

**Wojciech Wojtasiak**

Instytut Radioelektroniki  
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych  
Politechnika Warszawska

AUTOREFERAT

**1. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania, tytułu rozprawy doktorskiej i nazwisk osób, które pełniły funkcje promotora i recenzentów:**

1984 – mgr inż. Elektroniki, Politechnika Warszawska

1998 – doktor nauk technicznych, Politechnika Warszawska, na podstawie rozprawy:

Wykorzystanie własności fazowych niejednorodnych przewodnic falowych w projektowaniu układów mikrofalowych, z wyróżnieniem;

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusza Morawskiego,

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Bogdan Galwas, prof. dr hab. inż. Edward Sędek,

**2. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:**

01.01.1985 – pracownik naukowo-badawczy, Instytut Technologii Elektronowej,  
Wydział Elektroniki, Politechnika Warszawska

01.10.1987 – asystent, Instytut Radioelektroniki, Wydział Elektroniki, Politechnika Warszawska

01.10.1995 – wykładowca, Instytut Radioelektroniki, Wydział Elektroniki, Politechnika Warszawska

01.05.1998 – adiunkt, Instytut Radioelektroniki, Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych,  
Politechnika Warszawska

**3. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego istotny wkład w rozwój dyscypliny elektronika zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.)**

**3a) Niniejszym przedstawiane jest osiągnięcie naukowe pt.:**

**Nowe rozwiązania układowe i konstrukcyjne mikrofalowych modułów nadawczych i odbiorczych specjalnego przeznaczenia.**

Przyjmuje się, że osiągnięcie to spełnia warunek wymieniony w art.16 ust. 2 Ustawy to znaczy stanowi: "zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne". W skład przedstawianego osiągnięcia wchodzi dwanaście konkretnych nowatorskich realizacji projektowych i wdrożeń, które wymieniono w p.3b. W p.3c wskazano publikacje habilitanta odnoszące się do zakresu tematycznego dotyczącego osiągnięć z p.3b. Należy jednak podkreślić, że zakłada się, że częściowo ma tu zastosowanie art.16 ust. 3 Ustawy stwierdzający, że "Obowiązek publikacji nie dotyczy osiągnięć, których przedmiot jest objęty ochroną informacji niejawnych". Taka sytuacja występowała w odniesieniu do projektów wykonywanych w zakresie obronności i bezpieczeństwa oraz zastrzeżeń niektórych firm. Niejawność tych rozwiązań ograniczała możliwości publikacyjne, szczególnie w międzynarodowych mediach naukowych. Dlatego, publikacje wymienione w p.3c należy traktować jako osiągnięcie uzupełniające w stosunku do osiągnięcia podstawowego w postaci zrealizowanych przedsięwzięć konstrukcyjnych i technologicznych. W punkcie 4 uzasadniono uznanie rozwiązań oraz publikacji cytowanych odpowiednio w p.3b i p.3c za nowatorskie w odniesieniu do podobnych rozwiązań stosowanych we współczesnej technice.

**3b) Wykaz projektów i wdrożeń przemysłowych (kierownik i wykonawcy, tytuł projektu, czas trwania, zleceniodawca oraz informacja o wdrożeniu, rola i wkład habilitanta)**

1. **W. Wojtasiak** (kierownik), Daniel Gryglewski, Tadeusz Morawski, "**Mikrofalowe źródła szumów**", 1999÷2002, zleceniodawca i wdrażający: Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Projekt i praktyczna realizacja wraz z pomiarami wzmacniaczy szumów (cw) o mocy wyjściowej 12W w pasmie L i 10W w pasmach S i C o względnej szerokości pasma 14%, wzmacnieniu 30÷36dB, wymagana stałość parametrów w szerokim zakresie temperatur – spełniona norma IP67
2. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, **Projekt nadajnika w ramach programu modernizacji zestawu raketowego "Newa"** - kierownik, 1998÷2000, zleceniodawca i wdrażający: Wojskowe Zakłady Elektroniczne  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Projekt modulatora i wzmacniacza na pasmo L o mocy wyjściowej 20W (cw), wzmacnieniu 40 dB i bardzo dużej liniowości dla nadajnika komend sterowania rakieta
  - Projekt wzmacniacza klasy C impulsów zapytania na pasmo L o mocy wyjściowej 0.7kW, wzmacnieniu 47 dB, czasy narastania i opadania zboczy impulsu mniej niż 100ns
  - Udział w pomiarach i testach
3. **W. Wojtasiak**, "**Wzmacniacz mocy nadajnika dla miniaturowego systemu IFF**", 2000r., zleceniodawca i miejsce wdrożenia: RADWAR Warszawa  
Był to autorski projekt habilitanta (udział 100%) i obejmował:
  - Projekt impulsowego wzmacniacza klasy C na pasmo IFF o mocy wyjściowej 160W
4. **W. Wojtasiak** (główny wykonawca), D. Gryglewski i Wojciech Gwarek (kierownik) "**Źródło precyzyjnego grzania mikrofalowego**", 2000÷2001. Zleceniodawca i wdrażający: Personal Chemistry (Szwecja). Urządzenie stosowano w testach przemysłowych dotyczących opracowania nowych leków.  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Opracowanie koncepcji źródła grzania mikrofalowego
  - Projekt, wykonanie i pomiary wielostopniowego wzmacniacza o mocy wyjściowej 20W w zakresie częstotliwości 2.4÷2.6GHz
  - Badania kompletnego urządzenia
5. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, Ryszard Michnowski, T. Morawski, "**Moduły N/O na pasma L i C do radaru z elektronicznie sterowaną wiązką**", 2001÷2003, Zleceniodawca i miejsce wdrożenia: Przemysłowy Instytut Telekomunikacji (PIT-RADWAR)  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Opracowanie koncepcji i architektury taniego modułu N/O
  - Projekt i wykonanie wzmacniaczy toru nadawczego o mocach wyjściowych 100W i 4/20W odpowiednio w pasmie L i C o dużej stałości transmitancji w trakcie impulsu sondującego
  - Projekt układów zabezpieczenia toru odbiorczego – ograniczniki
  - Wykonanie pomiarów w/w podzespołów i kompletnych modułów N/O
6. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, R. Michnowski, T. Morawski, "**Generator częstotliwości podstawowej do klistronu**", 2002. Zleceniodawca i jednostka wdrażająca: Narodowe Centrum Badań Jądrowych. Urządzenie wykorzystano do sterowania klistronem zasilającym akcelerator.  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Opracowanie architektury generatora
  - Projekt modulatora i wzmacniacza impulsowego o mocy wyjściowej 300W w pasmie S

7. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, "**Nadajnik radiolinii na pasmo 1.3÷2.7GHz**", 2003. Zleceniodawca: Microwave System Poland (Ericsson, Szwecja).  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Projekt i realizacja szerokopasmowego, wielostopniowego, liniowego wzmacniacza o mocy wyjściowej 20W i wzmocnieniu 25dB w pasmie 1.3÷2.7GHz, praca w temperaturze otoczenia do 90°C
  - Udział w pomiarach nadajnika
8. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, W. Gwarek, Przemysław Korpas, "**Źródła precyzyjnego grzania mikrofalowego na pasmo 2.35÷2.6GHz**", 2004÷2009, zleceniodawca: Whirlpool Corp. (Szwecja) - wykonano i dostarczono 6 szt. źródeł wdrożonych w pracach badawczych nad nowymi technikami grzania mikrofalowego.  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Opracowanie koncepcji mikrofalowego źródła grzania
  - Projekt i wykonanie wielostopniowego wzmacniacza o mocy wyjściowej 100 W i 200 W (cw) z regulacją w zakresie 20dB dynamiki z krokiem 1dB
  - Zaprojektowanie układu pomiaru strat odbicia i mocy wyjściowej
  - Udział w pomiarach i kalibracji źródła
9. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, W. Gwarek, "**Źródło precyzyjnego grzania mikrofalowego (860÷960MHz)**", 2004. Zleceniodawca: RAUTE Oyj, Finlandia. Wdrożono jako aparaturę testową dla przygotowania urządzeń wielkiej mocy dla przemysłu drzewnego.  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Projekt koncepcji źródła
  - Opracowanie, wykonanie i pomiary wielostopniowego wzmacniacza na pasmo 860÷960MHz o mocy wyjściowej 100 W (cw) regulowanej od 4W do 100W z krokiem 1dB
  - Skonstruowanie układu pomiaru mocy padającej i odbitej
  - Udział w kalibracji i testach urządzenia
10. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, D.W. Rosołowski, "**Transwertery WLAN**", 2005÷2014. Zleceniodawcy: Wojskowy Instytut Łączności, MediaCom.net, Radiotechnika Marketing Wdrożenie do zastosowań specjalnych.  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Opracowanie koncepcji transwertera WLAN
  - Pomysł rozwiązania układowego
  - Projekt i realizacja toru nadawczego – wzmacniacze mocy z kompensacją temperaturą
  - Udział w badaniach transwertera
11. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, D W. Rosołowski, "**Konwersja pasm pracy sieci radiowych dostępu abonenckiego punkt-wielopunkt**", 2005÷2014. Zleceniodawca i miejsce wdrożenia: El-net, NETIA, MNI Telecom - wdrożono w sieciach radiowych dostępu abonenckiego w ponad 100 lokalizacjach. Było to wysoko cenione nowatorskie rozwiązanie pozwalające na nisko-kosztową konwersję pasma dla operatorów telefonii publicznej zmuszonych do zmiany częstotliwości roboczych ze względu na przepisy państwowe.  
Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
  - Pomysłodawca konwersji pasm pracy radiowych systemów dostępu abonenckiego punkt-wielopunkt z zakresu 2.4GHz do 3.5GHz
  - Opracowanie koncepcji rozwiązania układowego i konstrukcyjnego transwertera FDD
  - Projekt i wykonanie toru nadawczego – wzmacniacze mocy z kompensacją wpływu temperatury

- Udział w uruchamianiu podzespołów bloku konwersji
  - Udział w badaniach łączności radiowych z transwerterami
12. **W. Wojtasiak** (kierownik), D. Gryglewski, D.W. Rosołowski, "**Generator częstotliwości podstawowej do akceleratora liniowego**", 2013, zleceniodawca: Narodowe Centrum Badań Jądrowych
- Indywidualny udział habilitanta oceniany jest na 50%. Obejmował on następujące zadania:
- Projekt i wykonanie impulsowego wzmacniacza o mocy wyjściowej 250W i wzmocnieniu 40dB w pasmo S
  - Opracowanie układu do pomiaru poziomu mocy wyjściowej
  - Udział w uruchamianiu i testowaniu generatora

### 3c) Wykaz oświadczeń firm zlecających i wdrażających

- [1S] Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojeni, *Mikrofalowe źródła szumów*
- [2S] PIT-RADWAR S.A., *Moduły N/O, wzmacniacze na pasmo L i IFF, odbiornik radaru śledzącego*
- [3S] NETIA S.A., *Konwersja pasm pracy radiowych systemów dostępu abonenckiego IRT2000 i A9800*
- [4S] MNI Centrum Usług S.A. *Konwersja pasm pracy systemu radiodostępu abonenckiego DRMASS*
- [5S] Wojskowy Instytut Łączności, *Konwerter 2.45GHz ↔ 4.4GHz*
- [6S] MEDIACOM.NET, *Modemy radiowe specjalnego przeznaczenia*
- [7S] Radiotechnika Marketing sp. z o. o., *Radiomodemy, transwertery WLAN, wzmacniacze mocy dla Sił Zbrojnych*
- [8S] Whirpool, Sweden AB, *Mikrofalowe źródła precyzyjnego grzania*
- [9S] Narodowe Centrum Badań Jądrowych, *Generatory częstotliwości podstawowej dla akceleratora liniowego*
- [10S] Instytut Technologii Elektronowe (Konsorcjum PolHEMT), *Polski mikrofalowy tranzystor mocy GaN HEMT na potrzeby radiolokacji*

### 3d) Wykaz publikacji naukowych (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, nazwa czasopisma, tom, strony)

- [1A] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, P. Kopyt, J. Żurkowski, "*Układ przemiany częstotliwości toru nadawczego radaru impulsowego na pasmo Ku*", Przegląd Elektrotechniczny, 2012, vol. 88, no. 11b, pp. 14-17.  
(*Mój wkład: opracowanie koncepcji rozwiązania układowego, zaprojektowanie, wykonanie i pomiary toru nadawczego bloku przemiany. Projekt w/w elementów wspomagany był symulacjami i pomiarami dla wyboru optymalnego rozwiązania. Ponadto zredagowałem ostateczną wersję artykułu. Udział szacuję na 40%.*)
- [2A] A. Taube, E. Kamińska, M. Kozubał, J. Kaczmarski, A. Barcz, W. Wojtasiak, J. Dyczewski, E. Dynowska, M. A. Borysiewicz, M. Ekielski, M. Juchniewicz, J. Grochowski, P. Prystawko, M. Zajęc, R. Kucharski, and A. Piotrowska, "*Ion Implantation for Isolation of AlGaIn/GaN HEMTs Using C or Al*", Journal Physica Status Solidi A: Applications and Materials Science; the manuscript number for submission is pssa.201431724, 2014  
(*Mój wkład: projekt konstrukcji tranzystorów GaN HEMT, wykonanie pomiarów charakterystyk DC I-V i macierzy rozproszenia w pasmie do 24GHz struktur wytworzonych w ITE, opis osiągniętych wyników i redakcja części prezentującej uzyskane rezultaty. Udział oceniam na 10%*)

**Publikacje w recenzowanych czasopismach zagranicznych lub polskich spoza listy filadelfijskiej (lista MNiSzW)**

- [1B] W. Wojtasiak, "Tranzystory mikrofalowe - technologia, parametry i zastosowania", Elektronika-Konstrukcje-Technologie-Zastosowania, 2002, no. 7-8, pp. 32-34
- [2B] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, E. Sędek, "T/R Modules for APAR", Elektronika-Konstrukcje-Technologie-Zastosowania, 2009, no. 4, pp. 56-63,  
(Mój wkład: pomysł i przewodnia myśl artykułu, przegląd stanu techniki w odniesieniu do zrealizowanych przez autorów w Instytucie Radioelektroniki PW modułów N/O do APAR i ostateczna redakcja. Udział szacuję na 40%.)
- [3B] P. Kopyt, D. Gryglewski, W. Wojtasiak, W. Gwarek, "Termiczny model tranzystora HEMT na podłożu GaN/SiC", 2013, no. 9 pp. 22-25.  
(Mój wkład: pomoc przy modelowaniu termicznym tranzystora HEMT oraz ostateczna korekta artykułu. Udział szacuję na 20%).
- [4B] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, E. Sędek, "100 W class A power amplifier for L-band T/R module", Journal of Telecommunications and Information Technology 2002, no 1. pp. 11-13  
(Mój wkład: koncepcja artykułu, projekt, wykonanie i pomiary wzmacniacza o mocy wyjściowej 100W, prezentacja osiągniętych wyników wraz z końcową redakcją. Udział szacuję na 40%.)
- [5B] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, W. Gwarek, " A 100W ISM-2.45GHz Band Power Test System", pp. 23-27", Journal of Telecommunications and Information Technology 2005, no 2. pp. 23-27  
(Mój wkład: pomysł formy artykułu, opracowanie architektury całego sytemu oraz projekt, wykonanie i badania poszczególnych stopni i całego wzmacniacza o mocy 100W – kluczowego elementu zestawu. Opisanie w/w dzieł i redakcja artykułu. Udział szacuję na 50%.)
- [6B] W. Wojtasiak, "The Electro-thermal Modeling of High Power Microwave FET and its Applications", Kwartalnik Elektroniki i Telekomunikacji 2005, Vol. 51, pp. 85-104.
- [7B] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "Metody modyfikacji warstwy radiowej systemów bezprzewodowych sieci abonenckich i wymiany danych", Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne 2010, vol. LXXIX, no. 12, pp. 1716-1723  
(Moim dziełem jest: pomysł i koncepcja artykułu, przegląd możliwości modyfikacji warstwy radiowej systemów telekomunikacyjnych m.in. na przykładach wykonanych przez autorów urządzeń i wdrożonych w sieciach bezprzewodowych, korekta i redakcja. Udział szacuję na 60%.)
- [8B] W. Wojtasiak, D. W. Rosołowski, "Ewolucja urządzeń nadawczych i odbiorczych systemów łączności bezprzewodowej w pasmach mikrofalowych", referat plenarny Krajowej Konferencji KKRRiT 2013, wersja poszerzona: Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne 2013, vol. LXXXII, no. 6, pp. 173-179  
(Mój wkład: pomysł i koncepcja artykułu, opis ewolucji systemów łączności bezprzewodowej na przełomie wieków XX i XXI na przykładach podanych w literaturze i doświadczeń zebranych w trakcie realizacji projektów z zakresu tej problematyki. Redakcja i korekta. Udział szacuję na 70%.)
- [9B] D. Gryglewski, D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, "Mobilny mikrotranswerter TDD", Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, 2014, no. 6, pp. 656-649  
(Mój wkład: projekt wspomagany symulacjami i pomiarami podzespołów toru nadawczego, wykonanie, zbadanie i opisanie w/w prac. Końcowa korekta artykułu. Udział szacuję na 40%.)
- [10B] P. Korpas, D. Gryglewski, W. Wojtasiak, W. Gwarek, "A Computer-controlled System of High Power Microwave Sources", International Journal of Electronics and Telecommunications 2011, no. 3, vol. 57 pp. 121-126  
(Mój wkład: pomysł formy artykułu, opracowanie koncepcji i architektury sytemu oraz projekt, realizacja, badania wzmacniacza mocy wraz z opisem osiągniętych wyników. Ostateczna korekta. Mój udział szacuję na 40%.)

