie wraz z wahaniami poziomu mocy  $P_T$ , która jest pozyskiwana z niestabilnego pola elektromagnetycznego w obwodach wejściowych chipu [32]. Tak więc jest ona zależna od lokalizacji i orientacji identyfikatora w odniesieniu do anteny RWD lub ustawień parametrów protokołu komunikacyjnego (np. ISO/IEC18000-63). Dodatkowo, obciążenie układu zasilania generowane przez system cyfrowy BL, nie jest stałe, gdyż zależy od aktualnie realizowanej funkcji w procesie komunikacji (tj. zapis, odczyt pamięci danych). W przypadku czujników RFID bieżąca praca bloku akwizycji danych (tj. wykonanie pomiaru, aktywacja interfejsu szeregowego), także w istotny sposób wpływa na bilans energetyczny układu elektronicznego. Z kolei dokładność wyznaczenia parametru  $P_T$  jest uzależniona od dopasowania impedancyjnego w torze pomiarowym stanowiska badawczego.

Tak więc do wskazania wartości czułości chipu, niezbędnej do wyznaczenia jego impedancji habilitant musiał zastosować specjalne procedury testowe. W publikacji [P\_11] zaproponował on dwie metody (Rys. 15) oparte na poszukiwaniu mocy minimalnej  $P_{Tmin}$ , przy której identyfikator reaguje na wywołanie *Query* (rozkaz inwentaryzacji w protokole komunikacyjnym) pochodzące z czytnika/programatora, wysyłając zwrótnie ciąg *RN16* (16b *Random or Pseudo-Random Number*). Odpowiedź ta jest generowana wyłącznie wtedy, gdy zostaną spełnione warunki energetyczne zasilania chipu, czyli  $P_T \geq P_{Tmin}$ . Dzięki zastosowaniu cyrkulatora ferrytowego (CIR) istnieje możliwość dołączenia wektorowego analizatora obwodów pozwalającego na obserwację przesyłanych sygnałów i przede wszystkim na wyznaczenie rzeczywistej mocy  $P_{Tmin}$  (zakładając, że straty przewodów pomiarowych są znane). Przy określaniu wartości mocy należy jeszcze uwzględnić niedopasowanie impedancyjne chipu ( $Z_{TC}$ ) oraz  $50 \Omega$  toru pomiarowego ( $Z_0$ ):

$$P_{Tmin} = P_{min}(1 - |\Gamma|^2) \quad (8)$$

gdzie  $\Gamma$  oznacza współczynnik odbicia, zmierzony za pomocą wektorowego analizatora obwodów, przy mocy wyjściowej  $P_{Tmin}$  i płaszczyźnie wrót wejściowych przesuniętej do punktu dołączenia do chipu i jego anteny [33].



Rys. 15. Metody wyznaczania parametrów chipu: a) użycie czytnika/programatora RWD; b) użycie generatorów sygnałowych; SA – analizator sygnałów; VNA – wektorowy analizator obwodów; AWG – generator sygnałów arbitralnych; VSG – generator sygnałów wektorowych; CIR – cyrkulator

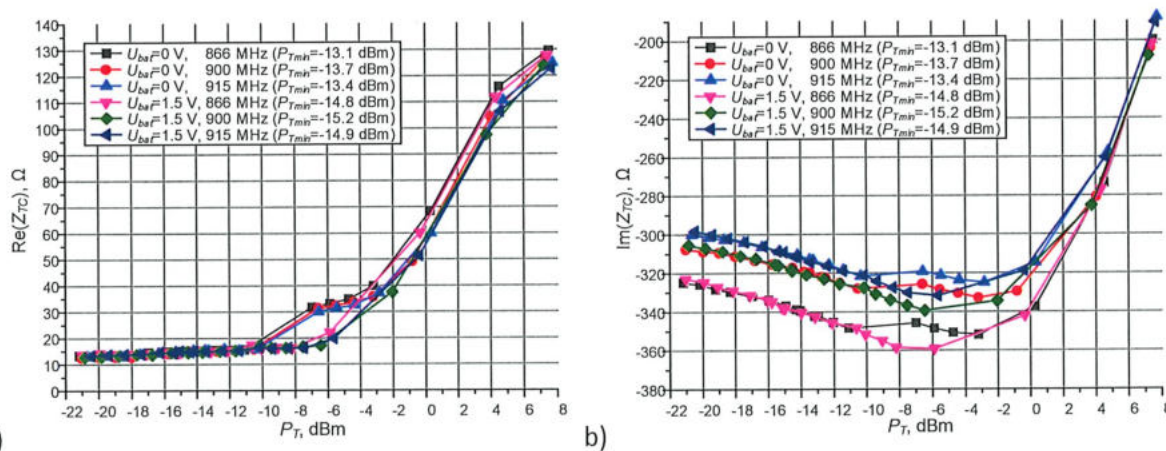
Główna różnica pomiędzy opracowanymi metodami (Rys. 15.a i Rys. 15.b) wynika ze sposobu symulacji pracy rzeczywistego łącza komunikacyjnego. W przypadku wykorzystania czytnika/programatora dalekiego zasięgu (z możliwością ingerencji w protokół komunikacyjny i regulacji mocy wyjściowej  $P_{RWD}$ ) odzwierciedlane są rzeczywiste warunki pracy systemu RFID. Takie zestawienie stanowiska laboratoryjnego jest szczególnie przydatne przy prowadzeniu badań rozwojowych nad rzeczywistymi rozwiązaniami użytkowymi, gdyż



pozwała na testowanie docelowych ustawień toru komunikacyjnego (np. mocy wyjściowej  $P_{RWD}$  urządzenia RWD) lub wpływu zakłóceń środowiskowych (np. bliskości przedmiotów metalowych, przeszkód wpływających na tłumienie pola elektromagnetycznego). W drugiej propozycji tor komunikacyjny jest zasymulowany przy użyciu dwóch generatorów sygnałowych: wektorowego oraz przebiegów dowolnych. Wzór ramki transmisyjnej jest budowany przy użyciu procedur programowych przygotowanych w środowisku Mathcad, zgodnie z protokołami opisanymi w odpowiednich standardach, dzięki czemu może być poddawany dowolnym modyfikacjom. Można również dokładnie wyznaczyć poziom mocy  $P_G$  wyjściowej dla nośnej uzyskiwanej z generatora wektorowego, która jest doprowadzana przewodowo do wejścia badanego chipu RFID, czyli wpływ warunków środowiskowych jest pomijany. Istotną wadą tej metody jest bardzo duży koszt aparatury służącej do zasymulowania działania urządzenia RWD.

Tab. 4. Przykładowe wyniki pomiaru czułości chipu

$f_0$ , MHz	$P_{Tmin}$ , dBm					
	SL3S1001FFT / TSSOP8 Tryb pasywny		SL900A / QFN16 Tryb pasywny		SL900A / QFN16 Tryb półpasywny	
	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 1	Metoda 2	Metoda 1	Metoda 2
866	-15,0	-14,8	-13,1	-13,1	-14,8	-14,8
900	-15,0	-15,0	-13,7	-13,6	-15,2	-15,1
915	-14,5	-14,4	-13,4	-13,4	-14,9	-15,0



Rys. 16. Przykładowe wyniki badań: a) część rzeczywista impedancji chipu  $Z_{TC}$ ; b) część urojona impedancji chipu  $Z_{TC}$ ;  $P_T$  – moc przekazywana do chipu;  $P_{Tmin}$  – czułość chipu

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych habilitant dokonał weryfikacji zaproponowanych procedur oraz wskazał ich znaczenie dla określenia obszaru IZ. Uzyskane wyniki pomiarów czułości chipu (Tab. 4) i impedancji wejściowej (Rys. 16) są zbieżne dla obu metod oraz są zbliżone do wartości podawanych w notach katalogowych. Należy zauważyć, że na wymienione parametry ma wpływ bardzo wiele różnorodnych czynników (tj. częstotliwość pracy, parametry protokołu, tryb pracy chipu, realizowane funkcje dodatkowe, obudowa), co z reguły nie jest przedstawiane w katalogach, a musi być uwzględniane w syntezie urządzeń techniki RFID, a w szczególności przy określaniu obszaru IZ.



Z zaprezentowanych rezultatów pomiaru impedancji wynika jeszcze jeden bardzo ważny wniosek do wykorzystania w przedmiotowym osiągnięciu habilitanta, że na wartości części rzeczywistej i urojonej notowanej przy mocy  $P_{Tmin}$  nie wpływa zastosowanie zasilania bateryjnego. Dlatego też można stosować te same konstrukcje anten zarówno dla pasywnego jak i półpasywnego trybu pracy chipu.

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P\_11] polegał na:** dostosowaniu pasywnych i półpasywnych chipów RFID pasma UHF do warunków pomiarowych stanowiska badawczego w celu umożliwienia wykonania testów i sprawdzenia koncepcji wyznaczania parametrów niezbędnych do przeprowadzenia syntezy obszaru poprawnej pracy; ewaluacji próbek testowych wykonanych w Laboratorium HYBRID; skorelowaniu parametrów technologicznych i funkcjonalnych z założeniami projektowymi; opracowaniu opisu dotyczącego technicznych aspektów przygotowania eksperymentu; przeprowadzeniu korekty kolejnych wersji manuskryptu. Procentowy udział habilitanta: 30%.

#### 4.9. Wyznaczanie parametrów anten RFID [P\_4, P\_12, P\_5]

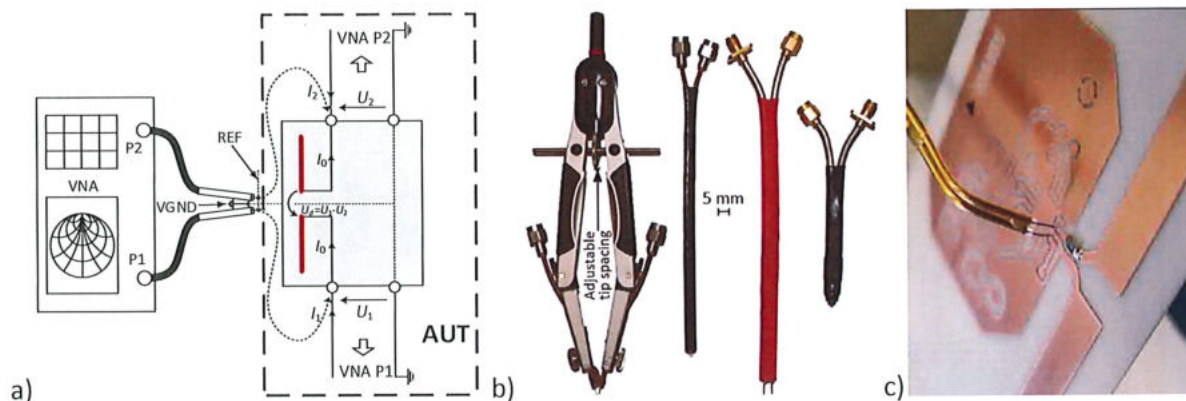
Precyzyjne wyznaczanie parametrów anten jest kluczowym zadaniem zarówno przy weryfikacji procesu projektowania skutecznie działających identyfikatorów RFID, jak również przy określaniu obszaru poprawnej pracy IZ. Problem komplikuje fakt, że nie istnieje uniwersalny wzór obwodu antenowego, który mógłby być zaimplementowany w każdej sytuacji. Właściwie wszystkie elementy systemu RFID muszą być zaprojektowane indywidualnie, stosowanie do przyjętych założeń i przewidywanych warunków środowiskowych. W publikacjach [P\_4] i [P\_12] habilitant przedstawił, w sposób usystematyzowany, problematykę pomiaru impedancji komponentów urządzeń techniki RFID. Między innymi scharakteryzował istotę funkcjonowania identyfikatorów pracujących w różnych pasmach częstotliwości (LF, HF, UHF), zaproponował pośrednią metodę wyznaczania tego parametru oraz zaprezentował i poddał analizie wyniki badań. Najważniejszą cechą charakterystyczną dla anten identyfikatorów RFID jest to, że ich impedancja jest wyrażona liczbą zespoloną  $Z_{TA}$  [P\_11], a nie wartością rzeczywistą  $50 \Omega$  ( $75 \Omega$ ) jak to mam miejsce w klasycznych systemach radiowych. Proces projektowania jest utrudniony zależnością tego parametru od warunków środowiskowych (np. rodzaju materiału, z którego jest wytworzony znakowany obiekt).

Wartość impedancji  $Z_{TA}$  w paśmie LF można łatwo wyznaczyć przy użyciu typowego mostka RLC. W pozostałych przypadkach stosowano wypracowaną przy udziale habilitanta metodę opartą na wektorowym analizatorze obwodów wyposażonym w dwa niesymetryczne porty ( $50 \Omega$ ) oraz pasywną sondę różnicową PDP (Rys. 17.a). Procedura polegała na pomiarze macierzy rozproszenia i określeniu impedancji różnicowej na podstawie wyprowadzonej zależności [P\_12]:

$$Z_T = 2Z_0 \frac{S_{12}^2 - S_{11}^2 - 2S_{12} + 1}{(1 - S_{11})^2 - S_{12}^2} \quad (9)$$

przy założeniu zachowania symetrii kanałów pomiarowych P1 i P2 analizatora wektorowego obwodów  $S_{11} = S_{22}$ ,  $S_{12} = S_{21}$  oraz  $Z_0 = 50 \Omega$ .



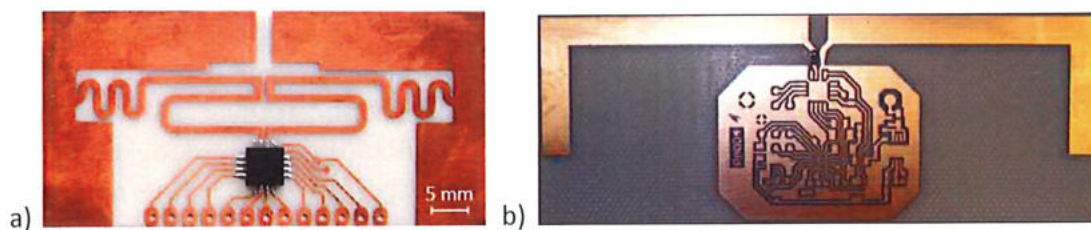


Rys. 17. Wyznaczanie impedancji komponentów urządzeń techniki RFID: a) idea metody; b) sondy pomiarowe; c) dołączenie sondy do AUT

Realizacja testów na stanowisku laboratoryjnym wymagała przygotowywania specjalnych sond różnicowych dostosowanych do różnorodnych kształtów i rozmiarów testowanych komponentów (Rys. 17.b), w szczególności odpowiadających delikatnym polom kontaktowym chipu, gdyż z przyczyn technologicznych oraz wprowadzanych zakłóceń nie można było stosować typowych złączy (np. N, SMA, UFL) (Rys. 17.c).