- [11B] D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "27 dBm Microwave Amplifiers with Adaptive Matching Networks", International Journal of Electronics and Telecommunications 2011, no. 3, vol. 57 pp. 103-108

*(Mój wkład: pomysłodawca artykułu, opracowanie i opis modelu tranzystora wraz z weryfikacją eksperymentalną. Korekta i końcowa redakcja manuskryptu. Udział szacuję na 50%.)*

- [12B] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "A 100 W SiC MESFET Amplifier for L-band T/R Module of APAR", Int. Journal of Electronics and Telecommunications 2011, no. 3, vol. 57, pp. 135-140

*(Mój wkład: myśl przewodnia artykułu, analiza wad i zalet tranzystorów mikrofalowych na różnych podłożach (GaAs, GaN, SiC) dla zastosowania w mikrofalowych wzmacniaczach dużej mocy, propozycja i opis prostej, ale wydajnej metody projektowania mikrofalowych stopni mocy. Korekta i redakcja artykułu. Udział szacuję na 60%).*

#### **Publikacje w materiałach konferencyjnych umieszczonych w bazie Web of Science**

- [1C] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, S. Żygadło, A. Rutkowski, "A high power amplifiers for L-band transmitter with AM modulation", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 1998, Vol.1, pp. 49-53.

*(Mój wkład: projekt i pomiary wielostopniowego wzmacniacza mocy i modulatora AM nadajnika wraz z opisem układu w artykule. Kończąca redakcja artykułu. Udział oceniam na 70%.)*

- [2C] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, L. Szugajew, "High power noise sources for L and S-band", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 1998, Vol.1, pp. 54-58.

*(Mój wkład: opis koncepcji źródeł szumów, projekt i pomiary wzmacniaczy mocy szumów na pasma L i S o względnej szerokości pasma 14% i dynamice regulacji wzmocnienia 30dB z dopuszczalnymi wahaniami 1dB, prezentacja wyników projektu i pomiarów. Redakcja i korekta artykułu. Udział szacuję na 70%.)*

- [3C] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, E. Sędek "A 45W Class A Power Amplifier for L-band T/R Module", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 1998, Vol.1, pp. 59-62.

*(Mój wkład: propozycja treści artykułu dot. wykorzystania klasycznych tranzystorów bipolarnych do budowy torów nadawczych modułów N/O przeznaczonych do radarów z elektronicznie sterowaną wiązką, projekt i badania wzmacniacza o mocy wyjściowej 45W z krzemowym tranzystorem bipolarnym pracującym w warunkach impulsowego zasilania DC dokładnie w takich jak w modułach N/O – opis układu i wyników pomiarów. Ostateczna korekta i redakcja manuskryptu. Udział szacuję na 50%).*

- [4C] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, J. Lange, T. Morawski, "The Optimization of the Transmittance Phase Changes of Power Amplifiers for T/R Module of Active Phased Array Radar", Proc. Int. Conf. on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2000, Vol.2, pp. 671-674.

*(Mój wkład: propozycja kształtu artykułu, koncepcja układu testowego wzmacniacza do pomiaru zmian transmitancji w czasie impulsu, projekt przestrajanego obwodu wyjściowego wzmacniacza dla minimalizacji zmian fazy transmitancji w impulsie – podano w artykule wyniki symulacji i pomiarów skonstruowanego wzmacniacza. Zredagowanie artykułu. Udział oceniam na 70%)*

- [5C] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, E. Sędek, "Designing T/R Module for Active Phased Array Radar", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2002, Vol.2, pp. 631-634.

*(Moim dziełem jest myśl przewodnia artykułu oraz analiza wyników projektu i badań modułów N/O do radarów z elektronicznie sterowaną wiązką i ich podzespołów opracowanych z moim udziałem w IRE PW. Ostateczna redakcja artykułu. Udział szacuję na 40%.)*

- [6C] R. Michnowski, W. Wojtasiak, "The Thermal Effects in LDMOS Transistor", Proc. Int. Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2002, Vol.1, pp. 89-92.

*(Mój wkład: pomysł na treść i formę artykułu, współtwórca elektro-termicznego modelu tranzystora LDMOSFET dużej mocy, konsultacje projektu układów testowych, udział w eksperymentalnej weryfikacji modelu z wykorzystaniem skonstruowanych wzmacniaczy. Korekta artykułu. Udział szacuję na 60%).*

- [7C] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, E. Sędek, "A 300W-band Solid-State Transmitter" Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2002, Vol.1, pp. 263-266.

*(Mój wkład: propozycja koncepcji artykułu, opracowanie architektury nadajnika, projekt modulatora i wielostopniowego wzmacniacza klasy C o mocy wyjściowej 300W w impulsie na pasmo S – w artykule opisano koncepcję nadajnika, budowę wielostopniowego wzmacniacza impulsowego dostarczającego pobudzenie o mocy 300W do klustronu. Ostateczna redakcja. Udział szacuję na 40%).*

- [8C] D. Gryglewski, D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, "Transverters for TDD and FDD ISM2.4GHz Radio Systems", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2006, vol.2, pp. 626-629.

*(Mój wkład: określenie kształtu artykułu, twórca idei konwersji pasm w systemach radiodostępu abonenckiego, opracowanie architektury transwerterów i projekt torów nadawczych skompensowanych termicznie – w artykule zaprezentowano wyniki prac konstrukcyjnych wzmacniaczy i eksperymentów w realnych systemach łączności. Ostateczna korekta artykułu. Udział szacuję na 50%).*

- [9C] D. Gryglewski, R. Michnowski, W. Wojtasiak, J. Jarkowski, "Power Amplifier Design for TARGET Network of Excellence", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2006, pp. 1021-1024.

*(Mój wkład: myśl przewodnia artykułu, prezentacja (w części) metod projektowania wzmacniaczy dużej mocy w oparciu o różne modele tranzystorów mikrofalowych, propozycja inżynierskiego podejścia do budowy wzmacniaczy nadawczych. Końcowa korekta. Udział oceniam na 40%).*

- [10C] D. Gryglewski, D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, "A 250 W 2.45 GHz-Band Solid State Pulse Source", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2008, pp. 594-597.

*(Mój wkład: koncepcja impulsowego źródła dużej mocy na pasmo ISM2.45GHz, projekt i wykonanie ciągu wzmacniaczy z końcowym stopniem o mocy 250W. Opis wyników projektu i pomiarów zrealizowanych wzmacniaczy. Ostateczna korekta. Udział szacuję na 50%).*

- [11C] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, M. Bielniak, D.W. Rosołowski, "X-band Pulsed Measurement System of Transmittance Changes of Power Amplifiers", Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2010, pp. 373-376

*(Mój wkład: koncepcja układu pomiarowego, konsultacje przy projekcie i konstrukcji obwodów mikrofalowych na pasmo X. Ostateczna korekta artykułu. Mój udział szacuję na 40%).*

- [12C] D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, T. Morawski, "A S-band 7W GaN HEMT Adaptive Power Amplifier" Proc. International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2012, pp. 304-308.

*(Mój wkład: opracowanie i opisanie modelu tranzystora GaN HEMT i projekt obwodu wyjściowego wzmacniacza. Korekta artykułu. Udział szacuję na 50%).*

- [13C] D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "A 250 W RF Pulse Power Source for Linear Accelerator" Proc. Int. Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications: MIKON 2014, pp. 393-396.

*(Mój wkład: propozycja kształtu artykułu, opracowanie schematu funkcjonalnego generatora, projekt modulatora i wielostopniowego wzmacniacza klasy C o mocy wyjściowej  $P_{wy} \geq 330W$  w impulsie na pasmo S (po układzie izolacji z dwoma cyrkulatorami na wyjściu generatora otrzymuje*

się nie mniej niż 250W na krańcach użytecznego pasma) – w artykule opisano koncepcję generatora i konstrukcję wielostopniowego wzmacniacza impulsowego tranzystorami bipolarnymi przeznaczonymi do zastosowań radarowych. Ostateczna redakcja. Udział szacuję na 40%.)

- [14C] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, "Temperature-Dependent Modeling of High-Power MESFET Using Thermal FDTD Method", Proc. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest 2001, Phoenix, USA, May 20-26, 2001, pp.411-414.

(Mój wkład: pomysłodawca artykułu, opracowanie koncepcji modelu tranzystora GaAs MESFET z uwzględnieniem długo- i krótkookresowych efektów termicznych, projekt i badania skonstruowanych wzmacniaczy dla weryfikacji eksperymentalnej zaproponowanego modelu. Zredagowanie artykułu. Udział szacuję na 60%.)

#### **Autorstwo rozdziału w monografii w języku polskim**

- [1D] D. Gryglewski, W. Wojtasiak, T. Morawski, "Szyki fazowane z zasilaniem rozproszonym", rozdział 4 w monografii pod edycją W. Zieniutycza, "Współczesne technologie radarowe. Anteny o sterowanej wiązce w technice radarowej", WKŁ 2012 pp. 189-224.

(Mój wkład: określenie zawartości merytorycznej 4 rozdziału monografii, przegląd literatury – stan techniki w zakresie konstrukcji modułów N/O dla APAR, prezentacja układów, w tym wzmacniaczy i ograniczników, zrealizowanych w Instytucie Radioelektroniki PW z moim udziałem. Edycja i ostateczna korekta. Udział szacuję na 50%.)

#### **Publikacje w pozostałych materiałach konferencyjnych**

- [1E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "Końcowy stopień mocy z tranzystorem bipolarnym do modułu N/O", Materiały Konferencji Naukowej "Sterowanie i Regulacja w Radiolokacji i Obiektach Latających", Jelenia Góra 1999, Biuletyn 1(31), Vol.II, pp. 254-261

(Mój udział: pomysł użycia krzemowych tranzystorów bipolarnych do budowy stopni mocy nadawczych w modułach N/O radarów APAR, projekt i badania wzmacniacza dużej mocy z tranzystorem BJT LFE15600X (Philips) z impulsowanym zasilaniem DC typowym w modułach N/O, opis układu i wyników pomiarów. Ostateczna korekta i redakcja. Udział szacuję na 70%.)

- [2E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, "Zniekształcenia amplitudowo-fazowe mikrofalowych wzmacniaczach mocy w systemach radiokomunikacyjnych", Materiały Konferencji Naukowej "Sterowanie i Regulacja w Radiolokacji i Obiektach Latających", Jelenia Góra 1999, Biuletyn 1(31), Vol.II, pp. 246-249

(Mój udział: pomysłodawca artykułu, opis metodyki pomiaru zniekształceń amplitudowo-fazowych powodowanych przez mikrofalowe wzmacniacze nadawcze, prezentacja wyników eksperymentów skonstruowanych przez autorów wzmacniaczy przeznaczonych do różnego typu systemów radiokomunikacyjnych. Korekta i redakcja artykułu. Udział szacuję na 60%.)

- [3E] W. Wojtasiak, A. Pryczek "Miniaturowy nadajnik systemu IFF", Materiały Konferencji Naukowej "Sterowanie i Regulacja w Radiolokacji i Obiektach Latających", Jelenia Góra 2000, Biuletyn 1(31), Vol. 1, pp. 249-257

(Mój udział: koncepcja artykułu, projekt impulsowego, 3-stopniowego wzmacniacza klasy C na pasmo IFF o mocy wyjściowej 160W – opis konstrukcji i wyników pomiarów. Korekta i redakcja tekstu. Udział oceniam na 80%.)

- [4E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, L. Szugajew, "Szerokopasmowe źródło szumów dużej mocy na pasmo L", Materiały Konferencji Naukowej "Sterowanie i Regulacja w Radiolokacji i Obiektach Latających" Jelenia Góra 2000, Biuletyn 1(31), Vol. 1, pp. 275-283

(Mój wkład: propozycja treści artykułu, prezentacja koncepcji źródła szumów, projekt i pomiary wielostopniowego wzmacniacza mocy szumów na pasmo L o względnej szerokości pasma 14% i dynamice regulacji wzmocnienia 30dB z dopuszczalnymi wahaniami 1dB – opisanie konstrukcji i rezultatów badań wzmacniacza. Redakcja i korekta artykułu. Udział szacuję na 70%.)



- [5E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "Temperaturowy model mikrofalowego tranzystora mocy GaAs MESFET", Materiały Konferencji Naukowej "Sterowanie i Regulacja w Radiolokacji i Obiektach Latających", Jelenia Góra 2000, Biuletyn 1(31), Vol. 1, pp. 214-247  
(Mój wkład: prezentacja koncepcji elektryczno-termicznego modelu tranzystora GaAs MESFET, opis konstrukcji i wyników badań wybranych układów testowych dla weryfikacji procesu modelowania. Redakcja i korekta artykułu. Udział szacuję na 60%.)
- [6E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, "Moduł N/O radaru z aktywnie fazowaną anteną na pasmo C" Konferencji Naukowej "Sterowanie i Regulacja w Radiolokacji i Obiektach Latających", Jelenia Góra 2001, pp. 33-42  
(Mój wkład: opracowanie architektury modułu N/O radaru APAR na pasmo C, opis projektu i realizacji toru nadawczego (głównie wzmacniaczy mocy) i ograniczników wraz z wynikami pomiarów. Redakcja i korekta artykułu. Udział oceniam na 60%.)
- [7E] P. Błaszczak, W. Wojtasiak, "Moduły N/O WLAN na pasma ISM i UNII", Materiały Krajowej Konferencji KKRRiT, 2003, pp.129-132  
(Mój wkład: opracowanie koncepcji modułu N/O dla sieci WLAN ISM2.45GHz i UNII, prezentacja wyników projektu i badań modułu N/O. Redakcja i korekta artykułu. Udział oceniam na 60%).
- [8E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, A. Abramowicz, "Programowalny konwerter  $2,4 \leftrightarrow 3,5$ GHz z rozdziałem częstotliwości", Materiały Krajowej Konferencji KKRRiT, 2004, pp.146-149  
(Mój wkład: pomysłodawca koncepcji konwertera do zmiany pasma pracy systemów z rozdziałem częstotliwości, opis konstrukcji i wyników pomiaru toru nadawczego. Redakcja i korekta artykułu. Udział oceniam na 60%).
- [9E] A. Niczyporuk, W. Wojtasiak, "Wzmacniacze nadawcze z tranzystorami bardzo dużej mocy Push-Pull GaAs FET na pasmo ISM2.4GHz", Materiały Krajowej Konferencji KKRRiT, 2005, pp. 392-395  
(Mój wkład: propozycja struktury artykułu z ukierunkowaniem na prezentację najnowszych osiągnięć technologii mikrofalowych tranzystorów dużej mocy, opis wyników badań wykonanych przez autorów wzmacniaczy z tranzystorami GaAs Power FET w konfiguracji Push-Pull i zrównoważonej. Redakcja i korekta artykułu. Udział oceniam na 70%).
- [10E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski "Konwerter TDD  $2.4 \leftrightarrow 4.4$ GHz do WLAN 802.11", Materiały Krajowej Konferencji KKRRiT, 2005, pp. 388-391  
(Mój wkład: opracowanie rozwiązania układowego konwertera, projekt, wykonanie toru nadawczego – opis uzyskanych wyników pomiarów. Redakcja artykułu. Udział szacuję na 60%).
- [11E] D. Gryglewski W. Wojtasiak, "Temperature-Dependent Model of High Power GaAs MESFET" Proc. International Seminar Thermic'2000, pp.34-39.  
(Mój wkład: propozycja zakresu treści i formy artykułu, projekt modelu tranzystora GaAs MESFET dużej mocy z uwzględnieniem efektów termicznych, prezentacja wyników symulacji i pomiarów skonstruowanych dla weryfikacji modelu wzmacniaczy. Udział szacuję na 60%.)
- [12E] D. Gryglewski W. Wojtasiak, "The Microwave High Power Noise Transmitters", Proc. Regional Conference on Military Communication and Information Systems 2000: Partnership for CIS Interoperability, Vol. 3, pp.53-57.  
(Mój wkład: koncepcja artykułu, projekt i realizacja ciągu wzmacniaczy sygnału szumowego – opis osiągniętych wyników symulacji i pomiarów skonstruowanych układów. Redakcja artykułu. Udział szacuję na 70%).
- [13E] W. Wojtasiak, "Tranzystory mikrofalowe - technologia, parametry i zastosowania", (referat plenarny) Mat. Krajowej Konferencji Elektroniki 2002, Vol. 1/2, pp.79-84.
- [14E] D. Gryglewski W. Wojtasiak, "Dwuzakresowy nadajnik zakłóceń szumowych 900/1800MHz", Mat. Krajowej Konferencji Elektroniki 2002, Vol. 1/2, pp.355-359.  
(Mój wkład: opis konstrukcji dwupasmowego wzmacniacza mocy szumów, prezentacja wyników badań nadajnika zakłóceń. Zredagowanie artykułu. Udział szacuję na 60%).

- [15E] W. Wojtasiak, "Wzmacniacze dużej mocy z tranzystorami Si-LDMOS i Push-Pull GaAs FET na pasmo WCDMA i ISM2.45GHz", Mat. Krajowej Konferencji Elektroniki 2003, Vol. 2, pp.289-294.
- [16E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, R. Michnowski, "Elektryczno-termiczne modelowanie mikrofalowych tranzystorów dużej mocy", Materiały. Krajowej Konferencji Elektroniki, 2003, Vol.2. pp. 743-748  
*(Mój wkład: opis koncepcji elektryczno-termicznego modelowania mikrofalowych tranzystorów dużej mocy, prezentacja wniosków z projektów prowadzonych z moim udziałem w Instytucie Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej. Korekta i redakcja artykułu. Mój udział to 50%.)*
- [17E] D. Gryglewski, P. Kopyt, W. Wojtasiak, "Blok przemiany częstotliwości odbiornika radaru śledzącego na pasmo Ku", Mat. Krajowej Konferencji Elektroniki, 2013, pp. 61-64.  
*(Mój wkład: zaprojektowanie, wykonanie i badania ograniczników diodowych w nowej konfiguracji dla zabezpieczenia ośmiokanałowego odbiornika, opis osiągniętych rezultatów. Korekta artykułu. Udział szacuję na 40%.)*
- [18E] R. Michnowski, W. Wojtasiak, "The Electro-thermal Model of High Power LDMOS Transistor", Proc. 11th of Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium (GaAs IC), Annual IEEE Symposium 2003, pp. 243-246.  
*(Mój wkład: pomysłodawca artykułu, opracowanie i prezentacja koncepcji elektryczno-termicznego modelu tranzystora LDMOSFET, opis wyników symulacji i pomiarów. Korekta i redakcja artykułu. Udział szacuję na 60%.)*
- [19E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, W. Gwarek, "High-frequency-stability Microwave High power Sources", Proc. 9th International Conference on Microwave and High Frequency Heating 2003, pp. 305-308  
*(Mój wkład: projekt i opis architektury źródeł mocy mikrofalowej, zaprojektowanie, wykonanie i badania wzmacniaczy mocy oraz prezentacja osiągniętych wyników pomiarów wzmacniaczy i skonstruowanego źródła. Redakcja artykułu. Udział szacuję na 50%.)*
- [20E] W. Wojtasiak, R. Michnowski, D. Gryglewski, "A 100W ISM-2.45GHz Band Power Test System", Proc. Workshop on RF Power Amplifier, Orvieto, Włochy, 2005, pp. 29-32  
*(Mój wkład: prezentacja wyników prac nad z zakresu projektowania mikrofalowych wzmacniaczy dużej mocy dla zastosowań w przemyśle chemicznym, farmaceutycznym i spożywczym na przykładzie realizacji stopni mocy użytych w systemie pomiarowym do testowania kuchenek mikrofalowych. Redakcja artykułu. Udział szacuję na 50%.)*
- [21E] D. Gryglewski, D.W. Rosołowski, W. Wojtasiak, "Ogranicznik do modułu N/O radaru z aktywnie fazowaną anteną na pasmo X", Mat. III Konferencji Naukowej: Urządzenia i Systemy Radioelektroniczne UISR'09, 2009, pp. 1-6.  
*(Mój wkład: określenie zawartości merytorycznej artykułu, opracowanie koncepcji ogranicznika, projekt, wykonanie i pomiary układów ograniczających z diodami PIN na pasmo X – opis osiągniętych rezultatów symulacji i badań eksperymentalnych. Korekta i redakcja artykułu. Udział szacuję na 80%.)*
- [22E] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, "Wzmacniacze mocy do modułu N/O radaru z aktywnie fazowaną anteną na pasmo X", Mat. III Konferencji Naukowej: Urządzenia i Systemy Radioelektroniczne UISR'09, 2009, pp. 7-10.  
*(Mój wkład: projekt, wykonanie, badania stopni dużej mocy toru nadawczego modułu N/O na pasmo X – prezentacja procesu projektowania i wyników pomiarów. Redakcja artykułu. Udział szacuję na 50%.)*

#### **Publikacje w innym recenzowanym czasopiśmie**

- [1F] W. Wojtasiak, D. Gryglewski, T. Morawski, "Mikrofalowe nadajniki zakłóceń szumowych dużej mocy", Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej "Elektronika", 2001, z. 129, pp. 797-819.

*(Mój wkład: określenie formy i treści artykułu, projekt, wykonanie i pomiary wzmacniaczy mocy do mikrofalowych nadajników zakłóceń szumowych – prezentacja osiągniętych wyników na podstawie skonstruowanych urządzeń dla WITU. Redakcja artykułu. Udział szacuję na 80%.)*

[2F] W. Wojtasiak, "Mikrofalowe tranzystorowe wzmacniacze nadawcze dużej mocy", Elektronizacja, 2003, No. 7-8, pp. 16-20.

#### **4. Omówienie celu naukowego w/w pracy/prac i osiągniętych wyników, wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

##### **4a) Układy konwerterów dla radiowych systemach dostępu abonenckiego punkt - wielopunkt**

###### **Uwarunkowania prawne, techniczne i eksploatacyjne realizowanego projektu**

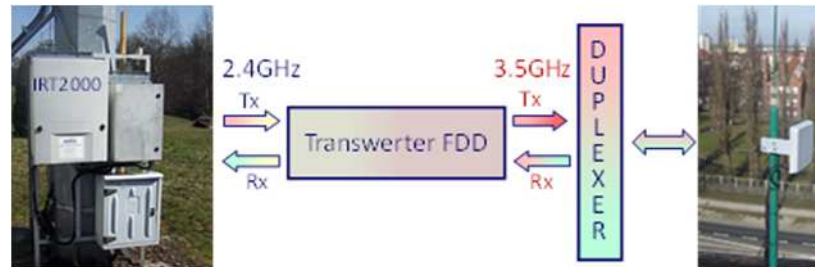
Prace nad konwersją częstotliwości sygnałów w systemach radiodostępu abonenckiego podjęto w związku ze zmianami w Prawie Telekomunikacyjnym z dnia 29.08.2003r. (Dz. U. 73, poz. 852, art. 91, pkt. 2), które zobowiązywały koncesjonowanych operatorów radiowych sieci dostępu abonenckiego punkt-wielopunkt (P-PM) do zaprzestania nadawania w pasmach otwartych i przejścia do przydzielonego zakresu częstotliwości 3.4÷3.6 GHz. Operatorzy rozpoczęli intensywne poszukiwania rozwiązań możliwych do zaakceptowania ze względów technicznych i ekonomicznych. Zwracali się do różnych instytucji komercyjnych i badawczych w kraju i zagranicą. W odpowiedzi otrzymywali jedynie propozycję instalacji nowego systemu. Takie rozwiązanie było kosztowne i czasochłonne. Zupełnie nową sieć radiodostępu abonenckiego byli w stanie zbudować tylko nadawcy o zasięgu krajowym, będący w dobrej kondycji finansowej, ponieważ oni operowali w obszarach o dużym nasileniu ruchu telekomunikacyjnego, w których można było wysokimi kosztami obciążyć abonentów. Do takich firm należała np. spółka TP S.A.. W przypadku regionalnych operatorów obsługujących rejony mniej zurbanizowane, brak alternatywnego rozwiązania technicznego groził poważnymi konsekwencjami łącznie z zaprzestaniem dostarczania usług telefonicznych dla abonentów z obszarów, głównie wiejskich, w kilku województwach na okres nawet kilku lat. Dlatego firmy takie jak El-net (włączony później do Netii), czy MNI Centrum Usług S.A. (daw. MNI Telekom) zwróciły się do Instytutu Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej z prośbą o rozważenie możliwości modyfikacji tzw. warstwy radiowej użytkowanych systemów P-MP (takich jak IRT2000, A9800 i DRMASS) zgodnie z wymaganiami ustawy. Dla realizacji tego zadania badawczego, a następnie wdrożeniowego powstał zespół w składzie dr inż. Wojciech Wojtasiak (kierownik, wzmacniacze, układy regulacji i kompensacji temperaturowej, duplexery, anteny), dr inż. Daniel Gryglewski (heterodyna, zasilacze DC i filtry), dr inż. Dawid Rosołowski (mikrokontroler i oprogramowanie) i prof. dr hab. inż. Wojciech Gwarek (konsultacje w zakresie modelowania elektromagnetycznego) z wymienionymi obszarami odpowiedzialności.

###### **Zrealizowane rozwiązania bloków konwersji z wyróżnieniem oryginalnego wkładu habilitanta**

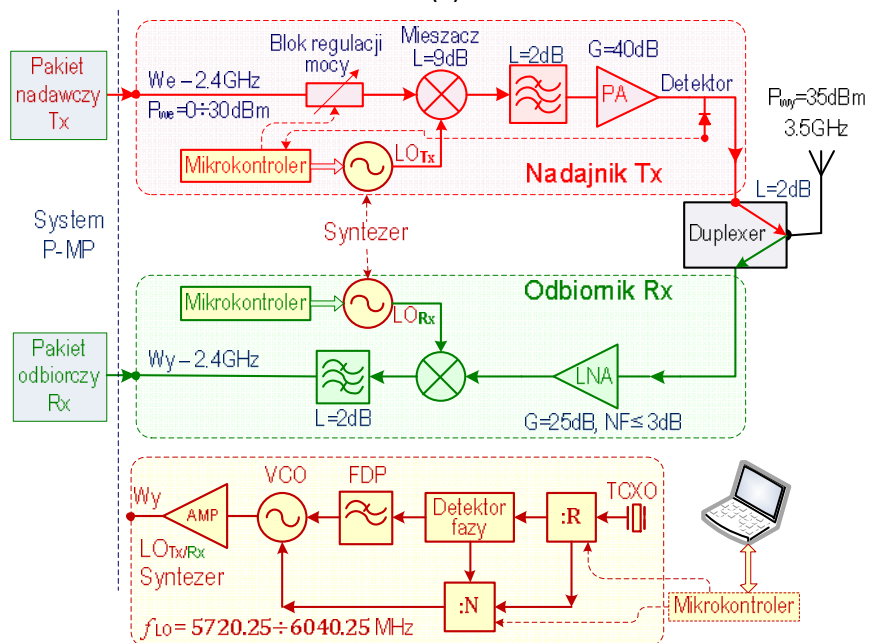
Zgodnie z wymaganiami gestorów zaproponowałem oryginalne rozwiązanie, które polegało na włączeniu pomiędzy pakiet radiowy systemu a zwrotnicę częstotliwości poprzedzającą antenę, zewnętrznego transparentnego, w sensie elektrycznym, bloku przemiany częstotliwości sygnału tzw. transwertera FDD (*Frequency Division Duplex*) w celu dostosowania do wymogów ustawy i warunków pracy takich parametrów jak częstotliwość nośna, poziom mocy, czułość, współczynnik szumów, przy zachowaniu dotychczasowej funkcjonalności systemu. Pod pojęciem transwertera rozumie się układ realizujący w ogólności dwukierunkową transmisję sygnału z przemianę częstotliwości w górę i w dół. Zwrotnica częstotliwości (potocznie duplexer) i antena były wymieniane w trakcie instalacji transwertera w danej lokalizacji. Koncepcję konwersji sygnału w sieci radiodostępu abonenckiego P-MP pokazano na rys.4a.1a. Schematy funkcjonalne transwerterów FDD – nadajnika Tx, odbiornika Rx i generatora lokalnego (heterodyny) przedstawiono na rys.4a.1b wraz z orientacyjnym bilansem mocy i wzmocnienia.

Pomimo wielu starań nie znaleziono żadnej oferty ani producenta transwerterów dla systemów radiowych P-MP z dywersyfikacją FDD. W sytuacji rozważono różne możliwości konwersji

częstotliwości transmitowanego sygnału m.in. poprzez ingerencję w wewnętrzną konstrukcję radiowych pakietów nadawczych i odbiorczych systemów. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów pomysł ten został odrzucony z powodu zbyt dużego odstępu między starym i nowym pasmem, niedostatecznego poziomu nadawanej mocy, istotnego pogorszenia parametrów szumowych odbiornika, a przede wszystkim ze względu na brak informacji o użytych specjalizowanych mikrofalowych układach scalonych wytwarzanych na zamówienie producenta systemu. Dodatkowo czas instalacji i przestrojenia był nie do przyjęcia dla gestorów. Dlatego zdecydowano się na koncepcję zastosowania zewnętrznych transwerterów (rys.4a.1a).



(a)



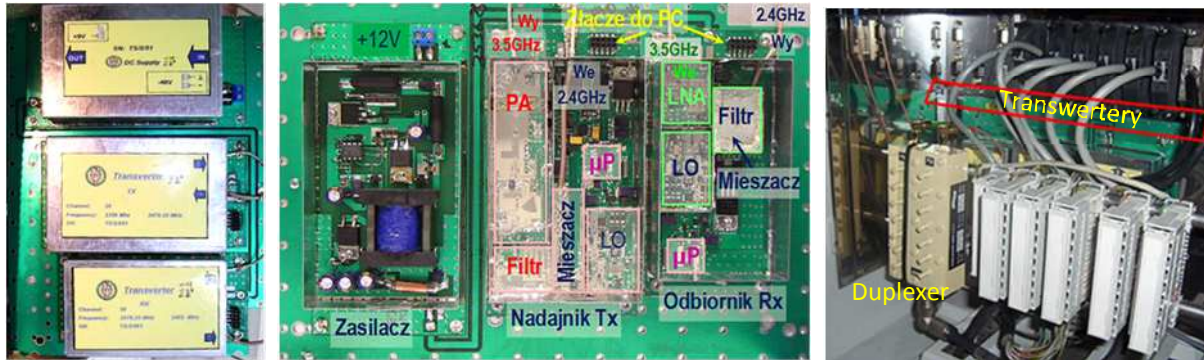
(b)

Rys.4a.1. Idea konwersji sygnałów w systemach P-MP (a) i schematy blokowe transwerterów FDD nadajnika Tx i odbiornika Rx oraz heterodyny LO oraz bilans mocy i wzmocnienia (b)

Schemat funkcjonalny transwerterów FDD zarówno dla nadajnika Tx jak i odbiornika Rx (rys4a.1b) opracowałem dla zapewnienia maksymalnej transparentności bloków konwersji i wymaganych parametrów elektrycznych takich jak stabilność częstotliwości nośnej, poziom mocy nadawanej, maska widma emitowanego sygnału, czułość i współczynnik szumów odbiornika, a w przypadku duplexera: tłumienie sygnału nadajnika w kanale odbiornika i straty wnoszone w pasmie roboczym. Wybrałem takie rozwiązania układowe i podzespoły, aby spełnić również wymagania gestorów dotyczące czasu instalacji (dopuszczalne przerwy w transmisji do kilku godzin) i wzrostu opłat do poziomu akceptowalnego przez abonentów, czyli rzędu kilku PLN/miesiąc w okresie do 2 lat. Dlatego zakupy elementów ograniczono do niezbędnego minimum, a bloki funkcjonalne transwerterów, zasilacze DC oraz duplexery wykonano we własnym zakresie.

Funkcjonalnie, transwerter nadawczy realizuje przemianę częstotliwości nośnej 1 z 24 kanałów z pasma 2.3÷2.5GHz do nowego zakresu 3.4÷3.6GHz, a odbiorczy dokonuje operacji odwrotnej. Odstęp duplexowy pomiędzy częstotliwościami nośnymi *down-link* i *up-link* wynosi 100MHz. Zgodnie z

normą szerokość kanału w pasmie 3.5GHz określona na 3.5MHz jest wystarczająca dla systemów ITR2000 (Lucent) oraz A9800 (Alcatel). W przypadku systemu DRMASS (NEC) o szybkości transmisji 4Mb/s z odstępem międzykanałowym 4MHz należało zająć dwa sąsiednie 3.5MHz kanały. Wybór kanału sprowadza się do zaprogramowania wartości częstotliwości nośnej poprzez interfejs RS232 lub USB z poziomu komputera PC oddzielnie w transwerterze nadawczym i odbiorczym, także w trakcie montażu w terenie. Konstrukcję mechaniczną modułu konwersji sygnału zaprojektowałem pod kątem łatwej i szybkiej instalacji w terenie. Wygląd modułu, jego wnętrza oraz po zamontowaniu w skrzynce stacji końcowej systemu P-MP (IRT2000) pokazano na rys.4a.2.



Rys.4a.2. Blok konwersji sygnału i widok po zamontowaniu w skrzynce terminala systemu P-MP

Moduł konwersji sygnału składa się z dwóch transwerterów Rx i Tx, zasilacza DC dostosowanego do współpracy z typową siłownią telekomunikacyjną (-48VDC z "+" na masie) lub akumulatorem 12V z izolacją galwaniczną oraz zestaw złączy do komunikacji z PC. Wymienione urządzenia są zamontowane na wspólnej płycie nośnej, która także pełni funkcję radiatora.

Szczególną uwagę skupiłem na zaprojektowaniu możliwie taniego, niezawodnego, wzmacniacza nadawczego pracującego niezawodnie w szerokim zakresie. Skonstruowanie wzmacniacza o takich właściwościach jest dużym wyzwaniem technicznym, a to na wymóg długoterminowej i niezawodnej pracy w warunkach polowych, bez regularnego nadzoru i serwisowania. Niewątpliwie przy realizacji tego zadania użyteczne okazało się moje doświadczenie z zakresu elektryczno-termicznego modelowania mikrofalowych tranzystorów mocy [14C]. Do budowy końcowego stopnia nadajnika zastosowałem tranzystory "low cost" GaAs HFET firmy Stanford/Sirenza i NEC odpowiednio o mocy wyjściowej  $P_{1dB}$  równej 0.5W i 3W. W efekcie, koszt układu, stanowiący istotną część kompletnego bloku konwersji pasm, nie przekraczał 60PLN.

Kompensację termiczną toru nadawczego zrealizowałem w oparciu o odpowiednio zaprojektowane obwody dopasowujące i zasilające DC tranzystorów oraz przy pomocy pętli układu regulacji i poziomowania mocy wyjściowej w funkcji temperatury obejmującej cały transwerter.

Elementami składowymi zwrotnicy częstotliwości są filtry grzebieniowe zrealizowane w technice falowodowej. Dupleksera zaprojektowałem we współpracy z firmą QWED w środowisku symulatora elektromagnetycznego QuickWave.