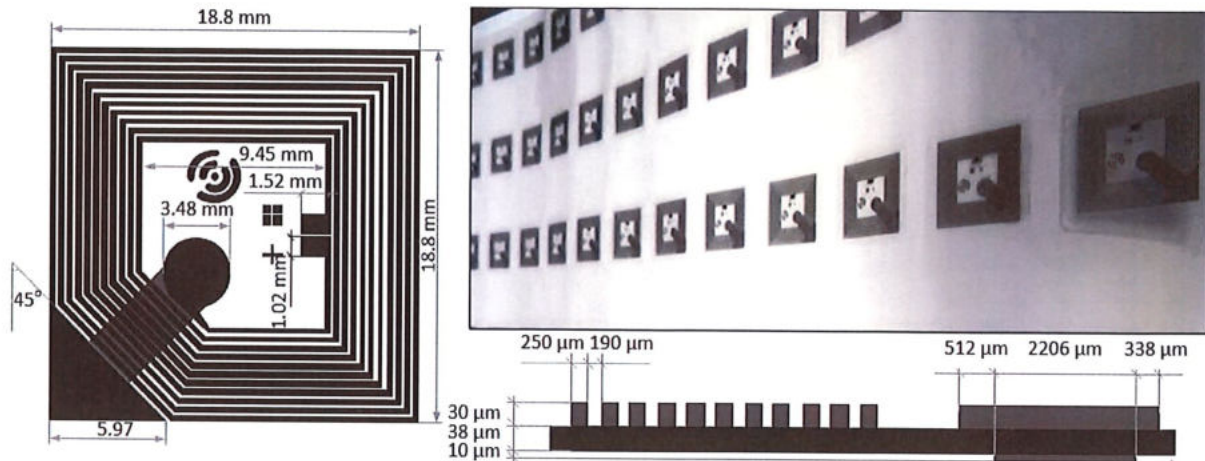
Ewaluacja przedstawionej metody wyznaczania impedancji komponentów urządzeń techniki RFID została przeprowadzona na przykładowych antenach testowych wykonanych w technologii PCB w Laboratorium HYBRID. Pomiary zostały zrealizowane w Laboratorium RFID na stanowisku wyposażonym w dwuportowy analizator wektorowy (VNA Agilent PNA-X N5242A), mikromanipulator, odpowiednie sondy różnicowe i kable testowe oraz komponenty kalibracyjne. Wyniki zostały porównane z obliczeniami numerycznymi otrzymanymi w programie Mentor Graphics HyperLynx 3D EM (HL3DEM) na etapie projektowania obwodów antenowych.

W zakresie pasma UHF testy przeprowadzono dla dwóch użytecznych konstrukcji, które opracowano w ramach projektów NCBR PBS1/A3/3/2012 [P\_12] (Rys. 18.a), którego habilitant był kierownikiem oraz NCBR POIR.01.01.01-00-0407/16 [P\_4] (Rys. 18.b), który realizował jako główny wykonawca. Anteny zostały zaprojektowane pod kątem wykorzystania z pasywnym/półpasywnym chipem IDS/AMS SL900A z uwzględnieniem specyficznych wymagań docelowych aplikacji. Podobne prace wykonano dla anten HF dedykowanych dla chipu NXP NT2H1001, które habilitant badał w projekcie realizowanym we współpracy z firmą Talkin Things Company w (PRz U-17310), (Rys. 19).

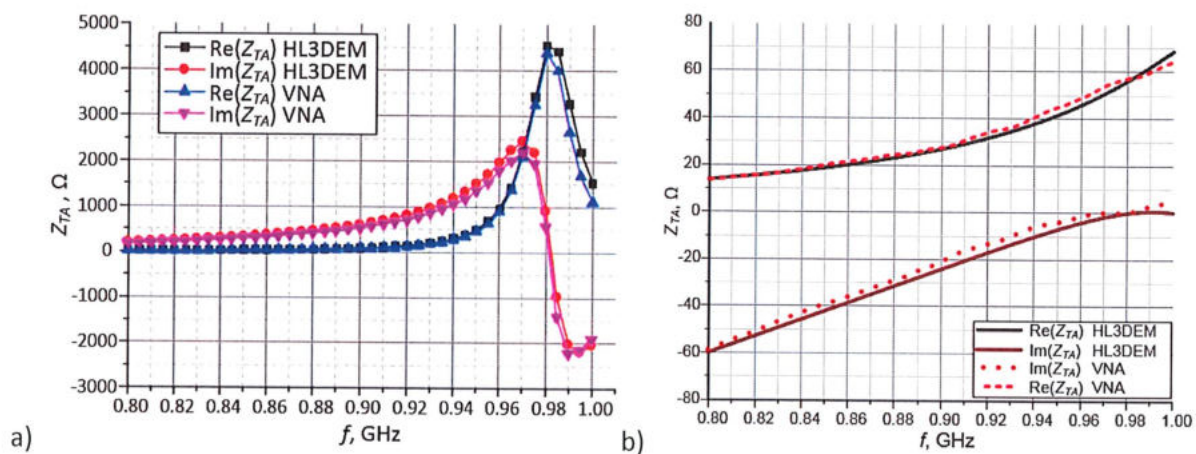


Rys. 18. Anteny testowe pasma UHF: a) projekt NCBR PBS1/A3/3/2012 [P\_12]; b) projekt NCBR POIR.01.01.01-00-0407/16 [P\_4]





Rys. 19. Antena testowa pasma HF – opis parametrów w modelu dla anteny komercyjnej



Rys. 20. Wyniki testów: a) projekt NCBR PBS1/A3/3/2012 [P\_12]; b) projekt NCBR POIR.01.01.01-00-0407/16 [P\_4]

Z punktu widzenia praktycznej użyteczności opracowanych konstrukcji uzyskano zadowalającą zbieżność, niemniej jednak niewielkie różnice są zauważalne na wyznaczonych przebiegach  $Z_{TA} = f(f)$  (Rys. 20). Na podstawie przeprowadzonej analizy danych wejściowych, zwrotnej informacji o dokładności procesu technologicznego oraz weryfikacji obliczeń numerycznych, jako przyczynę rozbieżności można wskazać rozdzielczość frezarki numerycznej CNC, na której został wykonany wzór układu ścieżek. Niestety wpływ na otrzymane wyniki ma również fakt, że parametry materiałowe (przenikalność dielektryczna i tangens kąta stratności) dla podłoża zastały założone jako stałe w dziedzinie częstotliwości, co niestety nie jest zgodne z rzeczywistością i zostało scharakteryzowane w [P\_8].

Charakterystyka promieniowania anteny jest kolejnym istotnym parametrem, na który habilitant zwrócił uwagę przy projektowaniu identyfikatorów RFID dedykowanych do pracy w paśmie UHF [P\_5]. W przypadku typowych konstrukcji używanych w powszechnie znanych systemach radiokomunikacyjnych (DVB-T, GSM, UMTS, LTE, WiFi itp.) stosowane są metody pomiarowe znane z klasycznej teorii anten [34]. Jednak przy rozważaniu identyfikatorów RFID pojawia się problem związany z wcześniej wspomnianą impedancją wyrażaną w postaci zespolonej. Impedancja wejściowa chipu ulega ciągłej zmianie w trakcie jego działania i zależy od parametrów pola elektromagnetycznego w rozpatrywanym punkcie przestrzeni, na które z kolei mają silny wpływ: przede wszystkim odległość od anteny RWD, budowa znakowanego obiektu oraz warunki środowiskowe propagacji fal radiowych.



W literaturze przedmiotu są wprowadzone znane metody wyznaczania charakterystyki promieniowania [35, 36], ale albo wykorzystana jest w nich bardzo zaawansowana i droga aparatura albo proces pomiarowy jest mocno skomplikowany. Dlatego też w publikacji [P\_5] habilitant zaproponował zmodyfikowany sposób pozbawiony wspomnianych wad, w którym procedura pomiarowa oparta została na urządzeniach techniki RFID, standardowym wyposażeniu laboratoriów projektowania układów radiowych i specjalnie przygotowanym oprogramowaniu narzędziowym.

Należy zauważyć, że głównym problemem do rozwiązania jest utrzymanie stałej wartości impedancji wejściowej chipu  $Z_{TC}$  w trakcie realizacji pomiarów diagramów kierunkowych, przy zmianie współrzędnych biegunowych  $\theta$ ,  $\varphi$  ustawienia badanej anteny (AUT). Jedynym punktem, w którym parametr ten jest jednoznacznie zdefiniowany jest granica obszaru poprawnej pracy IZ określana na podstawie minimalnej mocy  $P_{Tmin}$ , niezbędnej do zapewnienia energetycznych i komunikacyjnych warunków działania identyfikatora [P\_11]. Poszukiwanie wartości  $P_{Tmin}$  można oprzeć na zmianie odległości  $r$  pomiędzy antenami (AUT i RWD), co niestety związane jest z koniecznością wykorzystania bardziej skomplikowanego systemu pozycjonowania oraz utrzymania jednakowych warunków środowiskowych w całej przestrzeni pomiarowej. Dlatego też zaproponowano procedurę wyznaczania tego warunku brzegowego poprzez regulację mocy  $P_{RWD}$  dostarczanej do zacisków anteny czytnika-programatora. Została ona dostosowana do posiadanego wyposażenia Laboratorium RFID, w tym przede wszystkim wykorzystano komorę bezchową, cyfrowo sterowane pozycjonery anteny AUT (zmiana kąta  $\theta$ ,  $\varphi$ ) i RWD (zmiana polaryzacji) oraz komercyjnie dostępny czytnik/programator z dołączonym regulowanym tłumikiem sygnału na wyjściu. Do wyznaczenia znormalizowanego diagramu kierunkowego  $F_{Tn}$  wykorzystano zależności:

$$P_{Tmin} = P_{RWDmin} \frac{G_R G_T \lambda^2 \tau \chi}{(4\pi r)^2} \quad (10)$$

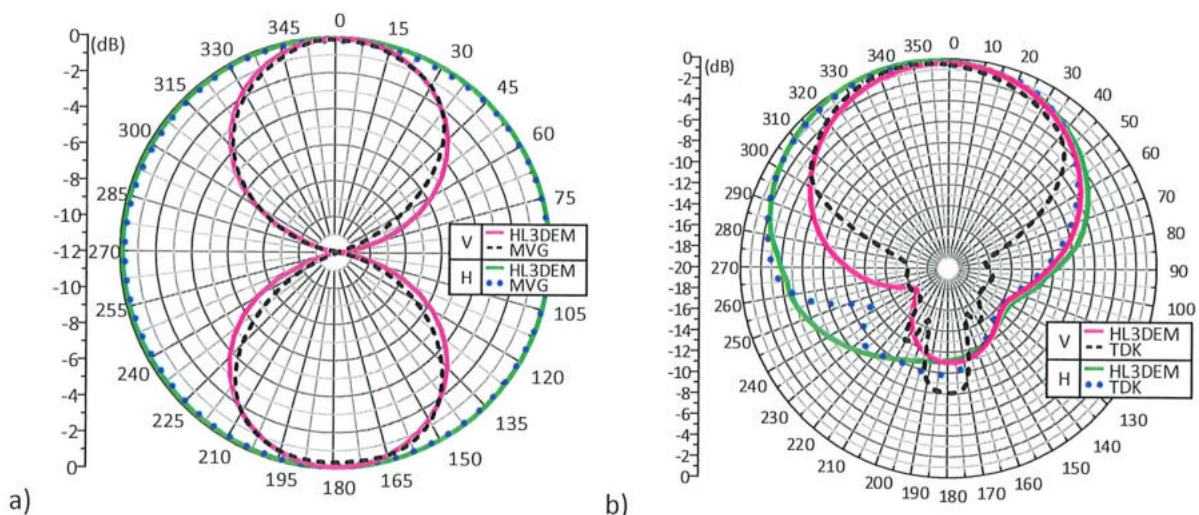
$$F_{TndB}(\theta, \phi) = [P_{RWDdBm}(\theta, \phi)]_{min} - P_{RWDdBm}(\theta, \phi). \quad (11)$$

gdzie  $P_{RWD}$  oznacza moc dostarczaną do zacisków anteny RWD,  $G_R$  – zysk energetyczny anteny RWD,  $P_T$  – moc odbieraną w antenie identyfikatora,  $G_T$  – zysk anteny identyfikatora,  $\chi$  – współczynnik dopasowania polaryzacyjnego anten układu radiokomunikacyjnego,  $\tau$  – współczynnik przenoszenia mocy z anteny identyfikatora do chipu,  $\lambda$  – długość fali,  $r$  – odległość pomiędzy antenami, natomiast  $P_{RWDdBm}$  określa moc mierzoną w dBm.



Rys. 21. Testowane identyfikatory RFID pasma UHF: a) projekt z anteną dookólną, b) projekt z anteną kierunkową





**Rys. 22.** Potwierdzenie słuszności przyjętej koncepcji pomiarowej – porównanie wyników pomiarów z diagramami modelowymi dla polaryzacji V: a) projekt z anteną dookólną, b) projekt z anteną kierunkową

Tak przygotowane stanowisko pozwala na wykonywanie pomiarów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych: w trakcie pomiaru antena może być umieszczona na znakowanym obiekcie, co jest szczególnie istotne w przypadku identyfikatorów RFID. Ponadto, procedura jest przeprowadzana bezkontaktowo i żadne przewody, które mogłyby wpływać na kształt charakterystyki, nie muszą być dołączane do identyfikatora.

Zaproponowaną koncepcję habilitant przetestował na dwóch przykładowych antenach UHF (kierunkowej i dookólnej) zaprojektowanych do współpracy z chipem RFID IDS/AMS SL900A (Rys. 21). Zbieżność wyników z obliczeniami numerycznymi (Rys. 22) potwierdza słuszność zaproponowanej metody, a drobne różnice wynikają z uproszczeń przyjętych na etapie modelowania (nieskończona płaszczyzna warstwy dielektrycznej).

Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 4] polegał na: ewaluacji wykonanych układów antenowych o różnej topologii ścieżek; skorelowaniu założeń projektowych dla anten UHF i HF oraz torów pomiarowych z parametrami procesów technologicznych osiągalnych w Laboratorium HYBRID; walidacji opracowanej procedury wyznaczania parametrów impedancyjnych; wykonaniu analizy otrzymanych wyników; zredagowaniu treści manuskryptu i opracowaniu opisu dotyczącego technicznych aspektów przygotowania eksperymentu. Procentowy udział habilitanta: 40%.

Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 12] polegał na: ewaluacji wykonanych układów antenowych o różnej topologii ścieżek; skorelowaniu założeń projektowych dla wykonywanych komponentów urządzeń techniki RFID i torów pomiarowych, z parametrami procesów technologicznych osiągalnych w Laboratorium HYBRID; walidacji opracowanej procedury; zredagowaniu treści manuskryptu i opracowaniu opisu dotyczącego technicznych aspektów przygotowania eksperymentu. Procentowy udział habilitanta: 30%.

Wkład habilitanta w powstanie publikacji [P 5] polegał na: ewaluacji wykonanych próbek oraz skorelowaniu parametrów technologicznych i funkcjonalnych z założeniami projektowymi; walidacji opracowanej procedury; opracowaniu opisu technicznej części eksperymentu. Procentowy udział habilitanta: 30%.



#### 4.10. Wyznaczanie obszaru poprawnej pracy [P\_13, P\_14]

Trójwymiarowy obszar poprawnej pracy IZ jest najważniejszym parametrem informującym o efektywności rozpoznawania obiektów w zautomatyzowanym systemie identyfikacji opartym na technice RFID [37]. Jest to obszar wokół anteny RWD, w którym są spełnione warunki komunikacyjne i energetyczne niezbędne do poprawnego funkcjonowania chipów RFID umieszczonych na znakowanym produkcie. Powinien on być wyznaczany dla całej aplikacji systemu RFID, co niestety w wielu przypadkach jest niemożliwe ze względu na brak rzetelnej informacji o elementach składowych systemu, podawanej w katalogach producentów, w szczególności w zakresie specyfikacji parametrów identyfikatorów, w tym prawie zawsze w odniesieniu do półpasywnych konstrukcji z funkcjami pomiarowymi. Szczególnie trudno jest symulować i projektować systemy wielokrotne, w których dodatkowo konieczne jest rozważanie wzajemnej interakcji różnie rozlokowanych i zorientowanych anten identyfikatorów. Dlatego też w powszechnej praktyce, do opracowywania nowych implementacji techniki RFID, częściej wykorzystywana jest czasochłonna i niepewna metoda prób i błędów.