### Podsumowanie osiągniętych wyników i wdrożenia

Prowadzone prace zakończyły się pełnym sukcesem. Parametry wykonanych urządzeń spełniały wszelkie wymagania narzucone przez gestorów. Podstawowe parametry zestawiono w tab.4a.1.

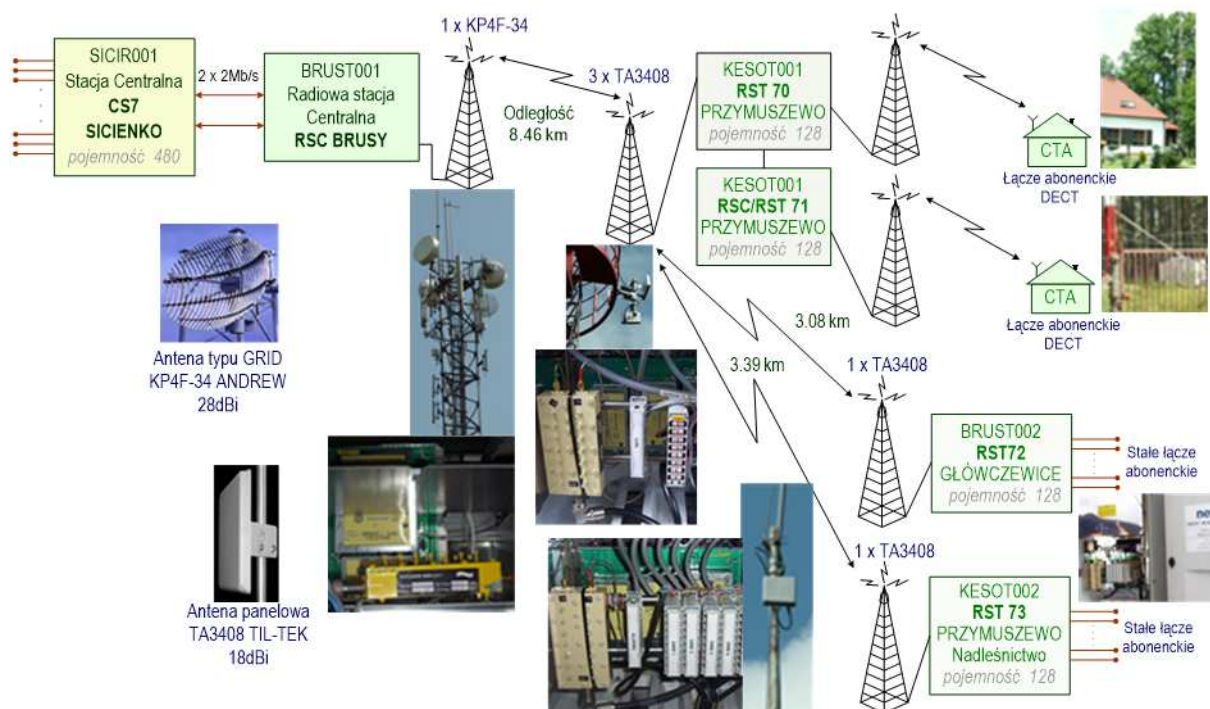
Typowym przykładem wdrożenia jest instalacja modułów konwersji sygnału w systemie IRT2000 (El-net) okolicach miejscowości Brusy (woj. Kujawsko-pomorskie), którą zobrazowano na rys.4a.3. W podobny sposób zmodernizowano stacje bazowe, przekaźnikowych i końcowe systemów P-MP w ponad 100 lokalizacjach, na terenie trzech województw: Świętokrzyskiego, Łódzkiego i Kujawsko-pomorskiego [3S], [4S]. Lokalizacje przebudowanych sieci pokazano na mapie na rys.4a.4. W sumie wykonane prace dotyczyły ponad dwudziestu tysięcy abonentów publicznej sieci telefonicznej. Koszty realizacji projektu były niewspółmiernie niskie w porównaniu z nakładami finansowymi wydatkowanymi na instalację nowego systemu. Nie przekraczały one kilku złotych w miesięcznym

abonamencie. Stopa błędu BER (*Bit Error Rate*) po instalacji transwerterów nie zmieniła się, a w wielu lokalizacjach nastąpiła wyraźna poprawa transmisji. Czas instalacji urządzeń nie przekraczał kilku godzin.

Tab.4a.1. Parametry transwertera FDD oraz dupleksera dla systemów P-MP

Parametr	Nadajnik Tx	Odbiornik Rx	Duplexer
Pasmo	2.3÷2.5→3.4÷3.6GHz	3.4÷3.6→2.3÷2.5GHz	max. 7MHz
Ilość kanałów	1 z 24		2 z 24
Zysk przemiany	min. 0dB		-
Moc wyjściowa	max. 38dBm	-	-
Czułość	-	-88 ÷ -35dBm	-
Stabilność generatora LO	≤±2ppm		-
Tłumienie w pasmie kanału	-	-	≤-3dB
Izolacja Nadajnik/Odbiornik	-	-	≤-80dB
Straty odbicia We/Wy	max. -17dB	max. -18dB	≤-18dB
Maksymalna moc wejściowa	31dBm	13dBm	43dBm
Zasilanie DC	Własny zasilacz DC +12V lub -48V		-
Złącza (Female)	SMA 50		2xSMA i N50
Programowanie	RS232		-
Zakres temperatur pracy	-30°C ÷ +60°C		-

Aktualnie trwają prace nad utrzymaniem przebudowanych sieci radiodostępu abonenckiego przede wszystkim w zakresie serwisu i przełączania kanałów nadawania i odbioru. Warto podkreślić niski stopień awaryjności eksploatowanych urządzeń. Nieliczne awarie związane są zwykle z wyładowaniami atmosferycznymi.



Rys. 4a.3. Konwersja sygnałów w sieci radiodostępu P-MP w okolicach miejscowości Brusy w województwie Kujawsko-pomorskim.



Rys.4a.4. Rejony ulokowania zmodernizowanych systemów radiodostępu abonenckiego P-MP

## Podsumowanie

Za swoje największe osiągnięcie w tym projekcie uważam:

- Pomysł metody konwersji sygnałów w systemach radiowych dostępu abonenckiego P-MP;
- Opracowanie struktury funkcjonalnej transwerterów;
- Zaproponowanie rozwiązania konstrukcyjnego transwerterów i modułu konwersji;
- Nadzór nad realizacją poszczególnych urządzeń i ich instalacją w terenie;
- Przeprowadzenie badań eksploatacyjnych;
- Za opracowanie i wdrożenie mikrofalowych transwerterów zespół z Instytutu Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej otrzymał w 2013 roku "Złoty Laur Innowacyjności" w Ogólnopolskim Konkursie im. Stanisława Staszica organizowanym przez NOT.

## 4b) Transwertery WLAN

### Stan techniki

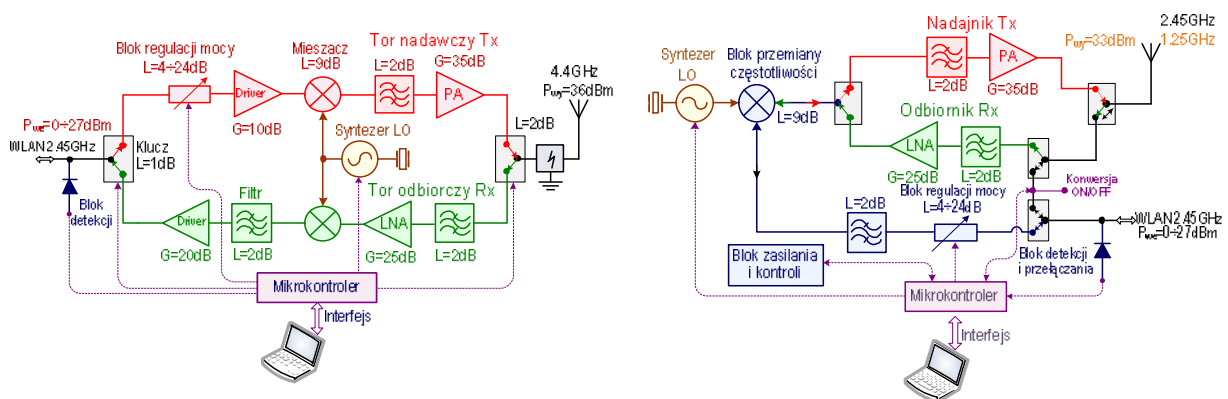
Ze względu na intensywne wykorzystanie pasma ISM2.45 GHz, zbyt niski dopuszczalny poziom nadawanej mocy oraz możliwość realizacji łączności z wykorzystaniem bezprzewodowego Ethernetu w pasmach zastrzeżonych dla służb i sił zbrojnych, kilka firm zwróciło się do Instytutu Radioelektroniki PW o rozważenie możliwości skonstruowania modułów konwersji częstotliwości nośnych urządzeń sieci komputerowych WLAN o standardzie 802.11a/b/g/n/s. Zdefiniowany standard i powszechny dostęp do różnorodnych podzespołów platformy WLAN uzasadnia wykorzystanie transwerterów do zmiany parametrów emitowanych sygnałów takich jak pasmo pracy i poziom mocy nadawanej. Takie rozwiązanie jest znacznie tańsze i szybsze w implementacji niż budowa wyspecjalizowanej sieci WLAN specyfikowanej dla danego pasma koncesjonowanego lub zastrzeżonego.

Kilku producentów zagranicznych [1], [2], [3] oferuje transwertery dla sieci WLAN 802.11a/b/g pozbawione funkcjonalności i odporności wymaganych od urządzeń specjalnego przeznaczenia. Główne niedostatki oferowanych transwerterów można wypunktować następująco: przemiana częstotliwości ograniczona do zakresu 3.5 GHz (bez możliwości wyboru kanału), moc wyjściowa poniżej 1 W (bez możliwości regulacji), zakres temperatur pracy  $0^{\circ}\pm 50^{\circ}\text{C}$  oraz brak kompensacji termicznej. Znalaziono tylko jedną ofertę dotyczącą układu konwersji częstotliwości sygnału do pasma NATO IV (4.4 GHz) [4]. Transwerter ten również nie spełniał wymagań mechaniczno-klimatycznych przewidzianych dla tego typu sprzętu wojskowego przy zupełnie nieakceptowalnej cenie i długich terminach dostawy zamówionych urządzeń. Dodatkowym utrudnieniem był wymóg przedłożenia oświadczenia o niedostępnienu nielicencjonowanemu użytkownikowi.

W odpowiedzi na zapotrzebowanie ze strony instytucji wykorzystanymi pasma zastrzeżone, zespół, w składzie wymienionym w p.4a, opracował szereg różnych wersji transwerterów o specyficznych parametrach. Urządzenia te były przeznaczone do pracy w standardzie 802.11a/b/g/n/s w specjalnych zastosowań. Jak wyjaśniono, wymagania przyszłych użytkowników wykluczyły zakup oferowanych konwerterów WLAN.

### Oryginalne rozwiązania habilitanta

Po analizie wymagań i sugestii potencjalnych użytkowników opracowałem strukturę transwerterów dla sieci WLAN w dwóch wersjach: standardowej i z pojedynczym mieszaczem. Schematy funkcjonalne tych wersji pokazano w uproszczeniu rys.4b.1 i 4b.2 wraz z orientacyjnym bilansem wzmocnienia/tłumienia. W obu rozwiązaniach sygnał generatora lokalnego LO miał większą częstotliwość niż sygnał konwertowany. W ten sposób ograniczono wpływ niepożądanych produktów przemiany częstotliwości położonych blisko pasma pracy. W rynkowych konwerterach (poza jednym [4]) heterodyna LO generuje sygnał o częstotliwości najniższej spośród sygnałów podlegających przemianie.



Rys.4b.1. Typowa struktura transwertera WLAN Rys.4b.2. Transwerter WLAN z jednym mieszaczem

Za oryginalne rozwiązanie uważam blok przemiany częstotliwości, w którym zastosowałem tylko jeden przełączany mieszacz (rys.4b.2). Należy podkreślić, że mieszacze stosowane w transwerterach są dość kosztowne, znacznie droższe niż monolityczne przełączniki GaAs MESFET typu SPDT. Z tego powodu zmniejszenie liczby mieszaczy zwiększało dodatkowo atrakcyjność tego rozwiązania.

Koncepcja wspólnego dla toru nadawczego i odbiorczego, bloku konwersji sygnału zwiększa elastyczność konstrukcji w kierunku konstrukcji transwerterów wielopasmowych (rys.4b.2).

W odróżnieniu od oferowanych konwerterów, transwertery wykonane w IRE PW posiadają funkcję programowania kanału tj. wyboru częstotliwości nośnej sygnału oraz temperaturowej stabilizacji mocy wyjściowej. Dlatego mogą prawidłowo pracować w szerokim zakresie temperatur otoczenia od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $70^{\circ}\text{C}$  bez istotnego pogorszenia parametrów [7E], [10E], [7B].

Oprócz opracowania struktury funkcjonalnej transwerterów, do moich zadań należało także skonstruowanie wzmacniaczy odbiorczych i nadawczych oraz układów regulacji mocy wyjściowej i



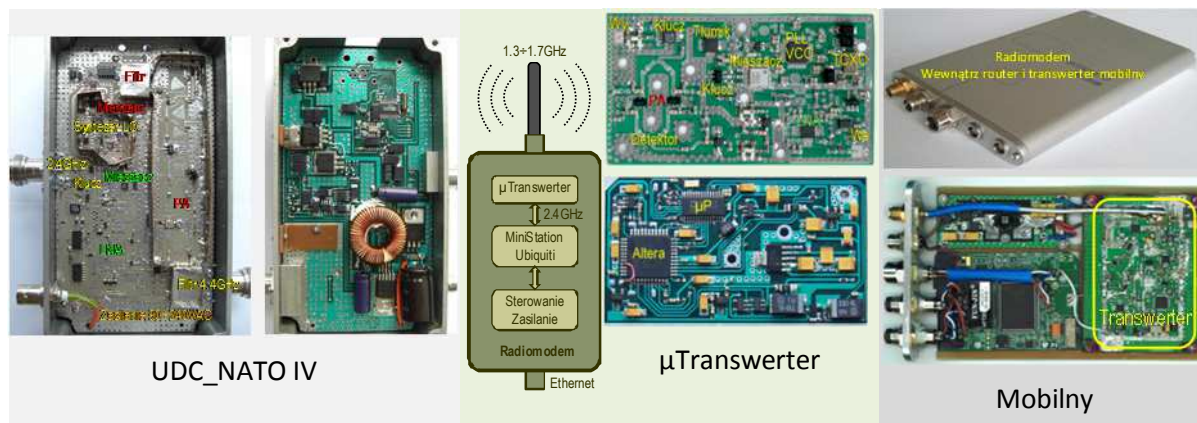
stabilizacji termicznej. Moje doświadczenia z zakresu elektryczno-termicznego modelowania tranzystorów mikrofalowych zaowocowały zaprojektowaniem termicznie stabilnych końcowych stopni mocy dla nadajników transwerterów. W tym celu zoptymalizowałem wejściowe i wyjściowe obwody dopasowujące oraz układy polaryzacji DC tranzystora dla osiągnięcia stałego wzmocnienia i poziomu mocy wyjściowej w funkcji temperatury. Stałość tych parametrów w wymaganym przedziale temperatur otoczenia uzyskałem poprzez objęcie pętlą regulacji mocy wyjściowej całego toru nadawczego, która sterowana jest przez mikrokontroler na podstawie pomiaru temperatury wewnątrz transwertera.

Ze względu na różne potrzeby gestorów wykonano szereg wersji transwerterów WLAN głównie dla konwersji sygnałów z zakresu ISM2.45GHz do pasm zastrzeżonych. Podstawowe parametry kilku wybranych urządzeń zestawiono w tab.4b.1.

Tab.4b.1. Podstawowe parametry transwerterów WLAN

Typ transwerter	UDC_NATO IV [5S]		Mobilny [6S]		μTranswerter [7S]	
	Nadajnik	Odbiornik	Nadajnik	Odbiornik	Nadajnik	Odbiornik
Pasma	4.4GHz	2.4GHz	1.25GHz	2.4GHz	1.3÷1.7GHz	2.4GHz
Zysk przemiany	-7÷+13dB-reg.	Min. 8÷9dB	3÷6dB	≥5dB	-23÷+3dB-reg.	≥10dB
Max. moc wyjściowa	36dBm	-	33dBm	-	23dBm	-
Czułość	-	-88÷-35dBm	-	-86÷-35dBm	-	-86÷-35dBm
Wsp. szumów		3.5dB	-	5dB	-	3.5dB
Stabilność generatora LO	≤ ±2ppm i -75dBc/Hz@1kHz		±10ppm		≤ ±2ppm i -75dBc/Hz@1kHz	
Straty odbicia we/wy	≤-20dB	≤-18dB	≤-20dB	≤-17dB	≤-20dB	≤-17dB
Max. moc wejściowa	27dBm	23dBm	30dBm	23dBm	30dBm	23dBm
Zasilanie DC	16÷27V		+9V÷16V		+5V±0.2V	
Złącza	N50(F)		SMA50(F)			
Programowanie	Ethernet		RS232/USB			
Temperatura pracy	-40°C÷+70°C					
Odporność we/wy	max. 50VDC, zwarte do mas					
Odbiorca	Wił		MediaCom.net		Radiotechnika Marketing	

Widok wykonanych transwerterów WLAN o parametrach z tab.4b.1 przedstawiono na rys.4b.3.



Rys.4b.3. Fotografie zrealizowanych transwerterów WLAN o parametrach podanych w tab.4b.1

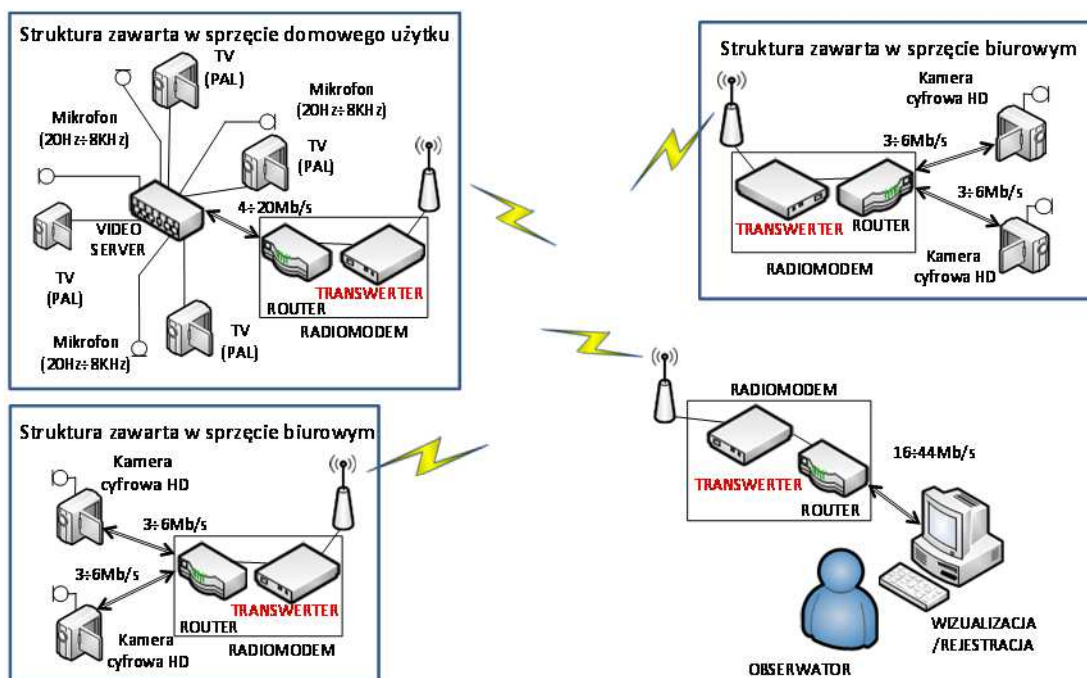
W konstrukcji transwertera UDC\_NATO IV wykorzystano standardowe rozwiązanie z dwoma mieszaczami (rys.4b.1) [5S], [8C]. Transwerter ten jest przeznaczony do realizacji połączeń mostowych w sieciach WLAN w pasmie zastrzeżonym 4.4GHz w Wojsku Polskim. Dlatego przeszedł konieczne badania mechaniczno-klimatycznych. Należy podkreślić, że programowanie i transmisja sygnałów sterowania do i z transwertera odbywa się przez sieć przewodową Ethernet.

Innym przykładem konwersji sygnałów WLAN 2.45 GHz jest wykorzystanie transwertera, jako elementu radiomodemu do realizacji sieci kratowej typu MESH, który pracuje w standardzie 802.11s. Ze względu na jego niewielkie rozmiary taki moduł nazwano μTraswerterem [7S]. Ideę sieci 802.11s

oparto na założeniu, że każde urządzenie sieciowe może komunikować się bezpośrednio z każdym innym urządzeniem, gdy bezpośrednio ze sobą sąsiadują, lub za pośrednictwem dowolnych innych elementów sieci, gdy są poza bezpośrednim zasięgiem. Radiomodem stanowi autonomiczny węzeł sieci kratowej zawierający własny zasilacz, blok łączności sieciowej z wejściem Ethernet,  $\mu$ Transwerter i zespół antenowy, jak pokazano na rys.4b.3. Moduł MiniStation (Ubiquiti), to jednokładowy komputer wyposażony w interfejs sieci bezprzewodowej 802.11b/g i kartę sieciową (Ethernet 10/100Mbps) wykorzystujący system operacyjny Linux.

Obecnie, ważną grupę urządzeń radiołączności stanowią terminale przenośne. Z reguły mieszczą się one na dłoni dzięki dużej skali integracji radiowych i cyfrowych układów scalonych. Ten rodzaj urządzeń jest również chętnie stosowany w bezprzewodowych systemach specjalnego przeznaczenia, np. do zdalnego monitorowania audio/video pomieszczeń i obiektów, skanowania i pomiaru wybranych istotnych paramentów otoczenia (temperatura, wilgotność, zanieczyszczenia, promieniowanie). Niewielkie gabaryty i masa tych urządzeń sprawia, że mogą być montowane w mobilnych robotach (np. na dronach), lub stanowić osobiste wyposażenie żołnierza dla realizacji łączności i/lub monitorowania wykonywanych zadań, a także istotnych funkcji życiowych. Dla przykładu popularne militarne wersje PDA tzw. CDA (*Commenders Digital Assistant*) wykorzystują platformę WLAN na pasmo ISM2.45GHz.

W odpowiedzi na sygnalizowane potrzeby w obszarze wymienionych zastosowań opracowałem, wraz z zespołem, niewielkich rozmiarów transwerter (nazywany dalej mobilnym) do radiomodemu będącego częścią bezprzewodowego mobilnego systemu monitorowania pomieszczeń, którego ideę przedstawiono w zarysie na rys.4b.4 [6S], [9B].



Rys.4b.4. Schemat blokowy bezprzewodowego mobilnego systemu monitorowania pomieszczeń.

Wygląd radiomodemu, routera z wbudowanym transwerterem, pokazano na rys.4b.3. W przestrzeni zurbanizowanej tj. wewnątrz osiedli i budynków powszechnie dostępne routery pozwalają na osiągnięcie zasięgów przy użyciu anten dookólnych rzędu 10÷20m przy przepływnościach zestawionych łącz powyżej 15Mb/s. Naturalne organicznie zasięgu wynika wprost z niewielkiego mocy nadawanego sygnału tj. 10÷13dBm. Zastosowanie transwertera umożliwia konwersję częstotliwości nośnej (w tym przypadku do pasma 1250±50MHz) oraz zwiększenie mocy nadawanego sygnału do ok. 33dBm. W następstwie tego zabiegu uzyskuje się zwiększenie zasięgu do ponad 150m w wewnątrz typowej żelbetonowej zabudowy i 600m w wolnej przestrzeni. Zasięgi te zmierzono dla transmisji sygnałów kamer HD.

## Podsumowanie

W Wymienione grupie rozwiązań za oryginalne osiągnięcia uważam:

- Opracowanie struktury transwerterów dla sieci WLAN 802.11a/d/g/n, z pojedynczym mieszaczem;
- Zaprojektowanie wzmacniaczy z ograniczonym wpływem temperatury tranzystora na parametry takie jak mocy wyjściowa i wzmocnienie;
- Skonstruowanie transwerterów o niewielkiej wrażliwości temperaturowej. Istotnym układem tego rozwiązania jest odpowiednia pętla sprzężenia zwrotnego obejmująca całe urządzenie (jak dotąd niestosowana w transwerterach dostępnych na rynku);
- Zoptymalizowanie konstrukcji transwerterów pod względem rozmiarów i kosztów (m.in. wybór elementów "low-cost");

Wszystkie z wykonanych transwerterów zostały przetestowane we wskazanych przez gestora instytucjach. Wyniki badań są pozytywne, a tym samym urządzenia zostały zakwalifikowane do wdrożenia lub oczekują na wdrożenie, o czym świadczą załączone listy referencyjne.

W moim przekonaniu zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne transwertera jest na tyle uniwersalne, że może być wykorzystane w różnorodnych zastosowaniach.

Opisane urządzenia w 2013r. zgłoszono do Ogólnopolskiego Konkursie im. Stanisława Staszica organizowanego przez NOT. Kapituła konkursu przyznała I nagrodę "Złoty Laur Innowacyjności".

### Literatura spoza listy w p.3

- [1] [www.kbest.com](http://www.kbest.com)
- [2] <http://www.teletronics.com>
- [3] [www.transystem.com](http://www.transystem.com)
- [4] [www.mobicomm.com](http://www.mobicomm.com)

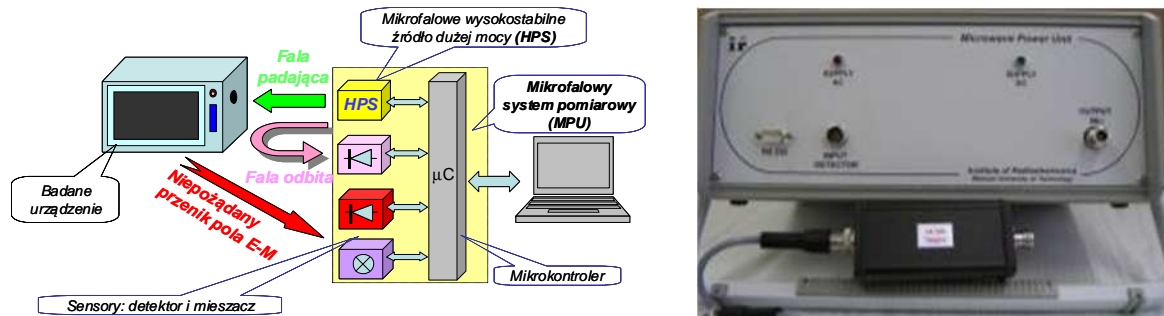
## 4c) Mikrofalowe systemy do testowania urządzeń grzania mikrofalowego

### Istota rozwiązywanego problemu i stan wiedzy przed rozpoczęciem prac

Zastosowanie energii mikrofalowej do grzania jest powszechne zarówno w gospodarstwach domowych jak i w wielu gałęziach przemysłu. Umożliwia to dostępność tanich źródeł dużej mocy, czyli magnetronów. W tym zastosowaniu stabilność fazy i częstotliwości nie stanowi istotnego ograniczenia. Te tanie generatory mają jednak kilka wad m.in. wysokie napięcie zasilające i w zasadzie brak możliwości realizacji przestrajania częstotliwości. Ponadto ze względu na zmienność parametrów generowanego sygnału nie nadają się do użycia w układach pomiarowych i w źródłach precyzyjnego grzania mikrofalowego. Dlatego coraz częściej jednostki naukowe i przemysłowe są zainteresowane szerszym wykorzystaniem półprzewodnikowych generatorów mocy. Na razie możliwości te są niewielkie z powodu bardzo dużych kosztów urządzeń w przeliczeniu na jednostkę generowanej mocy. Niemniej, w wielu wiodących na świecie firmach przemysłowych rozpoczęto intensywne badania nad optymalnym zastosowaniem tranzystorowych generatorów dużej mocy. Stało się to dzięki opanowaniu technologii mikrofalowych tranzystorów mocy na podłożach o szerokiej przerwie zabronionej głównie z azotku galu. W rezultacie pojawiła się tańsza alternatywa w postaci wytrzymałych i termicznie odpornych elementów GaN HEMT wobec drogich i nieodpornych tranzystorów mocy GaAs MESFET oraz mniej wytrzymałych temperaturowo krzemowych LDMOSFET. Dający się zauważyć spadek cen półprzewodników nie jest na tyle duży, aby całkowicie wyeliminować magnetrony. Jednak w perspektywie dekady sytuacja może się radykalnie zmienić. W kilku specjalizowanych urządzeniach jak np. precyzyjne reaktory chemiczne, czy generatory zimnej plazmy, już stosuje się źródła tranzystorowe. Ze względu na szerokie możliwości aplikacji oraz doświadczenie w zakresie konstruowania generatorów i wzmacniaczy mocy zespół, którym kierowałem, nawiązał współpracę z kilkoma firmami zagranicznymi dla realizacji półprzewodnikowych źródeł dużej mocy.

## Osiągnięte rezultaty ze szczególnym uwzględnieniem nowatorskich rozwiązań habilitanta

W odpowiedzi na zapotrzebowanie firm przemysłowych ze Skandynawii opracowałem koncepcję wielofunkcyjnego systemu grzania mikrofalowego. W zaproponowanym rozwiązaniu poszczególne źródła posiadają funkcje przestrajania częstotliwości, regulacji mocy wyjściowej, kształtowania charakterystyki grzania oraz pomiaru strat odbicia w zadanym pasmie i w zależności od poziomu mocy. Ważnym osiągnięciem jest samosterująca się pętla zmiany częstotliwości generowanego sygnału, przy którym uzyskuje się minimum modułu współczynnika odbicia obciążenia o zmiennych parametrach w funkcji temperatury, czyli grzania. Innymi słowy uzyskuje się maksimum wydzielanej mocy w badanym obciążeniu – obszarze grzania. Funkcjonalność pomiarowej jednostki mocy (MPU) z jednym źródłem wraz z gotowym urządzeniem pokazano na rys.4c.1.



Rys.4c.1. Koncepcja systemu pomiarowego z jednym źródłem oraz zdjęcie wykonanego urządzenia

Dodatkowo opracowałem podsystem kontroli wycieku energii z komory grzewczej. Zabezpieczenie komór przed przenikaniem energii na zewnątrz jest poważnym problemem i wymaganiem ze względów bezpieczeństwa. Pomiar częstotliwościowej charakterystyki wycieków mocy mikrofalowej z kuchenki (lub z instalacji przemysłowych) wymaga dynamiki ok.  $90 \div 100$  dB, ponieważ należy zmierzyć przenik na poziomie mikrowatów w obecności kilowatów dostarczonej mocy. Taką dynamikę uzyskuje się w nowoczesnych analizatorach obwodów, dla typowej mocy odniesienia do 10mW. Sygnały wycieku odbierane przez antenę testową (na poziomie rzędu -90dBm) znajduje się w tle szumów otoczenia. W tej sytuacji pomiary należy przeprowadzić przy pomocy analizatora widma w komorze bezdechowej, co jest bardzo kosztowne, a w przypadku dużych instalacji przemysłowych praktycznie niemożliwe. Dlatego rozszerzyłem możliwości jednostki mocy MPU o funkcję bezpośredniego pomiaru wycieku z dynamiką do ok. 110 dB. Dla uzyskania takiej dynamiki pomiaru, moc pobudzenia powinna wynosić +50 dBm, aby poziom mierzonego przeniku nie był mniejszy niż -60 dBm. Zwykle sygnał o mocy na poziomie -60 dBm jest wyraźnie widoczny na tle lokalnych szumów w laboratorium. Dla osiągnięcia takiej dynamiki należało zmodulować sygnał wyjściowy z jednostki MPU. Zaproponowane rozwiązanie jest względnie tanie, wygodne w użyciu i nie wymaga stosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej [5B].

Strukturę organizacyjną systemu z czterema jednostkami mocy MPU sterowanymi ze wspólnej jednostki centralnej MU (Master Unit) oraz ich wygląd pokazano na rys.4c.2 [10B].

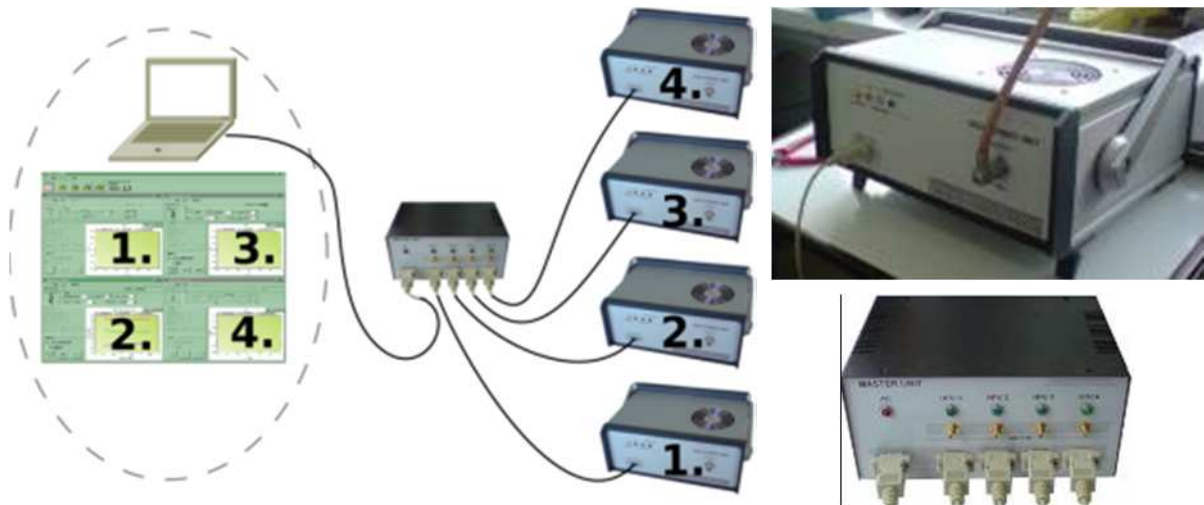
Każda z jednostek MPU jest autonomicznym urządzeniem, zdolnym do samodzielnej pracy, które może dostarczać w pasmie ISM2.45GHz (lub opcjonalnie w pasmie ISM915MHz) sygnał o regulowanej częstotliwości i amplitudzie w zakresie do 200W mocy średniej. Możliwe jest zsynchronizowanie kilku urządzeń MPU przy pomocy jednostki centralnej MU dla wygenerowania sygnałów o tej samej częstotliwości i regulowanych przesunięciach fazy między nimi.

Sterowanie zarówno wielomodułowym systemem pomiarowym jak i pojedynczą jednostką mocy MPU odbywa się z poziomu PC w środowisku wyspecjalizowanego oprogramowania, które opracowano także w celu programowania przebiegu bardzo różnych eksperymentów.