Problematykę wyznaczania obszaru IZ habilitant nakreślił w publikacji [P\_13], na przykładzie systemów RFID pracujących w paśmie HF. W analizie wykorzystany jest model czujnika RFID (Rys. 5), na podstawie którego można wyznaczyć wartości napięcia indukowanego na zaciskach obwodu antenowego (zaciskach wejściowych chipu RFID) przy określonym obciążeniu oraz parametrach pola magnetycznego w punkcie umieszczenia identyfikatora. Granice obszaru IZ można wskazać poprzez wyszukanie miejsc, w których minimalna wartość natężenia pola magnetycznego  $H_{min}$  (12), pozwala na poprawne zasilenie chipu RFID i w konsekwencji uzyskanie jego odpowiedzi na wywołanie z czytnika/programatora.

$$H_{min} = \frac{|U_{Tmin}|}{\mu_0} \cdot \left| \frac{\left[ 1 + \left( \frac{1}{R_{TCH}} + \frac{1}{R_{TCR} + R_{TCS}} + j\omega C_T \right) \cdot (j\omega L_{TS} + R_{TS}) \right]}{j\omega \cdot N_T \cdot S_T} \right| \quad (12)$$

gdzie  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m oraz

$$U_T = \frac{j\omega \cdot M \cdot I_R}{1 + \left( \frac{1}{R_{TCH}} + \frac{1}{R_{TCR} + R_{TCS}} + j\omega C_T \right) (j\omega L_{TS} + R_{TS})} \quad (13)$$

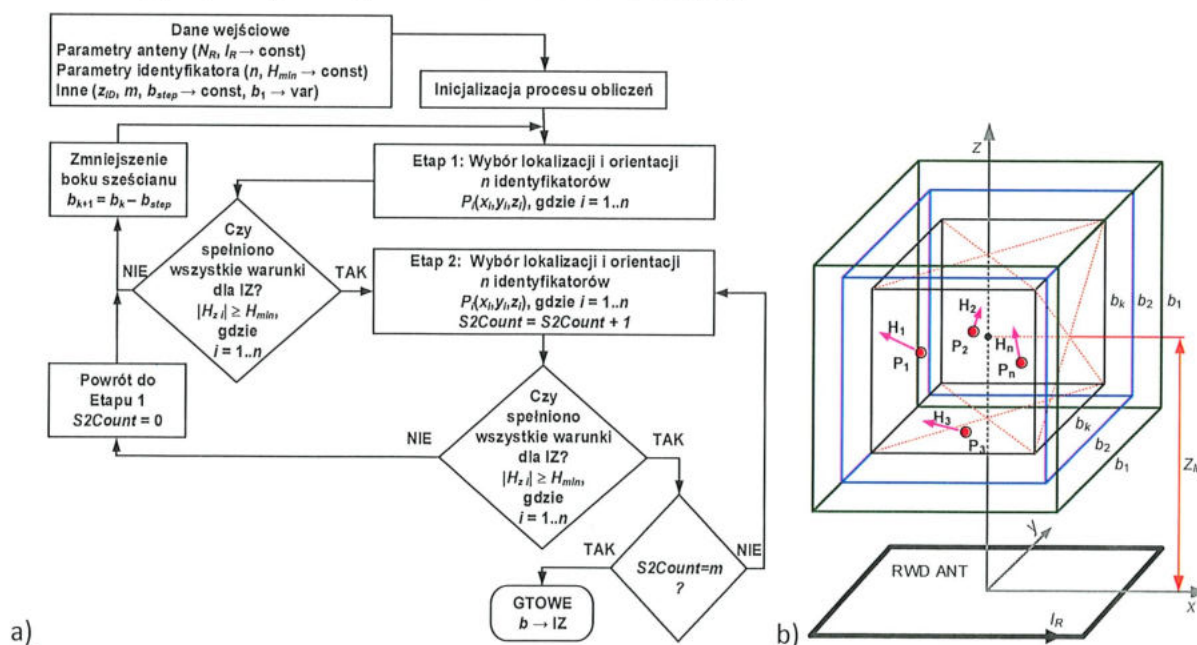
Weryfikację opracowanego modelu habilitant przeprowadził na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku badawczym w Laboratorium RFID. Obszar IZ był wyznaczany poprzez poszukiwanie maksymalnej odległości od anteny RWD ( $Z_{ID}$ , pomiary były realizowane tylko w celach kontrolnych, więc maksymalną odległość poszukiwano w osi układu antenowego), przy której identyfikator odpowiadał na wywołanie z czytnika/programatora (Tab. 5). Rzeczywista wartość minimalna natężenia pola magnetycznego  $H_{min}$  była mierzona przy pomocy analizatora widma R&S FSL18 oraz sondy pola bliskiego HZ-14.

Tab. 5. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów dla identyfikatora pasma HF

$P_{TH}$ , mW	Model; $H_{min}$ , A/m	Pomiar: $H_{min}$ , A/m	$z_{ID}$ , m
0	0,028	0,027	0,6
1	0,120	0,123	0,35
4	0,461	0,462	0,19

W badaniach, habilitant wziął również pod uwagę różne stany obciążenia wyjścia w chipie RFID udostępniającego energię z wewnętrznego układu zasilania. Moc  $P_{TH}$  została wyznaczona na podstawie pomiarów oscyloskopem Tektronix DPO71254B wyposażonym w sondę P7504 CT1. Poprawność uzyskanych wyników pomiaru  $H_{min}$  sprawdzono na podstawie symulacji modelu układu antenowego RWD-identyfikator opracowanego we wcześniejszych badaniach prowadzonych w KSEiT [38].

Przestrzenne rozmieszczenie wielu identyfikatorów w obszarze roboczym (oznaczonym jako  $\Omega_{ID}$ ) danej aplikacji habilitant rozważał w publikacji [P\_14]. Opisywane w literaturze prace badawcze prowadzone w tym zakresie koncentrują się głównie na zwiększaniu odległości pomiędzy środkami anten pojedynczego systemu: czytnik/programator – identyfikator [39]. Natomiast w [P\_14] habilitant przyjął możliwość dowolnej zmiany punktów lokalizacji identyfikatorów  $P_1(x_1; y_1; z_1) \div P_n(x_n; y_n; z_n)$  oraz ich orientacji w trójwymiarowym obszarze  $\Omega_{ID}$ . W związku z tym, że w obszarze IZ występuje silnie niejednorodne pole magnetyczne, chip RFID jest poprawnie zasilony, a tym samym istnieje możliwość wygenerowania odpowiedzi na wywołanie z czytnika/ programatora, gdy w miejscu jego ulokowania jest spełniony warunek  $H_z \geq H_{min}$  ( $H_z$  składowa natężenia pola magnetycznego w osi z prostopadłej do płaszczyzny anteny RWD). W celu wykonania analizy dla każdego z  $n$  identyfikatorów, umieszczonego w losowo dobranych punktach  $P_n(x_n; y_n; z_n)$  obszaru  $\Omega_{ID}$ , wykorzystana jest metoda Monte Carlo [40].



Rys. 23. Procedura wyznaczania trójwymiarowego obszaru poprawnej pracy: a) algorytm; b) model obszaru IZ

Algorytm opracowanej metody jest przedstawiony na rysunku 23.a. Dane wejściowe są wyspecyfikowane na podstawie parametrów posiadanego oprzyrządowania badawczego



dostępnego w Laboratorium RFID. Obszar IZ jest przybliżony w procesie modelowania sześcianem umieszczonym centralnie w stosunku do anteny RWD (Rys. 23.b), w punkcie oddalonym o  $z_{ID}$  od jej centrum (względem środka sześcianu). Przyjęta grupa  $n$  identyfikatorów jest rozmieszczana losowo i są sprawdzane warunki niezbędne do poprawnego zasilenia chipów RFID i uzyskania odpowiedzi na komendę wywołania. Na podstawie otrzymanych wyników wyznaczana jest skuteczności procesu identyfikacji:

$$\eta_{ID} = \frac{l_{ID\_OK}}{n} \cdot 100\% \quad (15)$$

gdzie  $l_{ID\_OK}$  oznacza liczbę rozpoznanych identyfikatorów.

Niestety uzyskanie sprawności  $\eta_{ID} = 100\%$  dla jednego wybranego rozmieszczenia nie gwarantuje efektywnego działania systemu RFID. Dlatego też konieczne wydaje się rozpatrzenie wszystkich pozostałych przypadków rozlokowania  $n$  identyfikatorów, co w praktyce jest niemożliwe, a jedynie przy zastosowaniu prawa wielkich liczb [40] można określić prawdopodobieństwo poprawności wyznaczenia granic obszaru IZ.

**Tab. 6.** Porównanie wyników obliczeń i pomiarów granic obszaru poprawnej pracy

$z_{ID}$ , m	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
<b>Model: <math>b</math>, m</b>	0,30	0,31	0,33	0,30	0,26	0,20	0,14
<b>Pomiary: <math>b</math>, m</b>	0,28	0,30	0,32	0,30	0,25	0,19	0,14

W wyniku przeprowadzonych testów uzyskano dużą zbieżność rozmiarów sześcianu wyznaczonego na podstawie obliczeń numerycznych i pomiarów (Tab. 6).

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P\_13] został przedstawiony w rozdziale 4.6.**

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P\_14] polegał na:** przygotowaniu identyfikatorów i anten RWD do przeprowadzenia eksperymentów badawczych; adaptacji elementów systemu RFID na stanowisku laboratoryjnym w celu przeprowadzenia procesu weryfikacji doświadczalnej opracowanego modelu; korelacji wyników pomiarów i obliczeń; opracowaniu części manuskryptu. Procentowy udział habilitanta: 30%.

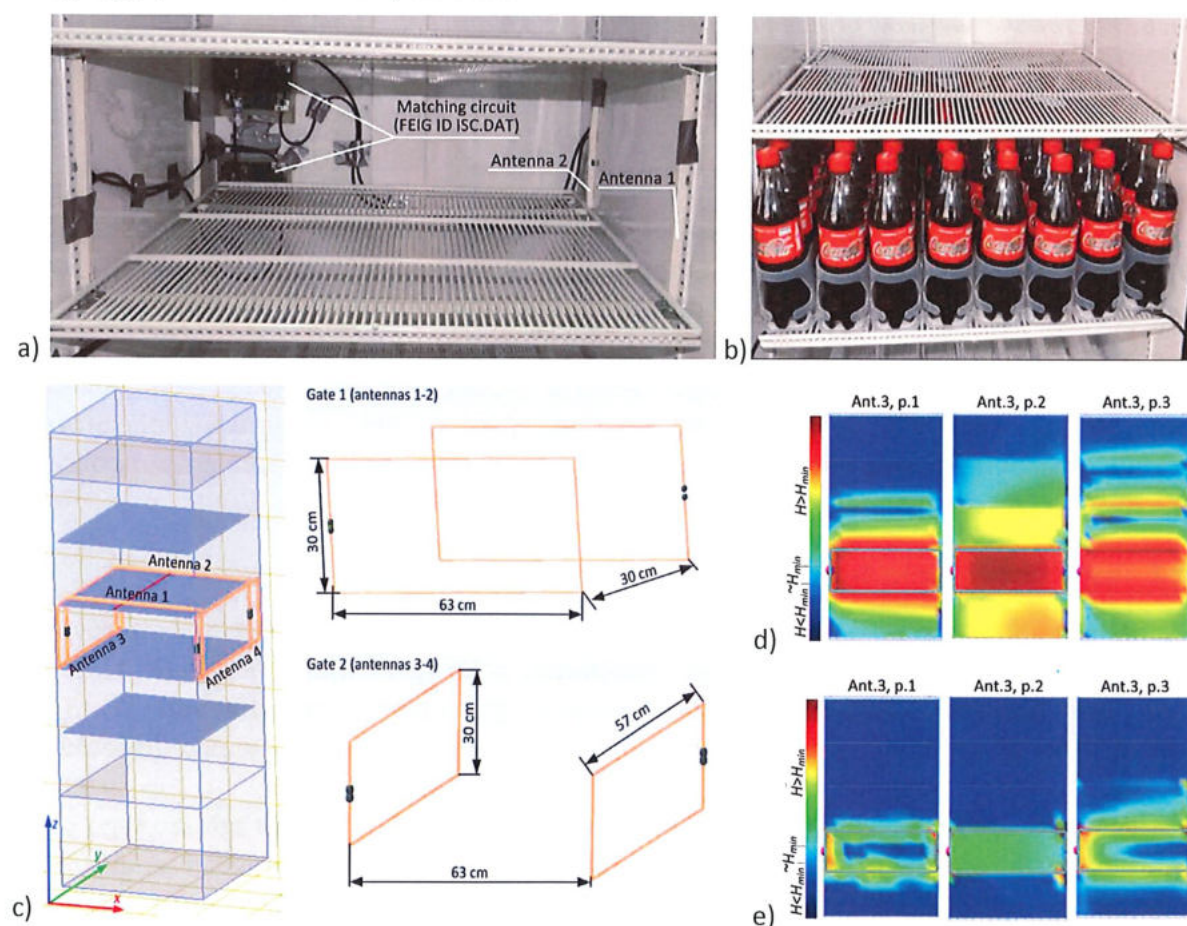
#### 4.11. Implementacja techniki RFID [P\_1, P\_2, P\_3]

W poszukiwanie nowych obszarów zastosowań techniki RFID wpisują się również badania przemysłowe realizowane przez habilitanta. W kolejnych publikacjach [P\_1], [P\_2], [P\_3] oraz pracach rozwojowych zakończonych zgłoszeniami patentowymi [1, 3, 4] prowadził on szczegółową analizę wad i zalet istniejących rozwiązań w przedmiotowym zakresie.

W publikacji [P\_3] habilitant zaprezentował rozwiązanie problemu zgłoszonego przez przedstawiciela branży produktów szybko-rotujących. Dotyczył on metod znakowania obiektów za pomocą identyfikatorów RFID pasma HF, a także skutecznej automatyzacji procesów w cyklu życia produktów (tj. podczas produkcji, logistyki, realizacji usług itp). W rozwiązaniu zaproponowano układ multipleksowanych anten czytnika RWD zapewniający 100% efektywność identyfikacji elektronicznie oznaczonych butelek z napojami (Rys. 24.b) umieszczonych w lodówkach wystawowych (Rys. 24.a). Za pomocą takiego systemu możliwa jest zdalna i automatyczna inwentaryzacji obiektów, generowanie raportów na temat sprzedaży oraz zamówień do centrum dystrybucyjnego. **Prace badawczo-rozwojowe w tym zakresie były prowadzone we współpracy z działem badawczym firmy Talkin'Things.**



Reprezentatywny zbiór butelek został oznaczony identyfikatorami RFID z chipem NXP I-CODE SLIX, zgodnym z protokołem ISO IEC 15693 (niemniej jednak rozważano również zastosowanie innych identyfikatorów: pasywnych/półpasywnych, z protokołem ISO IEC 14443 pasma HF lub ISO IEC 18000-63 pasma UHF, jak również rozwiązania dwupasmowe HF + UHF). W badaniach zaproponowano różne konstrukcje multipleksowanego układu antenowego (Rys. 24.c) (układ dwu-bramowy, typu L, typu X) dedykowanego do pracy z multiplekserem FEIG ID ISC.ANT.MUX i czytnikiem-programatorem FEIG ID ISC.LRM2500-B. Rozważono je dla reprezentatywnego przykładu jednej półki. Dla każdej konfiguracji przygotowano model numeryczny w oprogramowaniu EMCoS Antenna VirtualLab, w którym wykonano obliczenia rozkładu prądu i natężenia pola magnetycznego przy częstotliwości  $f_0 = 13,56$  MHz. Na ich podstawie szacowano miejsca, gdzie natężenie pola magnetycznego (Rys. 24.d) może być wystarczające do prawidłowego zasilenia identyfikatorów RFID ( $H > H_{min}$ ). Obliczenia numeryczne zostały zweryfikowane w przykładowej aplikacji zbudowanej w oparciu na urządzeniu chłodniczym GDM-26-LD. Wskazano również możliwości ewentualnych modyfikacji budowy ludy chłodniczej, które zapewniłyby łatwiejszą integrację systemu RFID z urządzeniem.



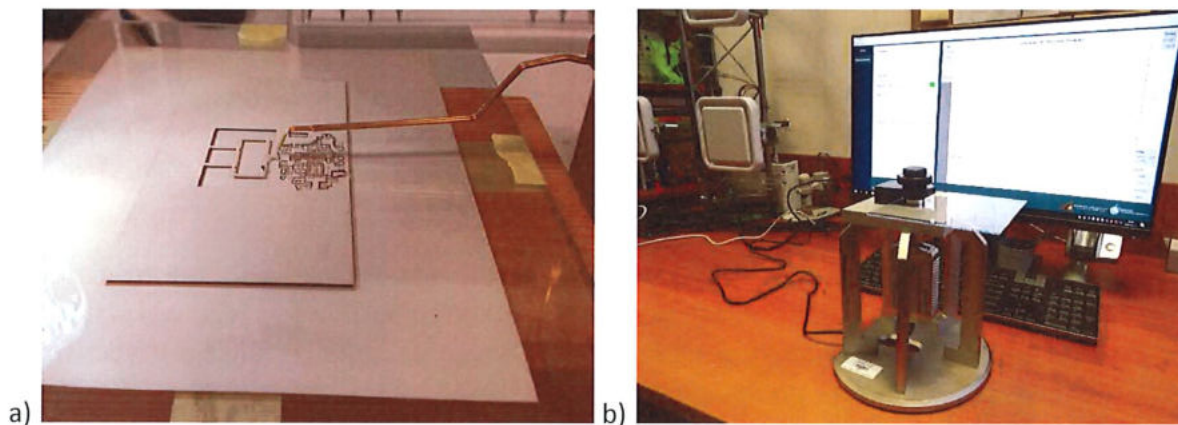
Rys. 24. Implementacja systemu RFID w lodówce wystawowej: a) przykładowa instalacja układu antenowego i czytnika/programatora w lodówce wystawowej; b) identyfikowane obiekty; c) model układu antenowego; d) przykładowe wyniki symulacji rozkładu natężenia pola magnetycznego, p.1, p.2, p.3 – wybrane płaszczyzny w obszarze lodówki

W publikacji [P\_1] habilitant rozważał możliwości zastosowania techniki RFID do monitorowania parametrów paneli fotowoltaicznych. Prace badawczo-rozwojowe w tym zakresie były prowadzone we współpracy z działem rozwojowym firmy ML System Rzeszów



**i stanowiły kontynuację wyników osiągniętych w projekcie realizowanym dla firmy Aluron Zawiercie (NCBR POIR.01.01.01-00-0407/16, umowa na badania przemysłowe RE-U-17311).**

W podstawowym ujęciu, elektroniczny identyfikator może służyć jako znacznik przechowujący informację o szczegółowych danych na temat urządzenia, na wszystkich etapach jego życia: produkcji, dystrybucji, instalacji, eksploatacji, serwisu/konserwacji i utylizacji. Z kolei, zastosowanie czujnika RFID dodaje do bazy wiedzy nowe – do tej pory nieznanne przez użytkowników zautomatyzowanych systemów – informacje o funkcjonowaniu obiektu i jego otoczeniu. Stopień zaawansowania jego konstrukcji w głównej mierze zależy od przyjętego scenariusza pracy. W najprostszym przypadku, gdy służy jedynie do monitorowania napięcia na zaciskach panelu, to wówczas do jego realizacji można wykorzystać dodatkowe bloki funkcjonalne implementowane we współczesnych półpasywnych chipach RFID. W rozwiązaniu najbardziej skomplikowanym monitorującym kilka parametrów (w tym przede wszystkim napięcie, prąd, moc, temperaturę) konieczne jest zastosowanie mikrokontrolera z przeznaczeniem do nadzorowania procesów pomiarowych, przetwarzania i przesyłania danych, zarządzania energią itd. Dla każdej z tych konstrukcji konieczne jest zaprojektowanie efektywnie działającego układu antenowego (Rys. 25.a), co z uwagi na bliskość szkła i elementów metalowych jest zadaniem skomplikowanym. Dla prawidłowej realizacji projektu układu antenowego dedykowanego do współpracy z chipem IDS/AMS SL900A w publikacji [P\_1] **przeprowadzono szczegółową analizę bieżącego stanu wiedzy na temat rozwiązań identyfikatorów, które można wykorzystać do znakowania paneli PV. Ponadto dokonano charakterystyki parametrów dielektrycznych materiałów składowych paneli PV (Rys. 25.b) oraz wpływu parametrów procesów technologicznych (w tym przypadku sitodruku) na dokładność wyników modelowania. Zaproponowano projekt anteny oraz kompletnego identyfikatora przeznaczonego do wykonania na szkle stanowiącym wierzchnie zabezpieczenie panelu PV.**



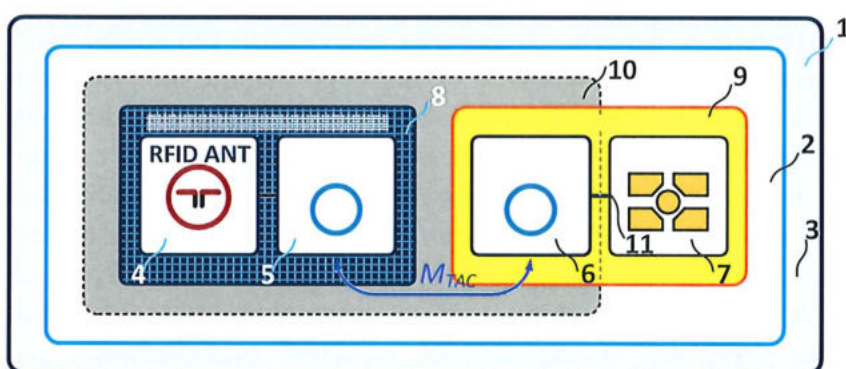
*Rys. 25. Synteza anten RFID: a) antena RFID drukowana na szkle stanowiącym wierzchnie zabezpieczenie panelu PV; b) stanowiska do wyznaczania parametrów dielektrycznych materiałów*

**Działalność badawcza habilitanta w zakresie technologii wykonywania identyfikatorów RFID zaowocowała także opracowaniem publikacji [P\_2] oraz nietypowego rozwiązania, na które uzyskano patent z 16 zastrzeżeniami.** Przedmiotem wynalazku jest unikalny pod względem konstrukcji elektroniczny identyfikator radiowy, z przeznaczeniem do zastosowania w wyrobach tekstylnych, zwłaszcza podczas monitorowania i automatyzacji procesów na każdym etapie cyklu ich życia. Wyrób tekstylny RFIDtex jest to produkt branży tekstylnej (np. tekstylia powszechnego użytku, bielizna szpitalna i operacyjna, odzież robocza, specjalistyczna i ochronna, tekstylia sektora hotelarskiego oraz gastronomicznego –



branży HoReCa itp), z którym w sposób trwały są zintegrowane komponenty elektryczne i/lub elektroniczne, w szczególności identyfikator-czujnik RFID, w celu uzyskania rozwiązań o specyficznych właściwościach użytkowych.

Zastosowanie układów sprzęgających zaproponowanych przez habilitanta w patencie [P\_2, 3] pozwala na rozdzielenie typowej struktury identyfikatora RFID na dwa niezależnie wytwarzane komponenty (Rys. 26). Moduł antenowy może być wyhaftowany nićmi przewodzącymi, przszyty lub wprasowany w materiał tekstylny, a wówczas moduł mikroelektroniczny wytworzony w postaci półproduktu (np. guzika lub wszywki) z łatwością może być integrowany ze znakowanym wyrobem. Główną zaletą takiego rozwiązania jest uzyskanie odpowiedniej elastyczności i odporności, z możliwością realizacji w procesie produkcyjnym wykorzystującym metody standardowo stosowane przy wytwarzaniu tekstyliów. Takie podejście przekłada się na obniżenie kosztów produkcji oraz komfort kreowania systemów identyfikacji na kolejnych etapach cyklu życia wyrobu.



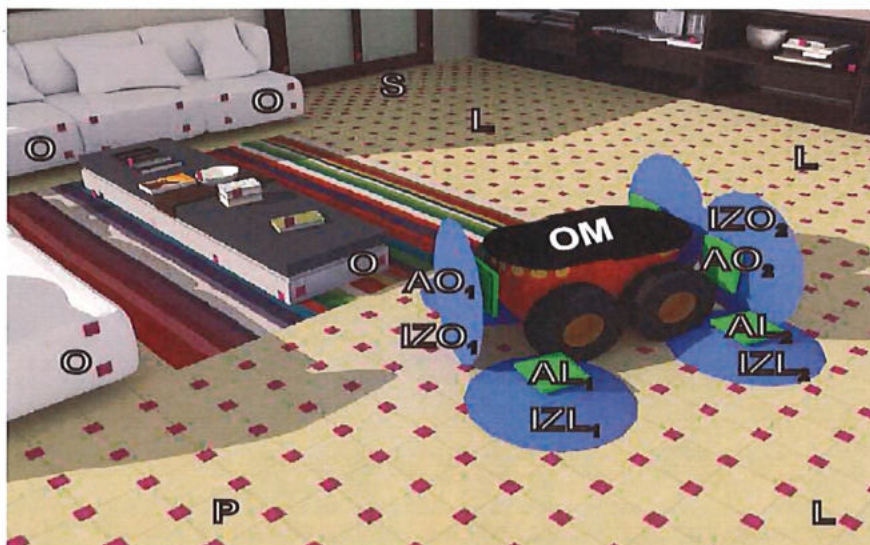
**Rys. 26.** Koncepcja wynalazku RFIDtex: 1 – wyrób tekstroniczny z interfejsem RFID; 2 – struktura tekstroniczna; 3 – materiał, z którego jest wykonany wyrób; 4 – antena szyta/haftowana (ale także: wprasowywana, zgrzewana, klejona itp.); 5 – układ sprzęgu anteny (wykonywany w tej samej technologii co antena); 6 – układ sprzęgu chipu; 7 – chip(y) RFID różnych pasm; 8 – moduł szytej/haftowanej anteny wykonywany technikami stosowanymi w przemyśle tekstylnym (tj. szycia, haftowania, prasowania, klejenia, zgrzewania itp.); 9 – moduł mikroelektroniczny (półprodukt dostarczany do przemysłu tekstylnego); 10 – układ antenowy; 11 – punkt dołączenia chipu do układu antenowego;  $M_{TAC}$  – indukcyjność wzajemna sprzężenia indukcyjnego

Praktyczna przydatność zaproponowanego identyfikatora tekstronicznego zintegrowanego w systemie RFID polega przede wszystkim na możliwości jego wykorzystania w całym cyklu życia znakowanego produktu, zapewniając dodatkowe funkcje użytkowe na każdym etapie: produkcji (np. polepszona kontrola jakości), magazynowania (np. kompletna informacja o stanach magazynowych), dystrybucji hurtowej (np. dynamiczne rozpoznawanie wyrobów) i detalicznej (np. natychmiastowa informacja o parametrach, reklama), użytkowania (np. eksponowanie do inteligentnych urządzeń sposobu konserwacji oraz stopnia zużycia odzieży), utylizacji (np. udostępnienie pełnej informacji o składzie materiałowym produktu). Integracja rozwiązań pracujących w wielu pasmach częstotliwości pozwala na pogodzenie oczekiwań zarówno producentów i dystrybutorów (większy zasięg działania zautomatyzowanego systemu za pomocą urządzeń RFID dalekiego zasięgu pasma UHF), jak i użytkowników wyrobów tekstronicznych RFIDtex (możliwość korzystania z funkcji NFC w urządzeniach mobilnych).

W poszukiwanie nowych obszarów zastosowań techniki RFID wpisują się również badania przemysłowe realizowane przez habilitanta, ukierunkowane na rozwój systemów lokalizacji i nawigacji obiektów mobilnych. W kolejnych pracach [P\_2] oraz [1, 2, 4]



proceedził on szczegółową analizę wad i zalet istniejących rozwiązań w przedmiotowym zakresie. Zaproponował on koncepcję wyznaczania toru ruchu obiektu wyposażonego w czytnik/programator wraz z odpowiednim zestawem anten, na podstawie sieci identyfikatorów połączonych z elementami obszaru roboczego (podłogą, trwałym wyposażeniem pomieszczeń lub elementami konstrukcyjnymi, meblami), (Rys. 27). W rozważaniach nie tyle istotne było wyznaczenie bezwzględnej lokalizacji w danym obszarze (np. na podstawie rozpoznanego kodu UID identyfikatora umieszczonego w znanym punkcie pomieszczenia), co dynamiczne kreowanie własnej (obiektu mobilnego) mapy punktów odniesienia i na tej podstawie podejmowanie decyzji nawigacyjnych. **Habilitant zaproponował również zastosowanie czujników RFID do monitorowania bieżących warunków panujących w otoczeniu (temperatury, wilgotności, chropowatości podłoża itp.) i podejmowania autonomicznych decyzji o kontynuowaniu lub zmianie kierunku przemieszczania się obiektu, zwiększeniu lub zmniejszeniu jego prędkości itp.** Ponieważ w rozbudowanej pamięci wewnętrznej chipu RFID mogą być przechowywane również dodatkowe informacje (np. o stanie nawierzchni, zmianie lokalizacji przeszkód, częstotliwości użytkowania danej ścieżki), to w naturalny sposób powstaje kolejna możliwość modyfikowania decyzji nawigacyjnych. Na podstawie takiej struktury można kreować aplikacje w pełni autonomiczne, w których obiekt mobilny samodzielnie wyszukuje drogę do punktu docelowego, buduje swoją mapę dostępnych obszarów i dopuszczalnych parametrów ruchu, zaznacza rozpoznane już ścieżki, stosuje zasady unikania kolizji itp.

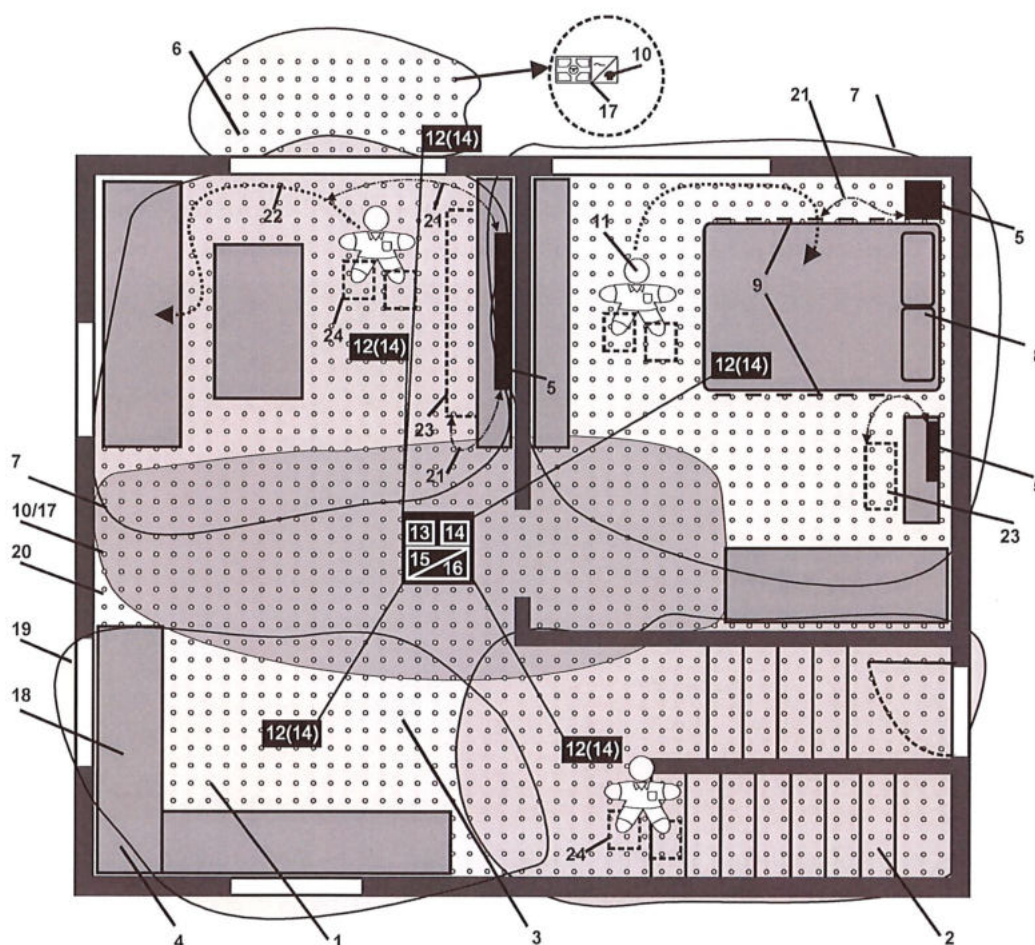


**Rys. 27.** Koncepcja inteligentnego systemu nawigacyjnego: P – sieć nawigacyjna; L – obszar o standardowej gęstości punktów; S – obszar o zmienionej gęstości punktów; O – oznakowanie przeszkód; OM – obiekt mobilny;  $AL_n$  – antena RWD;  $IZL_n$  – obszar IZ