## Osiągnięte wyniki i wdrożenie

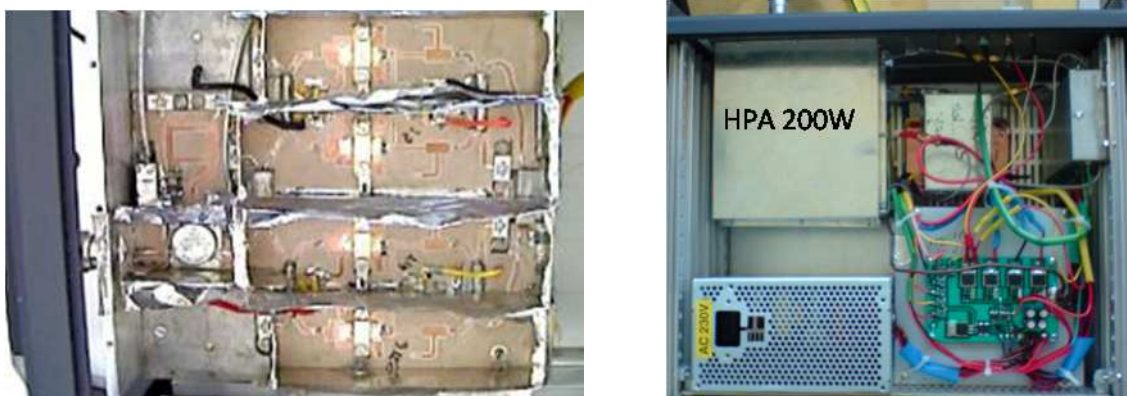
Zespół z IRE PW w składzie: prof. dr hab. W. Gwarek, dr inż. W. Wojtasiak (kierownik), dr inż. D. Gryglewski, mgr inż. P. Korpas wykonał w latach 2000÷2009 kilka zestawów jednostek mocy MPU na pasma 860÷960MHz i 2.35÷2.6GHz na zamówienie firm przemysłowych z branży AGD

(Whirlpool, Szwecja) [8S], chemicznej (Personal Chemistry, Szwecja) i produkcji drzewnej (RAUTE Oyj., Finlandia). Odbiorcy podkreślali unikatowość aparatury i jej duże walory użytkowe w praktycznych zastosowaniach przemysłowych.



Rys.4c.2. System precyzyjnego grzania złożony z 4 jednostek mocy MPU sterowanych ze wspólnego centrum zarządzania MU oraz fotografie wykonanych urządzeń MPU i MU

W konstrukcji wymienionych wyżej urządzeń starałem się wykorzystywać najnowsze osiągnięcia technologii mikrofalowych przyrządów półprzewodników. Ze względu na obszar moich zainteresowań, do realizacji ciągu wzmacniaczy z końcowymi stopniami o mocy wyjściowej ponad 200W (cw) wybrałem najnowocześniejsze i unikalne w tym czasie tranzystory mocy wytwarzane na podłożach GaN i SiC. Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń zdecydowałem o budowie toru wzmacniaczy dużej mocy z tranzystorami GaN HEMT (większe wzmocnienie, mniejsze napięcie zasilania, niższa cena niż SiC MESFET). Takie podejście okazało się słuszne, ponieważ producent zaprzestał produkcji tranzystorów SiC MESFET i obecnie żadna z firm nie oferuje tego rodzaju elementów. Projektowanie wzmacniaczy z GaN HEMT miało dla mnie aspekt poznawczy i stanowiło poligon doświadczalny dla dalszych prac nad układami mocy do zastosowań m.in. radiolokacyjnych. Widok końcowego stopnia o mocy ponad 200W w konfiguracji zrównoważonej oraz wnętrze jednostki mocy MPU przedstawiono na rys.4c.3.



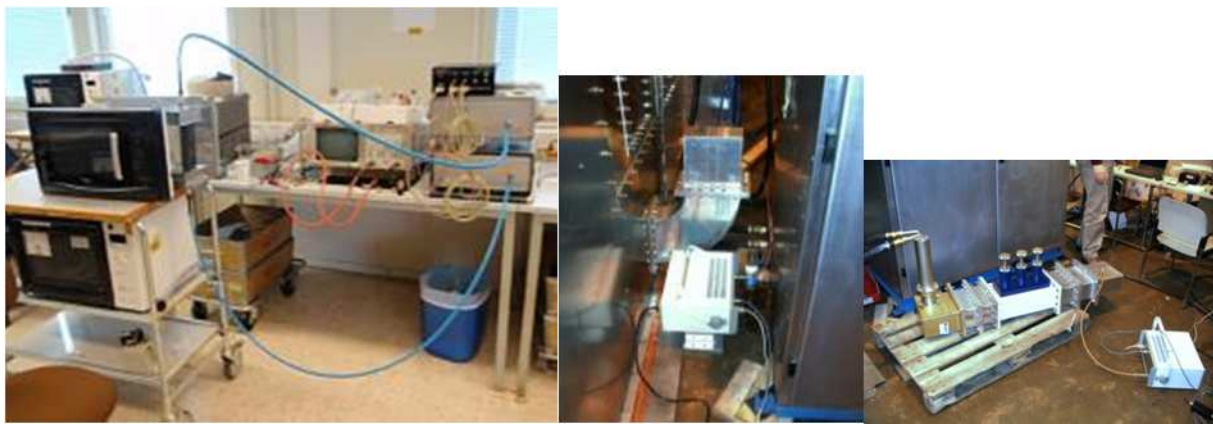
Rys.4c.4. Wzmacniacz HPA o mocy wyjściowej 200W(cw) w pasmie 2.35÷2.6GHz i wnętrze MPU

Opracowany system charakteryzował się następującymi możliwościami:

- pasma pracy 860÷960MHz lub 2.35÷2.6GHz
- poziom mocy wyjściowej ponad 100W lub 200W
- regulacja poziomu mocy wyjściowej 20dB z dokładnością do 0.5dB
- tryb pracy: z falą ciągłą i z modulacją (prostokąt 2kHz)
- pomiar strat odbicia w funkcji częstotliwości i mocy mikrofalowej w zakresie 30dB dynamiki
- pomiar poziomu wycieku pola elektromagnetycznego z dynamiką do 100dB

- analiza widmowa m.in. sygnału z typowego urządzenia grzewczego tj. z magnetronu
- automatyczne śledzenie częstotliwości minimum strat odbicia badanego urządzenia, np. w wyniku zmian parametrów grzanego materiału w funkcji temperatury i czasu
- regulacja fazy sygnału:  $0^{\circ} \div 360^{\circ}$  z krokiem  $5.623^{\circ}$  (MU)
- stabilność długoterminowa częstotliwości:  $\pm 2$ ppm
- stabilność krótkoterminowa częstotliwości:  $-75$ dBc/Hz@1kHz
- przestrajanie częstotliwości z krokiem  $1\text{MHz} \pm 0.1\text{MHz}$
- zakres mocy pomiaru wycieku  $-50\text{dBm} \div -10\text{dBm}$  (MPU)
- interfejs użytkownika i możliwość sterowania z poziomu PC
- specjalizowane oprogramowanie zainstalowane na PC

Zdjęcia ilustrujące pracę skonstruowanych urządzeń w warunkach badania nowego typu kuchenki mikrofalowej w siedzibie znanego producenta oraz testowania zespołu grzewczego do wytwarzania sklejek zaprezentowano na rys.4c.4.



Rys.4c.4. System MPU w badaniach kuchenki mikrofalowej i zespołu grzewczego produkcji sklejek

### Podsumowanie

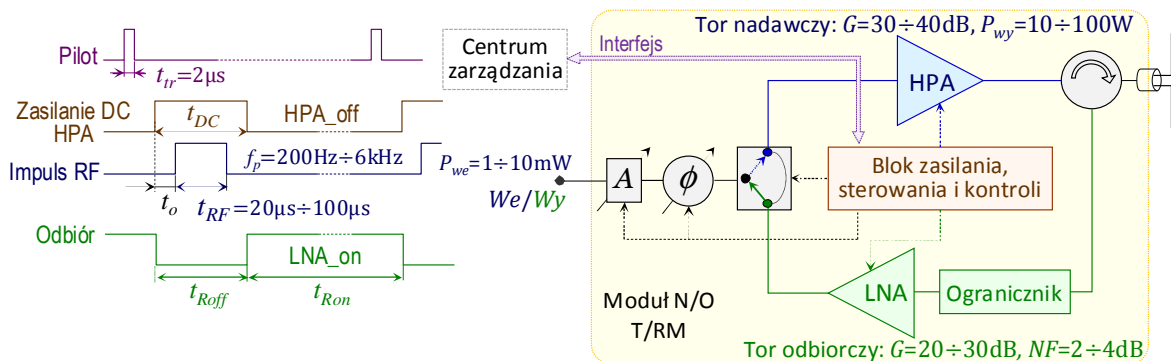
Mój oryginalny i nowatorski wkład w projekcie polegał na opracowaniu koncepcji i architektury urządzenia MPU. Określiłem także wymagania dla głównych bloków funkcjonalnych jednostki MPU. Do moich szczegółowych zadań konstrukcyjnych należało zaprojektowanie i wykonanie ciągu wzmacniaczy w celu uzyskania czystego widmowo sygnału o mocy 200W na wyjściu jednostki MPU w założonym pasmie. Ponadto opracowałem układy pomiaru mocy wyjściowej, odbitej i przenikającej. Jestem również współautorem programu sterowania MPU, procedury kalibracji oraz konstrukcji mechanicznej.

Skonstruowane urządzenia, w szczególności jednostki mocy MPU, są unikatowe – nie otrzymano żadnej oferty o zbliżonej funkcjonalności. Zawierają one nowatorskie rozwiązania związane m.in. z analizą termiczną i wytrzymałością użytych podzespołów. Zgodnie z warunkami umowy bliższe informacje mogą być udzielone jedynie za zgodą zleceniodawcy.

#### 4d) Mikrofalowe urządzenia nadawcze i odbiorcze dla obecnie stosowanych systemów radiolokacyjnych i radionawigacyjnych

##### Istota rozwiązywanego problemu i stan wiedzy przed rozpoczęciem prac

Okres ostatnich dwóch dekad był dla polskiego przemysłu radiolokacyjnego czasem, w którym narastała potrzeba nowych rozwiązań technicznych w wielu obszarach. Z jednej strony było to związane z coraz szerszym wdrażaniem mikrofalowych elementów półprzewodnikowych a z drugiej z zasadniczymi zmianami wymagań systemowych związanymi z przynależnością Polski do NATO i z nową sytuacją międzynarodową. W szczególności, rozwój technologii tranzystorów mocy dość skutecznie wyeliminował lampy LFB z nadajników wielu rodzajów systemów radarowych. Klasycznym przykładem systemów, w których tranzystory wyparły lampy są nadajniki cywilnych radarów kontroli obszaru IRS-20 i zbliżania ASR-10SS (SS – oznacza *solid state*) firmy Indra/Raytheon o mocy nadawanej odpowiednio 3.5kW i 16kW. Ewoluowała także koncepcja radaru dla potrzeb obrony powietrznej w kierunku konstrukcji rozproszonych takich jak pasywne i aktywne radary z elektronicznie sterowaną wiązką ESA (*Electronically Scanned Arrays*). Podstawowym elementem części mikrofalowej radaru aktywnego AESA jest moduł nadawczo-odbiorczy (N/O) bezpośrednio dołączany do jednego z promienników tworzących szyk antenowy. Projektowanie modułów N/O dla radarów AESA stanowi jeden z ważniejszych obszarów mojej działalności badawczo-konstrukcyjnej, dlatego szerzej przedstawiam to zagadnienie. Moduły N/O dla systemów radarowych AESA należą do wysoce specjalizowanych układów zarówno funkcjonalnie, jak i konstrukcyjnie. Funkcjonalnie, ponieważ T/RM (*Transmit/Receive Module*) realizuje dwukierunkową transmisję złożonych sygnałów RF, przetwarzanie i wymianę danych z centrum zarządzania oraz wytwarza dla własnych podzespołów odpowiednie sygnały sterowania i napięcia zasilania DC. Problemy konstrukcyjne wynikają wprost z częstotliwości pracy radaru i możliwości dostępu do optymalnych mikrofalowych elementów półprzewodnikowych. Uproszczony schemat funkcjonalny modułu N/O wraz z orientacyjnymi wartościami parametrów i algorytmem sterowania pokazano na rys.4d.1 [2B].



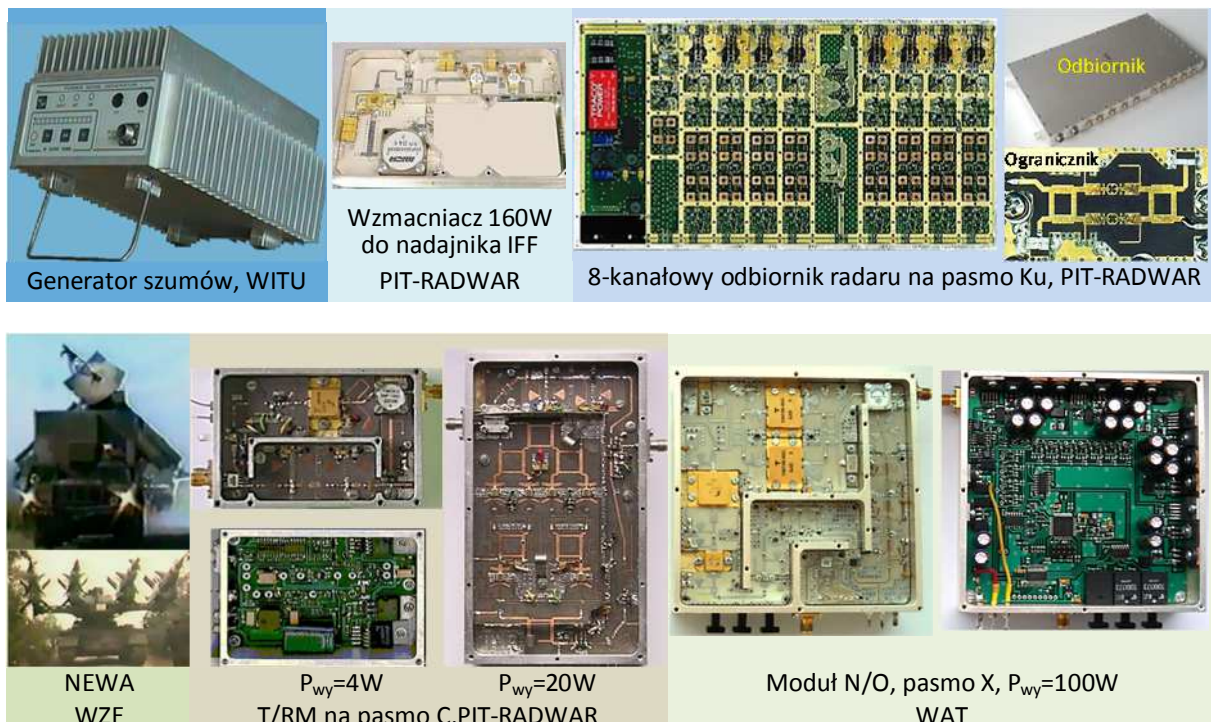
Rys.4d.1. Schemat funkcjonalny modułu N/O i algorytm sterowania w uproszczeniu

Moduł N/O składa się z torów nadawczego, odbiorczego i części wspólnej dla obu torów. W torze sygnału w kierunku anteny znajduje się wielostopniowy wzmacniacz mocy HPA (*High Power Amplifier*). Na wejściu toru odbiorczego jest ogranicznik poprzedzający wzmacniacz niskoszumny LNA (*Low Noise Amplifier*). Część wspólna zawiera następujące elementy: regulowany tłumik A, przesuwnik fazy  $\phi$ , przełącznik N/O, cyrkulator oraz blok zasilania, sterowania i kontroli wyposażony w interfejs dla komunikacji z jednostką nadrzędną – centrum zarządzania. Dla przejrzystości na rys.4d.1 podano tylko główne podzespoły T/RM (*Transmit/Receive Module*). Ze względu na stosunkowo niski wymagany poziom mocy wyjściowej z pojedynczego modułu N/O możliwe było wykorzystanie do jego budowy mikrofalowych tranzystorów mocy, a w późniejszym czasie układów scalonych (MMIC). Pierwsze moduły N/O z krzemowymi przyrządami opracowano w połowie lat 60. XX wieku [2]. Dopracowanie technologii arsenku galu (GaAs) miało być punktem zwrotnym w konstruowaniu T/RM. Początkowo parametry i cena, zwłaszcza tranzystorów mocy typu GaAs MESFET, nie spełniały oczekiwań. Dopiero na przełomie XX i XXI wieku uzyskano parametry

przyrządów z arsenku galu spełniające wymagania, przy kosztach na tyle racjonalnych, że możliwe było ich zastosowanie na większą skalę w modułach N/O. Jednak nawet teraz nakłady finansowe na wielomodułowy blok nadawczo-odbiorczy radaru są bardzo wysokie. Dlatego nadal poszukuje się innych, tańszych i bardziej odpowiednich materiałów półprzewodnikowy dla realizacji zarówno układów scalonych jak i tranzystorów mocy dla T/RM. Obecnie w krajach najbardziej rozwiniętych technologicznie obserwować można tendencję do coraz większej integracji modułów N/O na bazie nowych technologii półprzewodnikowych. Prace w tym kierunku podejmują również polskie ośrodki naukowe i przemysłowe, o czym będzie mowa w p.4e autoreferatu.