Badania prowadzone przez habilitanta zostały wykorzystane do zgłoszenia dwóch wynalazków w obszarze techniki RFID. Przedmiotem zastrzeżenia [1] jest system autonomicznej lokalizacji i bezkolizyjnego sterowania ruchem obiektów mobilnych w przestrzeni z przeszkodami. Wynalazek jest dedykowany do stosowania przede wszystkim w halach przemysłowych, obiektach magazynowych, sklepach wielko-powierzchniowych, ale również może być wykorzystany w budynkach mieszkalnych lub biurowych przy sterowaniu robotów mobilnych, urządzeń wspomagających aktywność osób niepełnosprawnych itp. Osiągnięcia habilitanta w zakresie projektowania i implementacji czujników RFID zostały wykorzystane również w kolejnym zgłoszeniu ochrony wynalazku [4] z aż 27



zastrzeżeniami. Jego przedmiotem jest aktywna podłoga (Rys. 28) oraz spersonalizowany system sterowania wykorzystujący aktywną podłogę, mający zastosowanie zwłaszcza do sterowania urządzeniami elektrycznymi oraz elektronicznymi w inteligentnych budynkach, a także monitorowania ruchu obiektów. Idea wynalazku oparta jest na statycznym wielokrotnym systemie RFID (pracującym w paśmie UHF) oraz zestawie autonomicznych, bezbateryjnych czujników RFID rozlokowanych w punktach sieci sensorowej. **Zaproponowana przez habilitanta koncepcja lokalizacji obiektu (np. osoby, robota mobilnego) i sterowania w spersonalizowanym systemie automatyki budynkowej oparta jest na wykrywaniu i pomiarze siły nacisku wywieranej na podłogę.** Na podstawie danych, odczytanych przez czujnik/programator i przetworzonych w systemie kontrolnym, podejmowana jest akcja dostosowana do potrzeb rozpoznanej po ciężarze osoby. **Ponadto habilitant zaproponował istotne modyfikacje koncepcji, które pozwalają na dalsze rozszerzenie możliwości aplikacyjnych wynalazku.**



**Rys. 28.** Koncepcja aktywnej podłogi: 1 – obszar roboczy; 2 – schody; 3 – pomieszczenie; 4 – elementy wyposażenia budynku; 5 – sterowane urządzenia elektryczne i elektroniczne; 6 – obszar na zewnątrz budynku; 7 – IZ; 8 – obszar przebywania obiektu poza obszarem roboczym; 9 – linia graniczna obszaru roboczego wyzwalająca akcję w systemie; 10 – punkt węzłowy sieci pomiarowej; 11 – monitorowany obiekt o określonym ciężarze; 12 – antena; 13 – multiplexer; 14 – RWD (w nawiasie zaznaczono opcjonalne występowanie); 15 – PC; 16 – oprogramowanie; 17 – pasywny identyfikator-czujnik RFID; 18 – obszar wyłączony ruchu obiektu, nie należy do obszaru roboczego; 19 – obszar IZ, lecz nie wchodzący w skład obszaru roboczego (brak punktów węzłowych); 20 – obszar z punktami węzłowymi, lecz nie wchodzący w skład obszaru roboczego (brak pokrycia IZ); 21 – personalizowana reakcja systemu sterowania; 22 – ścieżka ruchu; 23 – obszar aktywacyjny; 24 – obszar zaktywowany



Na przykład proces lokalizacji i personalizacji może zostać oparty na detektorach RFID (zamiast pomiaru ciężaru można zastosować jedynie detektor obecności), a rozpoznanie obiektu może zostać zrealizowane na podstawie cech biometrycznych, przy wykorzystaniu algorytmów programowych. Przewidziano również potrzebę uśpienia i aktywacji identyfikatorów po wykryciu zmiany obciążenia (co znacząco redukuje obciążenie łącza komunikacyjnego), integracji z różnego rodzaju podłożami w sposób estetyczny i niezauważalny dla użytkownika, śledzenia przenoszonych przedmiotów (wynikająca z monitorowania zmiany ciężaru w punktach węzłowych lub rozpoznania zintegrowanych identyfikatorów), łączenia z typowymi urządzeniami automatyki domowej i systemów alarmowych, wykorzystania identyfikatorów zintegrowanych z okładziną podłogi w całym cyklu jej życia (od produkcji po utylizację, co może znacząco wpłynąć na obniżenie kosztów implementacji systemu), eliminacji zakłóceń związanych z naturalnym użytkowaniem, starzeniem się podłoża, wpływem warunków otoczenia (temperatury, wilgotności itp.). Dodatkowe obszary zastosowań mogą dotyczyć systemów zabezpieczeń, integracji z usługami dodawanymi do smartfonów, Internetu produktów, domów opieki społecznej, ośrodków rehabilitacji, szpitali, gdzie występuje potrzeba monitorowania aktywności pacjentów itd.

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 1] został przedstawiony w rozdziale 4.6.**

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 2] został przedstawiony w rozdziale 4.4.**

**Wkład habilitanta w powstanie pracy [P 3] polegał na:** ewaluacji wykonanych układów antenowych o różnej topologii; skorelowaniu założeń projektowych dla anten UHF i HF oraz torów pomiarowych z parametrami technicznymi zastosowanych rozwiązań; walidacji opracowanej procedury wyznaczania efektywności identyfikacji produktów; wykonaniu analizy otrzymanych wyników; zredagowaniu treści manuskryptu i opracowaniu opisu dotyczącego technicznych aspektów przygotowania eksperymentu. Procentowy udział habilitanta: 30%.

#### **4.12. Podsumowanie**

Przedstawiony cykl powiązanych prac głównego osiągnięcia naukowego pn. *uwarunkowania syntezy autonomicznych półpasywnych identyfikatorów-czujników RFID* ukazuje wkład habilitanta w rozwój techniki projektowania i wytwarzania urządzeń RFID. Należy podkreślić, że pozostałe opracowania w postaci raportów lub publikacji również dotyczą zagadnień omówionych w głównym osiągnięciu, a prowadzona działalność organizacyjna i częściowo także dydaktyczna ściśle się z nim łączy. Całokształt dorobku habilitanta dotyczy przede wszystkim budowy odpowiedniej bazy laboratoryjnej, rozwoju technologii struktur elektronicznych i poszukiwania użytecznych implementacji wyników badań. Tak kompleksowy rozwój własnego warsztatu naukowego nabiera szczególnego znaczenia w kontekście braku możliwości opracowania uniwersalnej konstrukcji autonomicznego czujnika RFID, a co za tym idzie konieczności rozwiązywania zadań projektowych wprost pod kątem spełniania określonych wymagań docelowej aplikacji, jak również potrzeby eliminowania zbyt często wykorzystywanej metody prób i błędów z powszechnej praktyki konstruktorskiej.

Efektom intensywnej aktywności organizacyjnej i badawczej habilitanta jest wypracowanie wielu oryginalnych osiągnięć o charakterze projektowym, konstrukcyjnym i technologicznym. Najważniejsze z nich, stanowiące podstawę dalszego rozwoju osobistego jak i środowiska naukowego, ma swoje odzwierciedlenie w Laboratorium HYBRID. Jest w nim urealniona potrzeba łączenia różnych technologii, zmierzająca do uzyskania możliwości zrealizowania dowolnej struktury elektronicznej w jednym procesie wytwórczym. Osiągnięcia



integracja działalności niewielkiej grupy pracowników KSEiT, również ma swoje odbicie w przyjętej koncepcji rozwiązywania zagadnień technologicznych. Pomimo teoretycznie rozbieżnych tematów badawczych poszczególnych zespołów (skojarzonych z laboratoriami RFID, EMC, HYBRID) podejmowane są wspólne inicjatywy projektowe i na bazie wieloletnich doświadczeń oraz potencjału całego kompleksu trzech, wzajemnie uzupełniających się laboratoriów realizowane są liczne prace na rzecz podmiotów gospodarczych.

Potencjał przygotowanej bazy laboratoryjnej został w pełni wykorzystany do wypracowania opisanych we wniosku oryginalnych osiągnięć projektowych. Aktywny udział habilitanta w rozwiązywaniu kolejnych problemów badawczo-rozwojowych był wymierną podstawą do rozwinięcia koncepcji bezbaterijnego, autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID. Habilitant skupił się w niej zarówno na aspektach technologicznych (uwarunkowaniach stosowania technologii obwodów drukowanych PCB, druku strumieniowego ink-jet, elektronicznych struktur na podłożach elastycznych i ceramicznych, w tym LTCC), układowych (rozwój układów pozyskiwania energii, zarządzania zasobami, obsługi dodatkowych funkcji użytkowych itp.) jak i ewaluacji parametrów realizowanych implementacji identyfikatorów i czujników RFID. Poza charakterystyką ogólnych uwarunkowań pracy współczesnych systemów automatycznej identyfikacji obiektów, w kolejnych publikacjach przedstawił osiągnięcia związane z syntezą autonomicznych czujników RFID, w tym zwrócił szczególną uwagę na kluczowe zagadnienia takie jak uwarunkowania technologiczne procesu syntezy, synteza anten dla identyfikatorów RFID, wyznaczanie parametrów anten i chipów RFID, poszukiwanie efektywnych rozwiązań układowych.

Wypracowane rezultaty stały się bazą dla szeroko zakrojonej współpracy habilitanta z partnerami przemysłowymi i dały sposobność do poszukiwania zastosowań aplikacyjnych wyników badań naukowych. W tym zakresie za oryginalne osiągnięcie należy uznać zdefiniowanie uwarunkowań syntezy zintegrowanego z obiektem, autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID, przeznaczonego do wykorzystywania w systemie identyfikacji i monitoringu obejmującym proces produkcji, dystrybucji, instalacji, eksploatacji, serwisu/konserwacji i utylizacji paneli fotowoltaicznych lub produktów tekstronicznych. Rezultaty te mają swoje odzwierciedlenie również w innych przedsięwzięciach, w tym przede wszystkim w zgłoszeniach patentowych odnoszących się do praktycznych zastosowań czujnika RFID w aplikacjach lokalizacji i nawigacji obiektów, systemach sterowania inteligentnymi budynkami oraz w tekstronice.

Podsumowując należy podkreślić, że efekty pracy habilitanta są rozpoznawalne w środowisku naukowym (Indeks Hirscha: WoS/Scopus – 4) oraz mają bardzo istotny wpływ na działalność KSEiT oraz rozwój kardy naukowej PRz. Są one wykorzystywane do przygotowania kolejnych prac doktorskich, a częściowo także i habilitacyjnych. Są pomocne studentom przy rozpoczęciu i wdrożeniu w karierę naukową, jak również stanowią uzupełnienie procesu dydaktycznego, ułatwiając odpowiednie przygotowanie absolwentów do pracy na wysoko wyspecjalizowanych stanowiskach technicznych. Planowany dalszy rozwój bazy laboratoryjnej oraz osobisty habilitanta pozwoli na jeszcze skuteczniejsze zacieśnienie współpracy z partnerami przemysłowymi.



## **5. Informacja o istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej uczelni lub instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej**

Habilitant podejmował wiele różnych inicjatyw związanych z aktywnością naukową w innych ośrodkach naukowych, znajdujących się zarówno w kraju jak i zagranicą.

Działalność naukową wykraczającą poza macierzystą jednostkę w PRz rozpoczął już na etapie przygotowywania rozprawy doktorskiej [41], dotyczącej zagadnień związanych z mechanizmami przenoszenia ciepła w wielowarstwowych strukturach mikroelektronicznych, a polegającej na opracowaniu dynamicznej metody pomiaru własności cieplnych komponentów mikroukładu grubowarstwowego, której implementacja pozwala na wyznaczenie zmiennego pola temperatury w projektowanym mikroukładzie elektronicznym, a tym samym na określenie wartości przewodności i dyfuzyjności cieplnej badanego materiału. Do osiągnięcia celu założonego w dysertacji konieczne było przeprowadzenie wielu cząstkowych badań, które były realizowane w różnych jednostkach naukowych. Podstawowym elementem stanowiska pomiarowego była specjalizowana głowica z ultraszybkim detektorem promieniowania podczerwonego, zaprojektowana przy współpracy z działem badawczo-rozwojowym warszawskiej firmy Vigo System [42]. Ponadto, pomyślnie sfinalizowanie obszernej części doświadczalnej wymagało wykonania wielu pomiarów z wykorzystaniem specjalistycznej aparatury badawczej, która nie była dostępna w macierzystej jednostce. W związku z tym została podjęta współpraca z Katedrą Techniki Wytwarzania i Automatyk na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa PRz, w której habilitant wykonał badania w zakresie definiowania rozmiarów geometrycznych i topografii powierzchni komponentów układów grubowarstwowych oraz z Katedrą Technologii i Materiałoznawstwa Chemicznego na Wydziale Chemicznym PRz, w której z kolei prowadzono badania polegające na określaniu przebiegu zmian ciepła właściwego ceramiki alundowej w funkcji temperatury [41]. Szczególnie intensywne prace badawcze, poświęcone wyznaczaniu własności cieplnych warstw składowych rezystora grubowarstwowego na podstawie identyfikacji dynamicznych zmian pola temperatury, habilitant prowadził przez wiele lat w Zakładzie Termodynamiki Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa PRz, czego owocem były liczne publikacje prezentowane na konferencjach [43-50].

Podobnie intensywny i wieloletni charakter miała współpraca naukowa z Katedrą Mikroelektronicznych Układów Hybrydowych (Dept. of Hybrid Microelectronics) Uniwersytetu Technicznego w Koszycach. W tamtejszych laboratoriach były prowadzone badania w zakresie analizy zjawisk dynamicznej wymiany ciepła w mikroelektronicznych układach grubowarstwowych realizowanych w technologii LTCC. W efekcie powstały publikacje, które były prezentowane zarówno na konferencjach jak i w periodykach naukowych [51-56], oraz wspólny patent SK 38-2012 A3 zastrzeżony w Słowackim Urzędzie Patentowym na rzecz Uniwersytetu Technicznego w Koszycach [57] w 2015 roku.

W zakresie tematycznym dynamicznej wymiany ciepła w strukturach hybrydowych, w roku 2005 habilitant realizował pracę badawczą (numer U-6828), zleconą przez Instytut Technologii Elektronowej w Krakowie na temat „Badanie dynamicznych stanów temperatury w grubowarstwowych strukturach rezystorowych na podłożach AlN i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”. Współpraca z pracownikami Instytutu została rozpoczęta już wcześniej, czego potwierdzeniem jest publikacja [58].

Swoje odzwierciedlenie w publikacjach znalazła współpraca naukowo-badawcza prowadzona przez wiele lat z Politechniką Wrocławską, w tym przede wszystkim z Katedrą



Mikrosystemów Wydziału Elektroniki i Fotoniki [59, 60]. Jest ona realizowana zarówno w zakresie czujników wielkości fizycznych budowanych w technologii hybrydowej (w szczególności grubowarstwowej i LTCC), jak również w dziedzinie techniki radiowej identyfikacji obiektów RFID. W szczególności habilitant brał udział w pracach wykonywanych na Politechnice Wrocławskiej przy okazji prowadzenia grantu pn. „Synteza autonomicznego identyfikatora półpasywnego, dedykowanego do pracy w wielokrotnych, dynamicznych systemach RFID”, w projekcie finansowanym przez NCBR w ramach Programu Badań Stosowanych (NCBR PBS1/A3/3/2012), którego habilitant był kierownikiem. W ramach podjętej współpracy rozwiązywano problemy dotyczące przygotowania wybranych procesów technologicznych związanych z integracją struktur scalonych i elementów dyskretnych w układach hybrydowych na podłożach elastycznych i ceramicznych oraz zaprojektowania i wykonania przykładowych modeli hybrydowych półpasywnych identyfikatorów RFID. Należy zaznaczyć, że podjęto wówczas działania w kierunku możliwości przemysłowej produkcji opracowanego modelu autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika z alternatywnym źródłem zasilania, które były realizowane z działem badawczo-rozwojowym rzeszowskiej firmy Elmak Sp z o.o. z Rzeszowa.