### Zastosowane rozwiązania z podkreśleniem nowatorskiego wkładu habilitanta

Od ponad 20 lat zajmuję się konstruowaniem mikrofalowych bloków i modułów N/O dla różnych systemów radiolokacyjnych i radionawigacyjnych na pasma od L do Ku włącznie na zlecenie Wojskowych Zakładów Elektronicznych (WZE), Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia (WITU), Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) i PIT-RADWAR. Realizacja opisanych prac nad urządzeniami specjalnego przeznaczenia przypadł na okres, w którym większość polskich instytucji miała poważne trudności z pozyskiwaniem mikrofalowych elementów półprzewodnikowych. Brak rodzimej produkcji zmuszał nas do zakupów tych podzespołów za granicą, gdzie spotykaliśmy się z utrudnieniami natury politycznej, bowiem deklaracja dotycząca zastosowania powodowała często odmowę dostarczenia zamawianych elementów. Były też bariery natury ekonomicznej charakteryzujące się zawyżaniem ceny, wymaganiem zakupu minimalnej ilości podzespołów liczonej w tysiącach sztuk lub ograniczaniem asortymentu dla promocji własnych wyrobów gotowych. Taka sytuacja w dostępie do odpowiednich mikrofalowych tranzystorów i układów scalonych stanowiła w pewnym sensie wyzwanie natury inżynierskiej. Chodziło o spełnienie założeń projektowych z wykorzystaniem nieoptymalnych elementów. Kilka wybranych urządzeń, bloków RF i modułów N/O dla radarów i systemów radionawigacyjnych wykonanych w tym na czasie zlecenie wymienionych instytucji pokazano na rys.4d.2.



Rys.4d.2. Widok skonstruowanych urządzeń, bloków RF i modułów N/O

Źródła szumów na pasma L, S o mocy wyjściowej odpowiednio 12W i 10W zaprojektowałem przy udziale dr. inż. Daniela Gryglewskiego dla WITU [1S] - producenta generatorów szumów. Oryginalność rozwiązań zastosowanych w generatorze szumów została potwierdzona patentem nr PL334534, którego jestem współautorem. Mój indywidualny wkład dotyczył przede wszystkim



projektowania wielostopniowych wzmacniaczy mocy sygnału szumowego. Ze względu na naturę wzmacnianego szumu, typu śrutowego, od wzmacniacza wymagano dużej liniowości. Chodziło o to, aby na wyjściu układu uzyskać amplitudy sygnału szumowego większe niż 4-krotna wartość napięcia skutecznego (potocznie:  $\geq 4\sigma$ ). Dodatkowo konieczne było zredukowanie wpływu temperatury, w bardzo szerokim zakresie, na parametry stopni mocy. Dla przykładu, w zakresie 20 dB dynamiki regulacji, poziom mocy wyjściowej nie zmieniał się więcej niż 1.5 dB w przedziale temperatur otoczenia od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$  [2C], [12E], [14E].

Na zlecenie PIT-RADWAR skonstruowałem impulsowy wzmacniacz klasy C do miniaturowego nadajnika IFF [2S]. Specyficznym wymaganiem był bardzo niski poziom II i III harmonicznej, który osiągnąłem przy pomocy odpowiednio zaprojektowanych obwodów dopasowujących tranzystory w kolejnych stopniach. Ponadto, dla zmniejszenia wymiarów, dwa pierwsze stopnie połączyłem międzystopniowym obwodem dopasowującym. Dopasowanie tych stopni uzyskano bez stosowania obwodów dopasowujących tranzystory do impedancji charakterystycznej toru  $50\ \Omega$ . Dzięki temu zmniejszono rozmiary całego wzmacniacza. Stopień końcowy również zoptymalizowałem pod względem zminimalizowania rozmiarów. Opracowany wzmacniacz zapewniał moc wyjściową ponad 160 W w impulsie przy wzmacnieniu 23 dB i parametrach czasowych impulsu spełniających założenia projektowe [3E].

W przypadku 8-kanalowego odbiornika do radaru na pasmo Ku zaproponowałem oryginalne rozwiązanie układowe ogranicznika z wykorzystaniem ograniczających diod pin w postaci chipów krzemowych. Ten element toru odbiorczego bywa często niedoceniany. Metody konstrukcji ograniczników diodowych dla zabezpieczenia odbiorników specjalnego przeznaczenia nie są dostatecznie opisane w dostępnej literaturze. Dlatego w swojej działalności poświęciłem wiele uwagi tej problematyce. Zwłaszcza, że jestem konstruktorem tych układów dla wielu bloków RF [21E]. Niewątpliwie moim oryginalnym osiągnięciem w tym przypadku było wykorzystanie możliwości montażu diody bez oprawki dla skompensowania nadmiaru pojemności diody zewnętrzną indukcyjnością. Wartość indukcyjności optymalizuje się dla danej nadwyżki pojemności diody poprzez dobór ilości i długości połączeń drutowych (bonding). Zaproponowany sposób przynosi korzystne efekty w sytuacji konstruowania ogranicznika przewidywanego do pracy w wyższych pasmach i o dużej wytrzymałości. To podejście pozwala na realizację układu ograniczającego z wykorzystaniem bardziej odpornych diod krzemowych, ale o większej pojemności niż mało wytrzymałych diod Schottky'ego, ale o znacznej mniejszej pojemności. Dla przykład, jednodiodowy ogranicznik (z diodą rekomendowaną na pasmo X) wnosił straty poniżej 0.4 dB przy dynamice ponad 12dB w zadanym pasmie Ku. Uzyskane wyniki były zbliżone do danych sugerowanych przez producenta diody, ale w pasmie X. Kompletny zrównoważony 2-płaszczyznowy ogranicznik wprowadzał straty wtrąceniowe ok. 1dB i tłumienie w zakresie ograniczania na poziomie 27 dB. Ogranicznik spełniał swoje funkcje dla mocy wejściowej do 20 W w impulsie (długość 50  $\mu\text{s}$ , wypełnienie 20%) i do 4 W cw [2S], [17E]. Układy ograniczające oferowane przez zagranicznych producentów w pasmie odbiornika charakteryzują się gorszymi parametrami np. straty wnoszone przekraczają 2 dB.

W ramach modernizacji zestawu raketowego "Newa" skonstruowałem (do nadajnika komend sterowania raketą) modulator AM i wzmacniacz o mocy wyjściowej 20 W (cw), wzmacnieniu 40 dB przy bardzo niewielkich zniekształceniach nieliniowych oraz (do bloku impulsów zapytania), wzmacniacz klasy C o mocy wyjściowej 0.7 kW, wzmacnieniu 47 dB i czasach narastania i opadania impulsu mniejszych niż 100ns [1C]. Do oryginalnych rozwiązań należy zaliczyć konstrukcję tranzystorowego (GaAs MESFET) modulatora z drenową, sinusoidalną modulacją amplitudy o współczynniku głębokości modulacji 70%. Wówczas żaden z komercyjnie oferowanych modulatorów nie spełniał założeń projektowych. Podobnie rzecz się miała z pozostałymi układami. Dla osiągnięcia dużej liniowości wzmacniacza komend zastosowałem tranzystory GaAs MESFET klasy A sterowane dużym prądem drenu oraz zaprojektowałem obwody dopasowujące, które zapewniały optymalną impedancję obciążenia w kolejnych stopniach. Wzmacniacz impulsów zapytania zawierał ciąg stopni z typowymi tranzystorami klasy C dla zastosowań awionicznych. Oryginalny pomysł polegał na opracowaniu struktury obwodów dopasowujących zoptymalizowanej ze względu na minimalizację

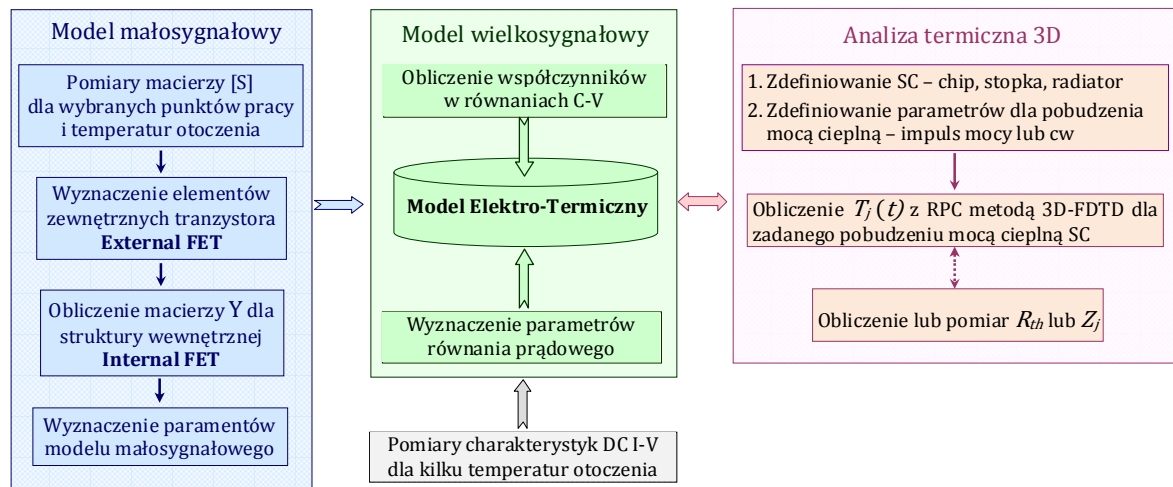
parametrów czasowych impulsu oraz redukcję liczby stopni dla uzyskania założonego poziomu mocy wyjściowej. Dokumentacja wykonanych układów jest do wglądu.

Moduły N/O dla AESA (rys.4d.2) zrealizowałem wraz z zespołem w pierwszej dekadzie XXI wieku. W tym celu wykorzystałem mikrofalowe elementy półprzewodnikowe z arsenku galu, w większości w obudowach, montowanych w obwodach zbudowanych z odcinków niesymetrycznych linii paskowych (NLP). Zaprezentowane konstrukcje T/RM są typowymi przykładami stanu techniki dla końca XX i początku XXI wieku [2S], [2B], [4B], [3C], [5C], [6E]. Tylko w module na pasmo X udało się zastosować część tranzystorów mniejszej mocy w postaci chipów [22E], [1D]. Pomimo trudności z pozyskiwaniem tranzystorów i układów scalonych, parametry modułów spełniły oczekiwania zamawiających, szczególnie, gdy jednym z wymagań było ograniczenie kosztów.

Do moich oryginalnych osiągnięć w pracach nad modułami N/O zaliczam zidentyfikowanie przyczyn zmian fazy transmitancji wzmacniaczy mocy HPA w trakcie impulsu RF. Ze względu na rodzaj modulacji sygnału sondującego w radarach AESA, stałość transmitancji toru nadawczego T/RM jest jednym z ważniejszych parametrów. W trakcie pomiarów modułów N/O zaobserwowałem zmiany fazy transmitancji wzmacniaczy w czasie trwania impulsu RF. Poziom tych zmian zależał od czasu opóźnienia  $t_o$  impulsu RF względem momentu włączenia zasilania DC tranzystorów toru nadawczego (rys.4d.1). Szczególnie interesujące było to, że tranzystory pracowały w klasie A poniżej punktu 1dB kompresji wzmocnienia. Fakt ten stał się inspiracją do dalszych badań nad wyjaśnieniem tego zjawiska, których rezultatem było opracowanie oryginalnego elektryczno-termicznego modelu tranzystora mocy GaAs MESFET. Nowatorskie podejście polegało na uwzględnieniu wpływu efektu samonagrzewania, czyli chwilowej temperatury wnętrza obszaru aktywnego tranzystora w modelu elektrycznym. Chwilowy rozkład temperatury jako odpowiedź na pobudzenie mocą cieplną reprezentowaną przez moc rozpraszaną w elemencie, wyznaczyłem w wyniku rozwiązania równania przewodnictwa ciepła w 2- lub 3-wymiarowej strukturze tranzystora metodą jawną FDTD. Obliczoną wartość temperatury po odpowiednim przestrzennym uśrednieniu w kanale tranzystora podstawia się do elektrycznych równań modelu. Do tej pory, zależność temperaturową modelowano zwykle przy pomocy rezystancji termicznej lub prostego obwodu typu dolnoprzepustowego, złożonego z równolegle połączonych rezystancji i pojemności termicznych. W przypadku tranzystorów mocy GaAs MESFET (o grubościach chipów rzędu  $30\mu\text{m}$ ) termiczne stałe czasowe są na tyle małe, że dla typowych długości impulsów sondujących AESA pojawia się istotna różnica temperatury obszaru aktywnego pomiędzy początkiem a końcem impulsu mocy. Impulsowe zasilanie DC i sterowanie RF (typowe dla T/RM) wzmacniacza wywołuje zmiany temperatury kanału tranzystora, które następnie przenoszą się na parametry elektryczne, w końcu zmieniając fazę transmitancji [4C] [14C]. Przeprowadzone badania impulsowych wzmacniaczy z tranzystorami HEMT i LDMOSFET w warunkach pracy w klasach A, AB i C potwierdziły wpływ efektu samonagrzewania na przebieg transmitancji mierzony w impulsie RF. Z powodu bardzo małych wahań mocy rozpraszanej w tranzystorach LNA problem nie występuje w torze odbiorczego. Brak stałości transmitancji toru nadawczego można uwzględnić w procesie kalibracji. Jednak zapisanie danych kalibracji z  $5\ 000 \div 10\ 000$  sztuk T/RM i następnie ich przetwarzanie wymaga wykorzystania dodatkowych, cennych zasobów pamięci i prowadzi do spowolnienia pracy systemu. W związku z tym zaproponowałem zautomatyzowany układ wewnątrz modułu, który spełnia funkcje pomiarowe, a następnie w czasie pracy modułu automatycznie ustala warunki polaryzacji tranzystorów tak, aby zmiany fazy transmitancji były możliwie małe.

We wszystkich przedstawionych urządzeniach nadawczych i odbiorczych kluczowym elementem jest wzmacniacz. Projektowanie mikrofalowych wzmacniaczy (głównie mocy) stanowi mój najważniejszy obszar działalności. W celu wspomagania konstruowania stopni mocy z uwzględnieniem zarówno efektów nieliniowych jak i termicznych, zaproponowałem quasi-empiryczny, zaciskowy typ modelu tranzystora [6B]. Założyłem, że tranzystor mocy reprezentowany jest przez dwuwrotnik z uziemioną jedną z elektrod, którą zwykle jest źródło. Podejście takie okazało się skuteczne pomimo braku odniesienia się do ściślej, fizycznej interpretacji poszczególnych warstw i obszarów półprzewodnika, architektury celi, chipu i ew. obudowy oraz takich elementów jak

połączenia drutowe, pola wyprowadzeń, wewnętrzne obwody dopasowujące oraz dzielniki i sumatory mocy. Algorytm wyznaczania parametrów w opracowanym elektryczno-termicznym modelu tranzystorów LD MOSFET, MESFET i HEMT przedstawiono na rys.4d.3.



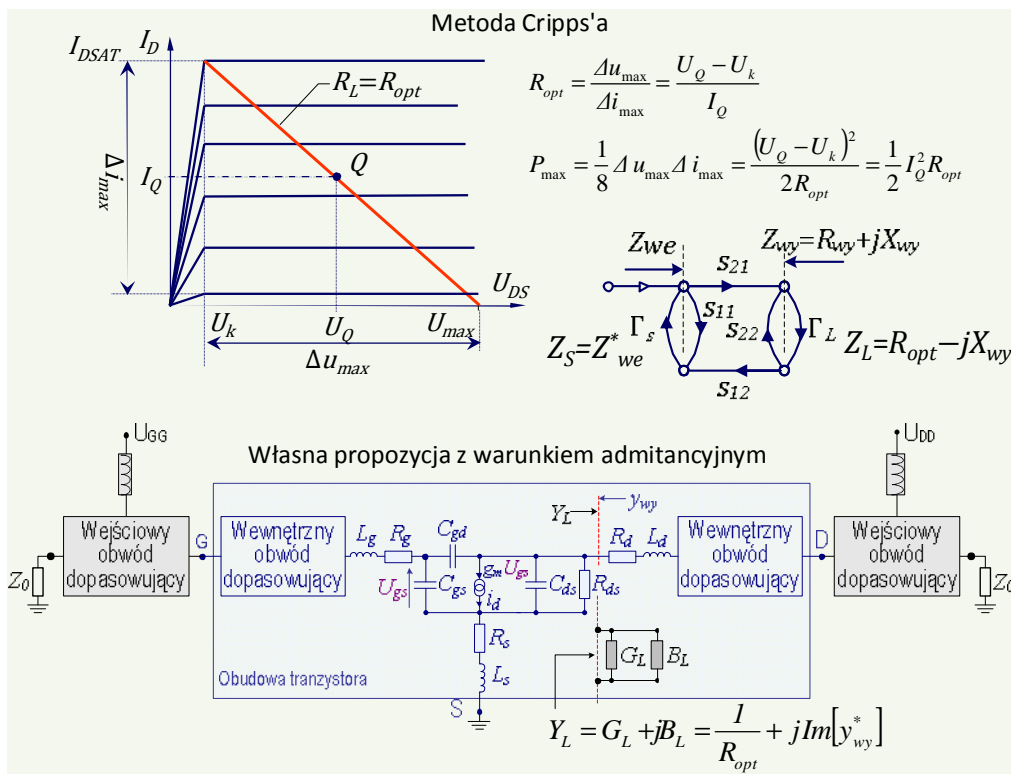
Rys. 4d.3. Elektryczno-termiczne modelowanie mikrofalowych tranzystorów mocy typu MESFET, HEMT i LD MOSFET (SC – struktura cieplna tranzystora, RPC – równanie przewodnictwa ciepła)

Główne równanie prądowe jest nieliniową funkcją napięć na zaciskach i temperatury wnętrza tranzystora. Współczynniki tego równania są obliczane na podstawie charakterystyk DC I-V i parametrów małosygnalowych. Nieliniowe pojemności C-V modelu wyznacza się z macierzy [S] zmierzonych w odpowiednio dobranych punktach pracy tranzystora i dla zadanych wartości temperatury otoczenia. Wyznaczony, w wyniku rozwiązania równania przewodnictwa ciepła (RPC) lub na podstawie pomiaru przejściowej impedancji termicznej  $Z_{jth}$ , rozkład temperatury  $T_j(t)$  podstawiany jest do równań części elektrycznej modelu. W pierwszym przypadku, przejście od rozkładu czasowo-przestrzennego  $T_j(x,y,z,t)$  do przebiegu czasowego  $T_j(t)$  wymaga uśrednienia po powierzchni w danym przekroju poprzecznym chipu. Statyczny efekt temperaturowy uwzględnia się przy pomocy rezystancji termicznej  $R_{th}$ .