Habilitant miał również sposobność współpracować z pracownikami Wojskowego Instytutu Techniki Inżynierskiej z Wrocławia przy okazji realizacji projektu „Uwarunkowania syntezy zintegrowanego z obiektem, autonomicznego, półpasywnego identyfikatora - czujnika RFID, przeznaczonego do wykorzystywania w systemie obejmującym proces produkcji, dystrybucji, instalacji, eksploatacji, serwisu/konserwacji i utylizacji paneli fotowoltaicznych”, który był wykonywany na rzecz firmy Aluron Sp. z o.o. z Zawiercia w ramach grantu pn. „Opracowanie zeroenergetycznego systemu KWANTUM wyposażonego w aktywne pakiety zespolone”, współfinansowanego ze środków UE (Oś priorytetowa 1 „Wsparcie prowadzenia prac B+R+W przez przedsiębiorstwa”, Działanie 1.1 „Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa”, Regionalny Program Operacyjny Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020). Dodatkowo, w przedsięwzięciu brał udział dział badawczo-rozwojowy firmy ML System S.A. z Rzeszowa, a potwierdzeniem osiągnięcia istotnych wyników o charakterze naukowo-badawczym jest publikacja [P\_1].



## 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

### 6.1. Wprowadzenie

Habilitant w latach 2006-2019 był zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych (KSEiT) na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki (WEiI) Politechniki Rzeszowskiej (PRz). Zaobserwowany w ciągu wcześniejszych dziesięciu lat pracy (na stanowisku asystenta, 1996-2006) rozwój techniki, a także mnogość problemów wpływających na efektywność funkcjonowania systemów elektronicznych i telekomunikacyjnych, zdeterminowały jego zaangażowanie w katedralne procesy: kształtowania wysokospecjalistycznych zespołów badawczych, rozbudowy istniejącego zaplecza laboratoryjnego i zacieśnienia współpracy z partnerami przemysłowymi, szczególnie w obszarze technologii hybrydowych struktur elektronicznych oraz radiowej identyfikacji obiektów RFID, a także częściowo – kompatybilności elektromagnetycznej EMC. Działania te wprost wynikały z reorganizacji struktury KSEiT w odniesieniu do nowych wyzwań B+R+W, które zostały uwarunkowane perspektywą pozyskiwania: w latach 2007-2013 znaczących środków inwestycyjnych UE, przeznaczonych na unowocześnienie zaplecza laboratoryjnego PRz, a po 2013 r. – środków na badania stosowane, przemysłowe i rozwojowe, efektywnie wykorzystywane w KSEiT przy współudziale z partnerami przemysłowymi. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zbudowane w KSEiT (przy znaczącym współudziale habilitanta) zaplecze laboratoryjne jest obecnie intensywnie wykorzystywane do rozwoju kadry i współpracy z gospodarką.

Główny obszar naukowej działalności habilitanta dotyczy prac badawczych ukierunkowanych na integrację różnego typu mikro- i nanotechnologii elektronicznych na potrzeby praktycznej realizacji układów hybrydowych, w tym przede wszystkim z zakresu techniki RFID, a w szczególności w odniesieniu do identyfikatorów dedykowanych do nietypowych zastosowań aplikacyjnych (np. bezbaterijnych, autonomicznych czujników RFID). **Od 2006 r.**, działalność ta znalazła swoje wyraźne odzwierciedlenie, m.in.: we współautorstwie 3 patentów i 1 zgłoszenia ochrony wynalazku (dodatkowo finalizowane jest kolejne zgłoszenie w ramach programu PCI), 6 obszernych rozdziałów w monografiach, 53 publikacji w zagranicznych i krajowych czasopismach (w tym: 13 indeksowanych przez JCR, 36 znajdujących się na listach MNiSW), 40 prezentacji wyników badań przedstawionych na międzynarodowych i krajowych konferencjach (w tym: 12 wygłoszonych referatów) i seminariach KSEiT PRz (15 wygłoszonych referatów), a także przygotowaniem 43 recenzji publikacji w czasopismach i referatów konferencyjnych oraz 1 wniosku projektowego. Dodatkowo do istotnych osiągnięć należy zaliczyć udział w 5 zespołach badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów oraz w 25 pracach B+R+W (z czego w 3 projektach habilitant był kierownikiem i były one realizowane we współpracy z przedsiębiorcami zarówno z polski jak i z zagranicy oraz przedstawicielami innych ośrodków naukowo-badawczych) podjętych w ramach grantów lub umów z krajowymi lub zagranicznymi partnerami z przemysłu i różnych instytucji, gdzie do chwili obecnej rozwiązano wiele praktycznych problemów i opracowano kilka nowatorskich rozwiązań w zakresie systemów RFID, techniki antenowej oraz hybrydowych struktur wielowarstwowych. Wiele wyników tych prac zawarto także w ponad 100 niepublikowanych dokumentacjach prac badawczych (często również niejawnych ze względu na obowiązujące klauzule umów z przedsiębiorcami).



Od 2019 roku, Habilitant jest zatrudniony na stanowisku profesora uczelni (Politechniki Rzeszowskiej) w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych. Bierze również czynny udział w pracach Konwentu Profesorów oraz Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, funkcjonujących w ramach wydziału Elektrotechniki i Informatyki PRz.

Za działalność naukową i publikacyjną oraz współpracę z przemysłem i aktywność badawczo-rozwojową na rzecz gospodarki habilitant uzyskał 6 nagród (wszystkie po uzyskaniu stopnia doktora):

- Brązowy Krzyż Zasługi za zasługi w działalności na rzecz rozwoju nauki; postanowienie Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 17 września 2019 r.;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej: zespołowa I stopnia za cykl publikacji oraz prace badawczo-rozwojowe na rzecz gospodarki w obszarze techniki antenowej i radiowej identyfikacji obiektów, 2017;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej: zespołowa III stopnia za cykl publikacji i prace badawczo-rozwojowe wdrożeniowe w obszarze techniki antenowej i radiowej identyfikacji obiektów RFID, 2016;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej: zespołowa II stopnia za prace badawcze w dziedzinie mikro- i nanotechnologii elektronicznych, 2011;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej: indywidualna III stopnia za uzyskanie stopnia naukowego doktora, 2006;
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej: zespołowa II stopnia za opracowanie koncepcji i organizację trzech zintegrowanych laboratoriów badawczych EMC, RFID i HYBRID, 2013.

## 6.2. Laboratorium HYBRID

Najważniejszym, oryginalnym i wyróżniającym się osiągnięciem habilitanta było opracowanie koncepcji i organizacja, a następnie stała opieka nad Laboratorium zintegrowanych mikro- i nanotechnologii elektronicznych HYBRID. Jego budowa była realizowana w latach 2007-2013 w ramach środków własnych Politechniki Rzeszowskiej oraz dwóch wielomilionowych projektów inwestycyjnych finansowanych z programów Unii Europejskiej:

- Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego: Program Operacyjny Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Oś Priorytetowa I „*Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka*”, projekt nr UDA-RPPK.01.03.00-18-003/10-00 (na kwotę ponad 1 600 000 zł);
- Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego: Program Operacyjny Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Oś Priorytetowa I „*Nowoczesna Gospodarka*”, Działanie 1.3 „*Wspieranie innowacji*”, projekt nr POPW.01.03.00-18-012/09 (na kwotę ponad 5 500 000 zł).

W ramach tych inicjatyw zostały uruchomione 2 laboratoria: Termokinetyki i Badań Środowiskowych, Technologii Mikro i Optoelektronicznych, które zostały połączone w Laboratorium HYBRID po zaprojektowaniu i wykonaniu dedykowanego zaplecza technicznego.

W strategii Laboratorium HYBRID założono możliwość zrealizowania określonej struktury elektronicznej w jednym procesie produkcyjnym, łącząc różnorodne metody wytwarzania takich układów. Uwzględniono w niej również fakt, że aktywność badawczo-naukowa zespołu technologicznego w głównej mierze dotyczy rozwiązań stosowanych



w technice RFID i EMC i jest ściśle powiązana z działalnością Laboratorium RFID oraz Laboratorium EMC. Wspólnie realizowane są zadania w zakresie projektowania i wytwarzania struktur identyfikatorów oraz elementów czytników/programatorów, które są dedykowane do nietypowych zastosowań aplikacyjnych. Podejmowane są również przedsięwzięcia związane z wykorzystaniem technologii druku strumieniowego w procesie prototypowania i wytwarzania zespołów antenowych, układów zasilających i dopasowujących, a także cyfrowych systemów sterujących. Na bazie wieloletnich doświadczeń zdobytych w ramach współpracy z innymi jednostkami naukowymi z kraju i zagranicy prowadzona jest synteza różnego typu urządzeń mikroelektronicznych w strukturach grubowarstwowych LTCC, w tym głównie czujników różnych wielkości fizycznych (czujniki temperatury, gazu i ciśnienia) oraz realizowane są badania związane z termicznymi uwarunkowaniami pracy mikroukładów hybrydowych. Ponadto możliwość wykorzystania technologii cienkowarstwowej pozwala na zintensyfikowanie prac w innych dziedzinach, w tym w obszarze wieloparametrowych sensorów dla różnych wielkości fizycznych i chemicznych oraz w zakresie własności materiałowych komponentów struktur mikroelektronicznych. W tym zakresie prowadzone są również badania nad wykorzystaniem alternatywnych źródeł zasilania oraz systemów gromadzenia energii.



Rys. 29. Laboratorium HYBRID

Tak uzupełniony kompleks trzech laboratoriów RFID, EMC, HYBRID od 2013 roku stał się fundamentalnym narzędziem do komplementarnego rozwoju i współpracy środowiska naukowego KSEiT z gospodarką, co pozwala na dalszą rozbudowę tego potencjału badawczego PRz w obszarze nauk ścisłych i inżynierskich, skorelowanych z tematyką inteligentnych specjalizacji Regionalnej Strategii Innowacji Województwa Podkarpackiego na lata 2014-2020 (lotnictwa i kosmonautyki, jakości życia, motoryzacji oraz informatyki i telekomunikacji). Należy również podkreślić, że baza laboratoryjna jest ciągle uzupełniana i rozwijana m.in. w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego: Program



Operacyjny Inteligentny Rozwój 2014-2020, Oś Priorytetowa IV „Zwiększenie potencjału naukowo-badawczego”, Działanie 4.2 „Rozwój nowoczesnej infrastruktury badawczej sektora nauki”, projekt nr POIR.04.02.00-02-A007/16 „Polska Sieć Laboratoriów EMC” w ramach Konsorcjum EMC-LabNet.

U honorowaniem wysiłku habilitanta była nagroda (II stopnia) Rektora PRz za opracowanie koncepcji i organizację trzech zintegrowanych laboratoriów badawczych EMC, RFID, HYBRID, które zapewniają istotną poprawę warunków prowadzenia badań naukowych i prac rozwojowo-wdrożeniowych.

Wkład habilitanta w zrealizowanie oryginalnego osiągnięcia polegał na:

- opracowaniu koncepcji budowy Laboratorium HYBRID;
- projekcie i zestawieniu laboratoryjnych stanowisk i linii technologicznych pod kątem uzyskania możliwości stosowania jak największej liczby różnych technologii używanych przy wytwarzaniu układów i struktur elektronicznych;
- pozyskaniu i wydatkowaniu środków na realizację opracowanych projektów i koncepcji;
- pozyskaniu pomieszczeń dla Laboratorium HYBRID i dostosowaniu ich do potrzeb przewidywanych prac naukowo-badawczych, a w przyszłości również realizacji zamówień komercyjnych z przemysłu;
- wdrożeniu i uruchomieniu urządzeń i linii technologicznych – adaptacji stanowisk laboratoryjnych do potrzeb realizacji projektów naukowo-badawczych prowadzonych w KSEiT;
- organizacji i udziale w szkoleniach dla pracowników KSEiT z zakresu technologii układów elektronicznych – około 10 tygodniowych szkoleń, w ramach współpracy z firmami: HaikuTech Europe BV, Prevac Sp z o.o., NT-MTD Europe BV, Renex; miejsce: Politechnika Rzeszowska, lata 2007-2013;
- pracy w roli eksperta w kilkudziesięciu komisjach zdawczo-odbiorczych – przyjmowanie, instalacja, uruchamianie, odbiór aparatury technologicznej i pomiarowej kupowanej w programach RPO UE oraz PO RPW UE (przygotowywanie wytycznych do przetargów na łączną kwotę ponad 7 000 000 zł).

### 6.3. Udział w projektach

Z większych przedsięwzięć projektowych na szczególne uwagę zasługuje fakt realizacji w KSEiT (w latach 2012-2015) projektu nr PBS1/A3/3/2012 finansowanego przez NCBR w ramach I Programu Badań Stosowanych, z budżetem ponad 5 mln. PLN, w którym habilitant pełnił funkcję kierownika. W wykonanie przedsięwzięcia zaangażowany był 27-osobowy zespół badawczy (12 pracowników badawczych z KSEiT PRz, 2 pracowników badawczych nowo zatrudnionych wyłącznie do realizacji projektu, 3 doktorantów, 8 pracowników badawczych z Wydziału Zarządzania PRz, 2 pracowników badawczych z Politechniki Wrocławskiej) oraz – w ramach oddzielnych umów – Politechnika Wrocławska i przedsiębiorstwo Elmak Sp. z o.o. Rzeszów.

Przedmiotem projektu było opracowanie wielopasmowego, autonomicznego, półpasywnego identyfikatora RFID. W jego konstrukcji zastosowano unikalne mechanizmy pozyskiwania energii z różnych źródeł pola EM, jej przetwarzania, a także gromadzenia na potrzeby realizacji dodatkowych funkcji w systemie RFID. Wyniki badań zostały przedstawione w ponad 100 raportach wewnętrznych, z czego w 81 habilitant był współautorem, a ponadto opracował 2 okresowe raporty merytoryczno-finansowe, rozliczeniowy raport końcowy oraz dwa raporty z wykorzystania wyników projektu.



W projekcie była również rozwijana koncepcja czujnika RFID, na bazie której został opracowany demonstrator bezbaterijnego autonomicznego półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID, stanowiący jedno z oryginalnych osiągnięć habilitanta.

Wkład habilitanta w zrealizowanie oryginalnego osiągnięcia polegał na:

- podejmowaniu działań zmierzających do pozyskania funduszy na realizację badań;
- opracowaniu założeń projektowych obwodu elektronicznego demonstratora;
- opracowaniu założeń konstrukcyjnych wykonania demonstratora w Laboratorium HYBRID, z uwzględnieniem różnych technik wytwarzania układów elektronicznych, w tym przede wszystkim stosowanych w technologii: obwodów drukowanych PCB, elektronicznych struktur na podłożach ceramicznych (w tym LTCC) i elastycznych, druku strumieniowego ink-jet;
- nadzorowaniu procesu wykonania kolejnych wersji demonstratora, w którym zastosowano mechanizmy pozyskiwania energii z różnych źródeł pola elektromagnetycznego, jej przetwarzania, a także gromadzenia na potrzeby realizacji dodatkowych funkcji w zautomatyzowanym systemie;
- koordynowaniu wszystkich prac związanych z projektowaniem, wytwarzaniem i ewaluacją demonstratora;
- analizie wyników i sporządzaniu raportów wewnętrznych,
- poszukiwaniu możliwości zastosowania demonstratora w praktyce.

Wyniki prac nad wielopasmowym, autonomicznym, półpasywnym identyfikatorem RFID oraz opracowanym na jego podstawie demonstratorem bezbaterijnego, autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID były przedmiotem badań ukierunkowanych na wdrożenie. Między innymi zostały zaimplementowane w projekcie PRz (RE-U-17311), realizowanym dla spółki Aluron Zawiercie. Prace te stanowiły badanie przemysłowe w ramach przedsięwzięcia NCBR współfinansowanego ze środków UE w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020. Ich przedmiotem były uwarunkowania syntezy zintegrowanego z obiektem, autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID, przeznaczonego do wykorzystywania w systemie obejmującym proces produkcji, dystrybucji, instalacji, eksploatacji, serwisu/konserwacji i utylizacji paneli fotowoltaicznych.

Ponadto, w latach 2019-2023 część z tych wyników będzie rozwijana w ramach nowego zagadnienia technologicznego „Uwarunkowania syntezy układów mikroelektronicznych w aspekcie propagacji sygnałów i zaburzeń elektromagnetycznych” (opartego również na patencie PRz nr P.420898), które jest finansowane z pozyskanego projektu WEil pn. *Regionalne Centrum Doskonałości Automatyki i Robotyki, Informatyki, Elektrotechniki, Elektroniki oraz Telekomunikacji Politechniki Rzeszowskiej*, finansowanego przez MNiSW w ramach programu „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”.

Wkład habilitanta w zrealizowanie oryginalnego osiągnięcia polegał na:

- podejmowaniu działań zmierzających do zastosowania demonstratora autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID w praktyce, a tym samym do pozyskania funduszy na realizację badań implementacyjnych;
- opracowaniu idei implementacji półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID w systemie obejmującym proces produkcji, dystrybucji, instalacji, eksploatacji, serwisu/konserwacji i utylizacji paneli fotowoltaicznych panelach fotowoltaicznych;
- praktycznym zastosowaniu koncepcji półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID w zeroenergetycznym systemie KWANTUM rozwijanym w ramach projektu naukowo-badawczego z partnerem przemysłowym;



- opracowaniu założeń projektowych dla kolejnych rozwiązań układowych obwodu elektronicznego półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID;
- doborze technologii i nadzorowaniu procesu wykonania kolejnych wersji półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID w Laboratorium HYBRID.

#### 6.4. Współpraca z przemysłem

W ocenianym okresie habilitant kierował 3 projektami badawczo – rozwojowymi z czego 2 były finansowane przez przedsiębiorców, a w projekcie PBS1 (przedstawionym w Roz. 6.3) przedsiębiorca wykonywał znaczące zadanie badawcze. Pierwszy z nich był wykonywany na zlecenie holenderskiej firmy Haikutech Europe i polegał na zaprojektowaniu trójosiowego czujnika przyspieszenia i jego implementacji w technologii LTCC, drugi natomiast był realizowany dla Centrum Konstrukcji Stalowych Leżajsk, a jego celem było opracowanie i weryfikacja koncepcji wykorzystania struktur grubowarstwowych do ogrzewania szklanych przegród budowlanych.

Ponadto, w ocenianym okresie habilitant brał udział w realizacji prawie 20 innych projektów badawczo-rozwojowych finansowanych przez podmioty gospodarcze. Możliwość ich pozyskania wynikała z intensywnej działalności komercyjacyjnej zespołu badawczego KSEiT. Między innymi organizowane były liczne spotkania i prowadzona była wymiana korespondencji elektronicznej z przedstawicielami podmiotów gospodarczych w celu omówienia zagadnień projektowych będących w obszarze ich zainteresowań. Podpisaniem umowy zostały zakończone rozmowy z takimi firmami jak: Polskie Zakłady Lotnicze (Mielec), Centrum Konstrukcji Stalowych (Leżajsk), ARFIDO (Chyby), Masters (Straszyn), Aluron (Zawiercie), Talkin Things (Warszawa), DP System (Łódź), FAKRO (Nowy Sącz), Origintag (Warszawa), At Retail Lab (Warszawa), Kiloherztz (Warszawa), Haikutech Europe BV (Maastricht, The Netherlands), Centrum Telewizji Cyfrowej, Polska Wytwórnia Papierów Wartościowych (Warszawa).

Ponadto realizowano wstępne rozeznanie problematyki badawczej i podejmowano próby nawiązania współpracy z takimi firmami jak: Linetech (Rzeszów), Bury (Niemcy-Lohne/Rzeszów/Mielec), SurgeCloud (Poznań), Aritel Systems (Ruda Śląska), Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo (Rzeszów), Podkarpackie Centrum Innowacji (Rzeszów), GZT Telkom-Telmor (Gdańsk), Business Centre Club (Warszawa), Fibrain (Trzebowniko), Wojewódzki Sąd Administracyjny (Rzeszów), Renex (Włocławek) i inne. Podejmowane próby pozyskania środków finansowych zaowocowały opracowaniem koncepcji i założeń w kilkunastu inicjatywach projektowych obejmujących badania naukowe, rozwojowe lub przemysłowe, które zakończyły się złożeniem wniosku w konkursie lub na etapie formalizowania zakresu badań i formy współpracy pomiędzy partnerami.

Część z działalności badawczej była wykonywana na podstawie ramowych umów o współpracy PRz z partnerami przemysłowymi, w tym z takimi firmami jak:

- Elmak: prowadzenie prac badawczo-rozwojowych, wspieranie procesu dydaktycznego, wymiana informacji o nowych technologiach oraz konsultacje w zakresie EMC, RFID, i technologii elektronicznych;
- CTC: prowadzenie prac badawczo-rozwojowych, wspieranie procesu dydaktycznego, wymiana informacji o nowych technologiach oraz konsultacje w zakresie techniki antenowej;
- EKO-STYL: wymiana informacji o nowych technologiach oraz prowadzenie konsultacji w zakresie techniki radiowej identyfikacji obiektów RFID;



- PWPW: powadzenie prac badawczo-rozwojowych, umożliwiających zwiększenie poziomu bezpieczeństwa produktów PWPW S.A., poprzez zastosowanie nowych technologii wytwarzania elementów techniki RFID.

Wkład habilitanta polegał na:

- realizowaniu umów jako wykonawca lub główny wykonawca;
- prowadzeniu konsultacji zadań projektowych, w szczególności w zakresie technologii hybrydowych układów i urządzeń elektronicznych;
- inicjowanie i przygotowywanie umów z przedsiębiorcami;
- rozliczanie umów, przygotowywanie raportów wewnętrznych lub dla przedsiębiorców.

## 6.5. Działalność organizacyjna – podsumowanie

Od strony organizacyjnej habilitant skupił się przede wszystkim na budowie i rozwoju Laboratorium HYBRID (Roz. 6.2), inicjowaniu współpracy z przemysłem (Roz. 6.4) oraz rozliczaniu formalnym realizowanych projektów badawczo-rozwojowych, ekspertyz i prac zleconych (Roz. 6.3).

Ponadto, habilitant jest aktywnym członkiem kilku towarzystw naukowych: polskiego oddziału IMAPS (International Microelectronics and Packaging Society), IEEE (Electronics Packaging Society PS/CMPT) oraz rzeszowskiego oddziału SEP (Stowarzyszeniu Elektryków Polskich). Na podkreślenie zasługuje fakt, że od 2014 roku pełni funkcję sekretarza PS/CMPT IEEE, od 2018 r. jest sekretarzem Koła SEP przy PRz, a w latach 2008 do 2017 wykonywał prace w Komisji Rekrutacyjnej WEil. Ponadto, w omawianym okresie brał czynny udział w różnych akcjach promujących Uczelnię i obszar współpracy naukowo-przemysłowej Laboratorium HYBRID, angażował się w prace na rzecz uzyskania uprawnień nauczania na kierunku Elektronika i telekomunikacja, pracował w zespołach eksperckich i konkursowych. Aktualnie bierze także czynny udział w pracach wcześniej wspomnianego Konsorcjum EMC-LabNet.

Habilitant jest opiekunem stron internetowych:

- KSEiT: bieżąca modyfikacja zawartości, gruntowna modernizacja połączona z przeniesieniem pod nowy adres (<https://eit.prz.edu.pl/>);
- NCBR PBS1/A3/3/2012: opracowanie i bieżąca modyfikacja zawartości (<https://eit.prz.edu.pl/ncbr-pbs-ii>);
- ZK SEP PRz: opracowanie i bieżąca modyfikacja zawartości (<https://sep.prz.edu.pl/>).

## 6.6. Działalność dydaktyczna

Aktywność dydaktyczna habilitanta dotyczy przede wszystkim opracowania koncepcji, organizacji, pozyskiwania środków finansowych, bieżącej modyfikacji oraz sprawowania opieki nad laboratorium techniki mikroprocesorowej, które w KSEiT jest efektywnie wykorzystywane do realizacji wielu modułów dla różnych kierunków i stopni studiów na WEil. Laboratorium to ma przede wszystkim charakter dydaktyczny, dlatego też bezpośrednio nie są w nim prowadzone badania naukowe. Niemniej jednak na podstawie posiadanych zestawów rozwojowych dla systemów mikroprocesorowych, aktualnie realizowanych jest szereg prac związanych z projektowaniem i wykonywaniem urządzeń elektronicznych, które są niezbędne do prowadzenia doświadczeń w laboratoriach badawczych KSEiT. W obszarze tego laboratorium habilitant realizuje, w języku polskim i angielskim, zajęcia wykładowe, laboratoryjne i projektowe (także dla studentów z programu ERASMUS). W zakresie



prowadzonych przedmiotów habilitant przygotował treści wykładów, opracował wszystkie ćwiczenia i stanowiska dydaktyczne oraz jest koordynatorem odpowiedzialnym za rozliczanie modułów. Aktywność dydaktyczna rozszerza się także na realizację wielu praktycznych prac dyplomowych (21 prac magisterskich i 33 – inżynierskich, przy czym 3 prace zostały wyróżnione w konkursie na najlepszą pracę dyplomową WEil PRz – 2 prace w konkursie organizowanym przez SEP, a jedna w konkursie IEEE), jak również opiekę nad młodymi pracownikami naukowymi, którzy są zatrudniani w grantach badawczych KSEiT (w tym 3 studentów studiów doktorskich w ramach projektu NCBR PBS1/A3/3/2012, 1 student stażysta w ramach projektu PRz / U-17311).

Habilitant był zaangażowany w proces organizacji kształcenia na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki (WEil) PRz studentów na nowo uruchomionym (od 1 października 2005 r.) kierunku Elektronika i telekomunikacja, w którym edukacja została ściśle powiązana z bieżącą działalnością B+R+W KSEiT w obszarach RFID, EMC oraz mikro- i nanotechnologii elektronicznych. Brał udział w akcjach promocyjnych PRz. Prowadził działalność w zakresie popularyzacji nauki przygotowując i wygłaszając referaty, a także prezentując wyniki badań oraz możliwości Laboratorium HYBRID w trakcie licznych spotkań z przedstawicielami przemysłu.

W latach 1997 – 2004 habilitant pracował również, jako nauczyciel przedmiotów elektronicznych w Zespole Szkół Elektronicznych w Rzeszowie, gdzie zdobył stopień nauczyciela mianowanego w szkołach ponadgimnazjalnych, policealnych i pomaturalnych, a także uczestniczył w realizacji projektu pilotażowego CZ/PP-134026 „Sensor” w ramach programu Unii Europejskiej „Leonardo da Vinci”, biorąc udział w opracowaniu trzech podręczników do przedmiotów zawodowych.

Aktywność habilitanta przekraczająca zwykły zakres obowiązków, widoczna w aspekcie zaangażowania w tworzenie procesu edukacji technicznej, skorelowanego na różnych etapach rozwoju młodzieży, została doceniona przyznaniem Medalu Komisji Edukacji Narodowej (2010 r., Nr 119625).

W ramach działalności dydaktycznej habilitant wykonał również następujące istotne zadania:

- opracowanie i modyfikacja treści wykładu i zajęć laboratoryjnych/projektowych oraz przygotowanie procesu zdalnego kształcenia w ramach modułów: Technika mikroprocesorowa, Podstawy techniki mikroprocesorowej, Systemy mikroprocesorowe, Programowalne układy cyfrowe;
- opracowanie i modyfikacja treści wykładu i zajęć laboratoryjnych/projektowych, w języku angielskim, w ramach modułów Microprocessor Technique, Microprocessor systems, Programmable logic devices;
- koordynowanie modułów dydaktycznych – przygotowanie dokumentacji 20 modułów w języku polskim oraz 20 modułów w języku angielskim (w systemie KRK);
- współudział w pracach nad programem studiów na kierunku Elektronika i telekomunikacja (WEil);
- stała opieka nad dydaktycznym laboratorium techniki mikroprocesorowej;
- opieka nad studentami stażystami w KSEiT.

## 6.7. Osiągnięcia w zakresie popularyzacji nauki

Oprócz wyżej wymienionych przedsięwzięć mających niewątpliwie wpływ na rozwój i postrzeganie KSEiT w środowisku naukowym, habilitant podejmował również inną



działalność popularyzatorską. Między innymi przygotował i zaprezentował wystąpienia popularno naukowe:

- wykład nt. „Zintegrowana technologia hybrydowa w obszarze działalności Zakładu”, Seminarium Techniczne zorganizowane przez SEP oddział Rzeszów z okazji Międzynarodowego Dnia Elektryki 2014 i roku Kazimierza Szpotańskiego; Rzeszów - Rudna Mała, 2014.06.18.;
- wykład multimedialny nt. „Świat elektroniki i informatyki, z zakresu techniki mikroprocesorowej”, w ramach programu Politechnika Dziecięcą; Rzeszów, 2010.04.24;
- wystawa nt. „Zastosowanie techniki RFID w obszarze aktywności społeczno-gospodarczej”, autorstwa Jankowski-Mihułowicz P., Węglarski M., Konferencja pt. „Rola Oddziałów Terenowych TVP S.A. w rozwoju społeczeństwa informacyjnego”, Rzeszów, 2013.06.18 (charakter udziału habilitanta: prezentacja stanowiska do wizualizacji zawartości elektronicznego koszyka z produktami szybko rotującymi (FMCG), które będą w przyszłości znakowane identyfikatorami EPC RFID w światowych łańcuchach dostaw).

Habilitant wielokrotnie podejmował delegacje instytucji państwowych i przedsiębiorstw oraz przygotowywał wizyty przedstawicieli różnych branż w Laboratorium HYBRID, gdzie prezentował wyniki badań w zakresie zintegrowanej mikro- i nanotechnologii elektronicznej oraz prowadzonej współpracy KSEiT PRz z przemysłem. Wykaz wybranych prezentacji przeprowadzonych w Laboratorium HYBRID:

- grupa przedstawicieli ponad dwudziestu firm z województwa podkarpackiego, małopolskiego, świętokrzyskiego i lubelskiego oraz pracownicy PRz biorący udział w seminarium EMC zorganizowanym przez Würth Elektronik Polska i KSEiT PRz pod patronatem Dziekana WEil PRz oraz Polskiej Sekcji IEEE EMC-S; Rzeszów, 2017.03.09 oraz 2015.05.12;
- grupa przedstawicieli Stowarzyszenia Elektryków Polskich; Rzeszów, 2014.11.30;
- grupa przedstawicieli Sikorsky Aircraft Corporation z USA i PZL Mielec Sp. z o.o.; Rzeszów 2014.09.25;
- grupa uczestników 5th EuroTraining Train-the-Trainers „Nanotechnology for Electronics” course; Rzeszów, 2014.09.25;
- grupa przedstawicieli mediów z województwa podkarpackiego; Rzeszów 2014.06.09.

W ramach promocji uczelni i popularyzacji nauki habilitant wykonał działania:

- współorganizacja oficjalnego otwarcia zespołu laboratoriów badawczych EMC+RFID+HYBRID WEil PRz;
- przygotowanie polskiej i angielskiej wersji ulotki informacyjnej o działalności naukowo-badawczej i dydaktycznej KSEiT PRz;
- współudział w tworzeniu ankiety jednostki (KSEiT) w procesach akredytacyjnych kierunków Elektrotechnika oraz Elektronika i telekomunikacja (w latach 2009, 2011, 2013, 2018);
- członek Komisji Rekrutacyjnej WEil PRz w latach 2008-2017;
- prowadzenie akcji promocyjnych związanych z rekrutacją studentów.

Habilitant intensywnie poszukiwał środków finansowych na prowadzoną działalność naukową biorąc udział w przygotowaniu koncepcji i założeń w kilkunastu inicjatywach projektowych obejmujących badania naukowe, rozwojowe lub przemysłowe, które

zakończyły się złożeniem wniosków w konkursach lub na etapie formalizowania zakresu badań i formy współpracy pomiędzy partnerami.

Habilitant przygotował i wygłosił ponad 15 seminariów naukowych w KSEiT PRz, w tym między innymi na temat:

- zeroenergetycznego systemu KWANTUM; 2018.07.20 i 2018.09.11;
- autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID; 2018.09.11, 2017.11.22, 2015.01.21, 2014.05.21, 2012.12.12;
- wyrobów tekstronicznych z interfejsem RFID; 2017.04.26;
- implementacji autonomicznego, półpasywnego identyfikatora-czujnika RFID w panelach fotowoltaicznych; 2017.10.11;
- zintegrowanej technologii elektronicznej; 2014.06.18, 2012.12.19.



## Bibliografia

- 1) Kalita W., Jankowski-Mihułowicz P., Skoczylas M., **Węglarski M.**: *System autonomicznej lokalizacji bezkolizyjnego sterowania ruchem obiektów mobilnych w przestrzeni z przeszkodami z wykorzystaniem radiowej identyfikacji obiektów*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, nr patentu: PL 220427 B1, nr zgłoszenia: P.389862, data zgłoszenia: 2009.12.11, data udzielenia: 2014.12.08, własność: Politechnika Rzeszowska.
- 2) Kalita W., Skoczylas M., Węglarski M.: *The Use of RFID Transponders Equipped with Built-in Sensors in Navigation Systems*, Przegląd Elektrotechniczny, ISSN: 0033-2097, No. 2b, pp. 234-239, 2013.
- 3) Jankowski-Mihułowicz P., **Węglarski M.**: *Tekstroniczny identyfikator RFID*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, nr patentu: PL 231291 B1, nr zgłoszenia: P.420898, data zgłoszenia: 2017.03.19, data udzielenia: 2018.10.04, własność: Politechnika Rzeszowska.
- 4) Zgłoszenie ochrony wynalazku: Jankowski-Mihułowicz P., Pyt P., **Węglarski M.**: *Aktywna podłoga oraz spersonalizowany system sterowania wykorzystujący aktywną podłogę*, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej, nr zgłoszenia: P.428157, data zgłoszenia: 2018-12-13, własność: Politechnika Rzeszowska.
- 5) Finkenzeller K.: *RFID Handbook – Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*, 3rd Ed., Wiley, 2010.
- 6) GS1 EPCglobal: *EPC Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID; Specification for RFID Air Interface Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz*, ver. 2.0.1, April 2015.
- 7) ISO/IEC 18000-63: *Information technology -- Radio frequency identification for item management -- Part 63: Parameters for air interface communications at 860 MHz to 960 MHz Type C*, 2015.
- 8) Microchip: *SL13A–Smart Label Chip with Sensor–Datasheet*, IDS Microchip AG, 2008.
- 9) Microchip: *SL900A–EPC Class 3 Chip with Sensor–Summary Datasheet*, IDS Microchip, 2010.
- 10) Lee C. W., Lee S. J., Kim M., Kyung Y., Eom K.: *Capacitive humidity sensor tag smart refrigerator system using the capacitive to voltage converter (CVC)*, in *International Journal of Science and Advanced Technology*, pp. 15–26, 2011.
- 11) Cartasegna D., Cito A., Conso F., Donida A., Grassi M., Malvasi L., et al.: *Smart RFID label for monitoring the preservation conditions of food*, in *Sensors and Microsystems*, vol. 54 of *Lecture Notes in Electrical Engineering*, pp. 381–385, Springer, Berlin, Germany, 2010.
- 12) Tani A., Ugaji M., Yamabe Y.: *A building structural performance monitoring system using RFID tag with sensors*, in *Proc. of the International Conference on Computing in Civil Building Engineering*, p. 441, 2010.
- 13) Oprea A., Courbat J., Bârsan N., Briand D., de Rooij N. F., Weimar U.: *Temperature, humidity and gas sensors integrated on plastic foil for low power applications*, *Sensors and Actuators B*, vol. 140, no. 1, pp. 227–232, 2009.
- 14) Jankowski-Mihułowicz P., Kalita W., **Węglarski M.**: *Autonomous sensor with RFID interface*, *Elektronika*, ISSN: 0033-2089, Vol. 3, pp. 18-22, 2015.

- 15) Sample A. P., Braun, J., Parks A., Smith, J. R.: *Photovoltaic enhanced UHF RFID tag antennas for dual purpose energy harvesting, RFID*, IEEE International Conference, pp. 146-153, 2011.
- 16) Belleville M., Fanet H., Fiorini P., Nicole P., Pelgrom M.J.M., Piguët C., Hahn R., Van Hoof C., Vullers R., Tartagni M., Cantatore E.: *Energy autonomous sensor systems: Towards a ubiquitous sensor technology*, Microelectronics Journal 41, pp. 740–745, 2010.
- 17) Gummeson J., Clark S. S., Fu K., Ganesan D.: *On the Limits of Effective Hybrid Micro-Energy Harvesting on Mobile CRFID Sensors*, MobiSys, San Francisco, California, USA, 2010.
- 18) ST-Microelectronics: *M24LR16E-R product specification*, Dec. 2011.
- 19) ST-Microelectronics: *M24LR64E-R–Data Sheet*, Doc. ID 15170 Rev 14, 2012.
- 20) PowerCast: *P2110–915 MHz RF Powerharvester Receiver*, Datasheet, Rev A, 2010/04, 2010.
- 21) Omairi A., Ismail Z. H., Danapalasingam K. A., Ibrahim M.: *Power Harvesting in Wireless Sensor Networks and Its Adaptation With Maximum Power Point Tracking: Current Technology and Future Directions*, IEEE Internet Of Things Journal, vol. 4, no. 6, pp. 2104-2115, Dec. 2017.
- 22) Jankowska-Mihułowicz M., Chudy-Laskowska K.: *Cognitive limitations in making investment decisions in Polish enterprises*, Proc. 7th Int. Conf. Economic Challenges in Enlarged Europe, A. Hazak (Ed.), Tallinn, Estonia, pp. 1–15, 2015.
- 23) Jankowska-Mihułowicz M., Gębarowski M., Ziółkowski B. Chudy-Laskowska K.: *Determinants of investment decision-making in the RFID area in Poland*, Proc. 7th Int. Conf. Economic Challenges in Enlarged Europe, A. Hazak (Ed.), Tallinn, Estonia, pp. 1–15, 2015.
- 24) Slosarczyk S., Vehec I., Kalita W., Bauer R., Sabat W.: *3Dtvarovany modul s integrovanyim sensorom tlaku*, The AAPS Journal, pp. 228–230, 2007.
- 25) Marrocco G.: *The art of UHF RFID antenna design: impedance-matching and size-reduction techniques*, IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 50, no. 1, pp. 66 – 79, 2008.
- 26) Dang M.C., Nguyen D.S., Dang T.M.D., Tedjini S., Fribourg- Blanc E.: *Design and testing of RFID sensor tag fabricated using inkjet-printing and electrodeposition*, Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology, vol. 5, No. 025012, 2014
- 27) Loyer J., Kunze R., Ye X.: *Fiberweave Effect: Practical Impact Analysis and Mitigation Strategies*, In Proc. of DesignCon, pp. 944–971, 2007.
- 28) IPC-TM-650, *Test Method Manual, Section 2.5 – Electrical Test Methods*, Nov. 2014.
- 29) Garg R., Bahl I., Bozzi M.: *Microstrip Lines and Slotlines*, 3 rd ed., Artech House, 2013.
- 30) Kronberger R., Geissler A., Friedmann B.: *New methods to determine the impedance of UHF RFID chips*, Proc. IEEE Inter. Conf. RFID, pp. 260–265, 2010.
- 31) Rudander J. H., Ikram-e-Khuda, Kildal P. S., Orlenius C.: *Measurements of RFID tag sensitivity in reverberation chamber*, IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 10, pp. 1345–1348, 2011.
- 32) Wei P, Che W, Bi Z, Wei C, Na Y, Qiang L, Hao M.: *High-efficiency differential RF frontend for a Gen2 RFID tag*, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 58(4), pp. 189-194, 2011.



- 33) Agilent: *In-Fixture Measurements Using Vector Network Analyzers*, AN 1287-9, 5968-5329E, Santa Clara: Agilent Technologies, 2006.
- 34) Parini C., Gregson S., McCormick J., van Rensburg D. J.: *Theory and Practice of Modern Antenna Range Measurements*, Stevenage: IET, 2014.
- 35) Ukkonen L., Sydanhelmo L.: *Threshold power-based radiation pattern measurement of passive UHF RFID tags*, In: *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, Cambridge, USA, pp. 87-90, 2010.
- 36) Abdulhadi A.E., Abhari R.: *Design and experimental evaluation of miniaturized monopole UHF RFID tag antennas*, *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 248-251, 2012.
- 37) Bridelall R., Hande A.: *Novel RFID technologies: energy harvesting for self-powered autonomous RFID systems*, in *RFID Systems: Research Trends and Challenges*, M. Bolić, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenović, Eds., pp. 473–495, Wiley, New York, NY, USA, 2010.
- 38) Jankowski-Mihułowicz P.: *Synthesis of read/write device antenna for HF long range RFID systems with inductive coupling*, *Electronics*, no. 8, pp. 73–77, 2010.
- 39) Se-gon Roh, Hyouk Ryeol Choi: *3-D Tag-Based RFID System for Recognition of Object* *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 6/1, pp. 55-56, 2009.
- 40) Kroese D. P., Taimre T., Botev Z. I.: *Handbook of Monte Carlo Methods*, Wiley, 2011.
- 41) **Węglarski M.**: *Wyznaczanie cieplnych własności komponentów mikroukładu grubowarstwowego na podstawie identyfikacji dynamicznych zmian pola temperatury*, rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, 2005.
- 42) Kalita W., Wałach T., **Węglarski M.**, Piotrowski J., Rzeczkowski M., Paliwoda R., Brudnowski M.: *Ultrafast Measurement of Temp. Changes of Microcircuit Components*, 25th International Conference IMAPS – Poland, Polańczyk, pp. 255-260, 2001.
- 43) Bład G., Kalita W., Klepacki D., Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J.: *Badania niezawodnościowe rezystorów grubowarstwowych pracujących w reżimie impulsowym*, IX Konferencja Naukowa „Technologia Elektronowa” ELTE, Stare Jabłonki, 2004.
- 44) Bład G., Klepacki D., Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J.: *Pole temperatury powierzchni czujnika gazu z grzejnikami impulsowymi*, IX Konferencja Naukowa „Technologia Elektronowa” ELTE, Stare Jabłonki, 2004.
- 45) Kalita W., Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J.: *Identyfikacja dynamicznych stanów temperatury w mikroukładach grubowarstwowych*, IX Konferencja Naukowa „Technologia Elektronowa” ELTE, Stare Jabłonki, 2004.
- 46) Kalita W., Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J.: *Wyznaczanie iloczynu  $r \cdot cP$  warstwy rezystywnej rezystora grubowarstwowego na podstawie identyfikacji dynamicznych zmian pola temperatury*, III Krajowa Konferencja Elektroniki KKE, Kołobrzeg, Vol. II, pp. 467-472, 2004.
- 47) Kalita W., Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J.: *Wyznaczanie energii impulsów mikrosekundowych w badaniach dynamicznych stanów temperatury w mikroukładach grubowarstwowych*, III Krajowa Konferencja Elektroniki KKE, Kołobrzeg, Vol. II, pp. 571-576, 2004.
- 48) Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J., Wolańczyk F.: *Identyfikacja własności cieplnych rezystorów grubowarstwowych*, XII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy SWCiM, Kraków, pp. 721-731, 2004.

- 49) Smusz R., **Węglarski M.**, Wilk J.: *Odpowiedź temperaturowa układu grubowarstwowego na wymuszenie impulsowe*, XII Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy SWCiM, Kraków, pp. 787-794, 2004.
- 50) Błąd G., Klepacki D., Kalita W., Różak F., Smusz R., **Węglarski M.**: *Modelling of Dynamic Temperature States in Layer Microelectronics Systems*; 29th International Spring Seminar on Electronic Technology ISSE, St. Marienthal, Germany, pp. 248-253, 2006.
- 51) Kalita W., **Węglarski M.**, Slosarčik S.: *Convention Mechanism of Heat Transfer in Layer Microelectronic Components*, V International Symposium MTM, Pitești, Romania, June 7-9, 2001, pp. 50-55.
- 52) Kalita W., **Węglarski M.**, Slosarčik S.: *Method of measurement of thermal conductivity of resistive layers in thick – film structure*, Journal of Electrical Engineering, 2001, Vol. 52, Iss. 11-12, pp. 372-375.
- 53) Kalita W., **Węglarski M.**, Slosarčik S.: *Influence of Dynamic Temperature States on Degradation Processes in Thick-film Resistors*, Proceedings of XXIV International Conference IMAPS – Poland, Rytro, September 25-29, 2000, pp. 187-192.
- 54) Kalita W., **Węglarski M.**, Slosarčik S.: *Analysis of temperature dynamic states in thick-film resistor*, 4-th International Symposium on Microelectronic Technologies and Microsystems, Zwickau, October 26-27, 2000, pp. 100-105.
- 55) Kalita W., **Węglarski M.**, Slosarčik S.: *Analysis of Substrate Dimensions on Differentiation of Temperature Field in Hybrid Microcircuits*, Journal of Electrical Engineering/Elektrotechnicky casopis, 2000, Vol. 51, Iss. 11-12, pp. 307-311.
- 56) Kalita W., **Węglarski M.**, Slosarčik S.: *Influence of Substrate Dimensions on Differentiation of Temperature Field in Hybrid Microcircuits*, 23rd International Conference IMAPS – Poland, Kołobrzeg, pp. 331-336, 1999.
- 57) Patent nr SK 38-2012 A3, przyznany w dniu 2015.04.28 (Banska Bystrica, Slovenska Republika) na wynalazek pt. „Sposob vyroby chladiacich kanalikov na rozhrani korundovy substrat – 3D LTCC struktura”, autorstwa Slosarcik Stanislav, Cabuk Pavol, Dovica Miroslav, Kalita Włodzimierz, **Węglarski Mariusz**, Technicka univerzita v Kosiciach, nr zgłoszenia PP 38-2012 z dnia 2012.05.23.
- 58) Cież M., Gandurska J., Grzesiak W., Początek J., Witek K., Kalita W., **Węglarski M.**, Koprowski J.: *High Loaded Thick-Film Resistors on Steel Substrates*, 26th International Conference IMAPS – Poland, Warszawa, pp. 126-129, 2002.
- 59) Nowak D., Dziedzic A., Żaluk Z., Roguszczyk H., **Węglarski M.**: *Mechanical properties of SMD interconnections on flexible and rigid substrates*, Soldering & Surface Mount Technology, ISSN: 0954-0911, Vol. 28, Iss 1, pp. 27–32, 2016.
- 60) **Węglarski M.**; Jankowski-Mihułowicz P.; Pitera G.; Jurków D.; Dorczyński M.: *LTCC Flow Sensor with RFID Interface*. Sensors, ISSN: 1424-8220, Vol. 20, No. 1, 268, 2020.

  
Podpis wnioskodawcy