Modelowanie nieliniowe wymaga jednak bardzo dużych nakładów pomiarowych i obliczeń numerycznych [6B], [18E]. W wielu przypadkach praktyki inżynierskiej nie ma potrzeby używania tak zaawansowanego aparatu dla projektowania wzmacniaczy mocy klasy A, AB z wykorzystaniem chipów lub tranzystorów w obudowach. Właśnie takie układy dominują w zastosowaniach specjalnych. W projektowaniu wzmacniaczy liniowych lub quasi-liniowych z powodzeniem można stosować podejście małosygnalowe, którego reprezentantem jest bardzo popularna metoda Cripps'a wyznaczania wartości impedancji obciążenia optymalnej dla maksymalnej mocy wyjściowej na podstawie charakterystyk statycznych DC I-V oraz małosygnalowej impedancji wyjściowej w danym punkcie pracy tranzystora [1]. Warunek impedancyjny polecany przez Cripps'a sugeruje obwód szeregowy, jako obciążenie, abstrahując od rzeczywistej struktury obwodowej wyjścia tranzystora, która, w przypadku MESFET i HEMT, ma postać obwodu równoległego – równoległe połączenie  $C_{DS}$  i  $R_{DS}$  na schemacie zastępczym. Dlatego naturalne wydaje się być zdefiniowanie warunku admitancyjnego w płaszczyźnie elementów  $C_{DS}$  i  $R_{DS}$  [12B]. Moją korektę metody Cripps'a dla obliczania admitancji obciążenia optymalnej dla maksimum mocy wyjściowej pokazano na rys.4d.4.

Admitancja  $Y_L$  reprezentuje obciążenie także w postaci obwodu równoległego, ponieważ wpływ rezystancji kontaktu ohmowego i indukcyjności doprowadzeń drenu może być pominięty. Ustalenie warunku admitancyjnego wewnątrz tranzystora ułatwia uwzględnienie połączeń drutowych i innych elementów montażu oraz wewnętrznego obwodu dopasowującego na podstawie pomiarów zaciskowych. Takie podejście jest szczególnie przydatne w odniesieniu do mikrofalowych tranzystorów dużej mocy wstępnie dopasowanych w określonym pasmie zamkniętych w obudowach. Aby skorzystać z warunku admitancyjnego należy dysponować przynajmniej małosygnalowym

modelem tranzystora. W tym celu opracowałem metodykę ekstrakcji wartości elementów schematu zastępczego tranzystora na podstawie zmierzonych macierzy [S] tylko dla trzech punktów pracy tj. dla stanu: wyłączenia *Off* ( $V_{GS}=V_{pinch-off}$ ,  $V_{DS}=V_Q$ ), włączenia *On* ( $V_{GS}=0V$ ,  $V_{DS}=0V$ ) i w planowanych warunkach pracy *Nb* ( $V_{DS}=V_Q$ ,  $I_D=I_Q$ ) [4B], [4C]. Procedurę modelowania zapisano w symulatorze ADS.



Rys.4d.4. Korekta metody Cripps'a wyznaczania impedancji obciążenia dla uzyskania maksymalnej mocy wyjściowej w danych warunkach zasilania DC tranzystora

Wartości parametrów modelu wyznacza się w procesie dopasowania zmierzonych i symulowanych przebiegów wyrazów macierzy [S] tranzystora w jak najszerszym przedziale częstotliwości znacznie przekraczającym pasmo pracy projektowanego wzmacniacza. Wprowadzenie nadmiarowej liczby danych w postaci trzech macierzy [S] dla trzech stanów pracy elementu aktywnego pozwala na lepsze uwarunkowanie zadania optymalizacyjnego i przyspieszenie obliczeń. Następnie przeprowadza się syntezę obwodów dopasowujących i zasilania DC dla uzyskania maksymalnej mocy wyjściowej w założonym przedziale częstotliwości pod warunkiem stabilności układu dla zadanych wartości wzmocnienia i strat odbicia na wejściu wzmacniacza. Układ powinien być stabilny w całym pasmie działania modelu, a nie tylko w zadanym pasmie pracy wzmacniacza. Z powodu ograniczonej izolacji tranzystora ( $s_{12} \neq 0$ ), warunek admitancyjny oraz pozostałe wymagania można spełnić jedynie w procesie iteracyjnym. Dołączenie obwodu dopasowującego do wrót wejściowych tranzystora wywołuje zmianę admitancji wyjściowej  $y_{wy}$  w wybranej płaszczyźnie. W reakcji należy skorygować wyjściowy obwód dopasowujący, aby uwzględnić tę zmianę w admitancji obciążenia  $Y_L$  i ponownie spełnić warunek admitancyjny. Korekcja obwodu wyjściowego wymusza dostrojenie obwodu na wejściu tranzystora dla osiągnięcia założonego poziomu wzmocnienia i strat odbicia w pasmie pracy. W kolejnych iteracjach powtarza się tę procedurę, aż do osiągnięcia zadowalających wyników.

Na podstawie dotychczas wykonanych bardzo wielu wzmacniaczy na różne pasma i o różnych mocach wyjściowych osiągających poziomy setek watów, mogę stwierdzić, że zaproponowana metoda doskonale się sprawdza w projektowaniu stopni liniowych i quasi-liniowych.

W celu weryfikacji symulacji termicznych dla wyznaczania temperatury  $T_j(t)$  obszaru aktywnego tranzystorów MESFET/HEMT, zespół z moim udziałem zbudował własny układ pomiarowy bazując na metodzie pośredniej tzw.  $\Delta V_{GS}$  zgodnej z normą MIL-STD-750D-M3104, którą zmodyfikowaliśmy

dla ograniczenia błędów pomiaru i uzyskania rozdzielczości czasowej poniżej 100ns. Dokonana nowatorska modyfikacja polega na pomiarze zmian napięcia bramka-źródło  $V_{GS}$  po procesie grzania tranzystora, w przewidywanym punkcie pracy dla uzyskania maksymalnej mocy wyjściowej. W standardowej metodzie  $\Delta V_{GS}$ , stały prąd bramki płynie przez cały czas trwania pomiaru, a grzanie odbywa się dla niskiego napięcia dren-źródło  $V_{DS}$  [11C].

#### **Podsumowanie osiągniętych wyników i wdrożenia**

Do moich nowatorskich i oryginalnych rozwiązań i konstrukcji należy:

- Opracowanie źródeł szumów, zwłaszcza wielostopniowych wzmacniaczy z uwzględnieniem natury sygnału szumowego – wdrożenie w WITU;
- Skonstruowanie niewielkich rozmiarach wzmacniacza nadajnika dla systemu IFF – wdrożenie RADWAR;
- Zaproponowanie układu ogranicznika z kompensacją nadmiaru pojemności diody zewnętrznej indukcyjnością i bez przerywania linii prądu – zastosowania: odbiornik dla radaru na pasmo Ku, moduły N/O AESA;
- Opracowanie architektury modułu N/O dla AESA i wykonanie szeregu modułów na pasma do X włącznie – osiągnięte rezultaty moich prac zaowocowały moim udziałem wraz z zespołem w programie "Wisła" w zakresie opracowania konstrukcji i technologii modułów N/O dla radaru na pasmo X
- Uwzględnienie w modelowaniu tranzystorów mocy efektu samonagrzewania przez uzależnienie parametrów elektrycznych modelu od chwilowej temperatury obszaru aktywnego elementu wyznaczonej z równania przewodnictwa ciepła lub pomiaru odpowiedzi termicznej przy pomocy zmodyfikowanej metody  $\Delta V_{GS}$  ;
- Identyfikacja przyczyn i podanie sposobu minimalizacji zmian fazy transmitancji wzmacniaczy mocy klas A, AB konstruowanych dla modułów N/O AESA;
- Opracowanie względnie prostej i efektywnej metody projektowania mikrofalowych wzmacniaczy mocy z tranzystorami MESFET/HEMT pracujących w klasie A lub AB.

#### **Literatura spoza listy w p.3**

[1] Walker J., "High- Power GaAs FET Amplifier", Artech House, Inc. 1993

### **4e) Prace związane z wizją gruntownej modernizacji systemów radiolokacyjnych produkowanych w Polsce**

#### **Istota rozwiązywanego problemu i stan wiedzy przed rozpoczęciem prac**

W poprzednim punkcie przedstawiono szereg rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń dla radiolokacji i radionawigacji. Przy konstruowaniu tych urządzeń coraz bardziej widoczna staje się konieczność zmiany technologii mikrofalowych bloków nadawczych i odbiorczych. Na poziomie wytwarzania tranzystorów i układów scalonych dla systemów radarowych, dokonuje się obecnie odchodzenie od stosowania arsenku galu i materiałów pochodnych w kierunku wykorzystania półprzewodników szerokoprzerwowych. Z dostępnych informacji wynika, że w najbardziej zaawansowanych technologicznie krajach europejskich zapadły już decyzje, aby technologia GaN HEMT na podłożu SiC stanowiła podstawę produkcji mikrofalowych elementów aktywnych dla radiolokacji [1]. Ponadto obserwuje się postępującą integrację coraz większej liczby podzespołów w jednym układzie scalonym. Obecnie jedynym przykładem daleko idącej integracji jest już dostępny na rynku układ GaAs MMIC tzw. rdzeń (core chip) na pasmo X integrujący część małej mocy modułu N/O tj. stopnie sterujące, cyfrowo regulowany tłumik i przesuwnik fazy (po 6-bit), przełącznik N/O i fragment bloku sterowania [2]. Na razie układy scalone z azotku galu są wytwarzane jedynie w skali laboratoryjnej. Rozpoczęto natomiast intensywne wdrażanie rezultatów zakończonych programów badawczych np. europejskich (KORRIGAN, Saturne, MorGaN), a także uruchomiono nowe projekty takie jak GREAT, czy MAGNUS. Jednym z celów ostatniego z wymienionych jest scalony wzmacniacz GaN HEMT na pasmo X o mocy wyjściowej 25W i sprawności 50%. Następuje również zmiana techniki realizacji

modułów N/O oraz innych bloków typu "Front-End" polegająca na rezygnacji z elementów w obudowach na rzecz chipów i zastosowaniu technologii grubowarstwowej. Jednak na razie nie jest realne wykonanie w technologii monolitycznej kompletnego modułu N/O o poziomie mocy wyjściowej akceptowalnym przez konstruktorów radarów AESA. Przy aktualnym stanie technologii moduł N/O może zawierać 3 mikrofalowe układy scalone (rdzeń, wzmacniacz mocy i wzmacniacz niskoszumny) oraz krzemowy układ scalony integrujący części analogową (obwody zasilania DC, sterowania i kontroli) oraz cyfrową (interfejs, rejestry, kontroler). Poszczególne podzespoły mikrofalowe są połączone liniami mikropaskowymi (NLP). Takie rozwiązanie stosują wiodący producenci modułów N/O bloków mikrofalowych dla radarów [3].

Na podstawie zarysu stanu technologii modułów N/O dla systemów radiolokacyjnych można sformułować wniosek, że dla utrzymania konkurencyjności krajowego przemysłu radiolokacyjnego konieczny jest skok technologiczny o co najmniej dwie generacje. W moim przekonaniu przeskok o jeden poziom jest niewystarczający. Istnieje potrzeba i możliwość przejścia od razu do wdrożenia technologii monolitycznej dla integracji głównych podzespołów bloków "Front-End". Jest to tym bardziej uzasadnione, że pojawiła się konieczność istotnej poprawy funkcjonalności polskiej obrony przeciwrakietowej. Uruchomiono ostatnio programy badawcze mające na celu opracowanie tego typu systemów średniego zasięgu (program "Wisła") oraz krótkiego zasięgu (program "Narew"). W obu programach kluczową rolę odgrywają sensory radarowe. Powstaje zasadnicze pytanie, czy polski przemysł (wspierany przez polską naukę) będzie w stanie przygotować odpowiednie rozwiązania, czy też (jak to miało miejsce w wielu innych dziedzinach) będziemy zmuszeni do zakupu całych systemów u kontrahentów zagranicznych.

#### **Osiągnięte wyniki z podkreśleniem nowatorskiego wkładu habilitanta**

Od kilku lat jestem zaangażowany w prace programu "Wisła". W raportach i publikacjach przedstawiam moje stanowisko, że możliwe jest opracowanie zintegrowanych radiolokacyjnych modułów nadawczo-odbiorczych z wykorzystaniem elementów z azotku galu (GaN) wytworzonych w całości polskiej technologii. Przeprowadzone dotychczas prace, w których uczestniczę, potwierdzają te optymistyczne przewidywania. W szczególności, kieruję zespołami w Instytucie Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej realizującymi zadania w ramach projektu PolHEMT i programu "Wisła".

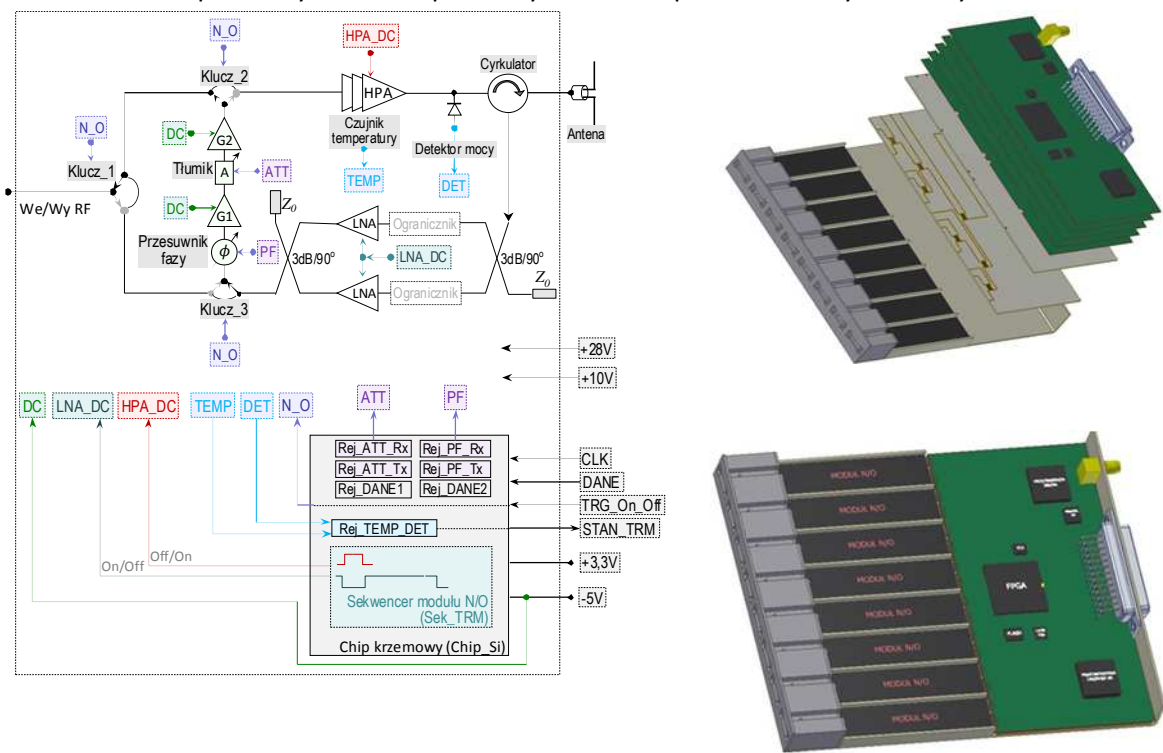
Celem projektu PolHEMT jest wytwarzanie mikrofalowych tranzystorów mocy w technologii GaN HEMT na krajowym monokrystalicznym podłożu GaN na potrzeby polskiej radiolokacji [10S]. Efektem końcowym projektu realizowanego przez konsorcjum w składzie ITE, IWC, TopGaN, Ammono, IRE PW jest tranzystor GaN HEMT na pasmo S o mocy wyjściowej 12W wytworzony na podłożu GaN wyprodukowanym przez Ammono [2A]. Planowane zakończenie projektu nie jest zagrożone (koniec 2015), ponieważ już obecnie dysponujemy strukturami o jakości na poziomie wiodących firm. Obecnie parametry podłoży produkowanych przez Ammono spełniają w pełni wymagania formułowane dla materiałów półizolacyjnych (SI) przy rozmiarach płytek 2 cale. Wytworzone na tych podłożach tranzystory nie wykazywały żadnych upływności. Liniowość kontaktów ohmowych jest także bardzo duża (współczynnik liniowości wynosi niemal 100%). Wzmocnienie samego tranzystora [s21] było większe od 0dB do częstotliwości prawie 11 GHz. Maksymalne dostępne wzmocnienie świadczące o możliwościach tranzystora w realnym układzie wynosiło od 18 dB dla 2 GHz do ponad 3 dB dla 10 GHz. Podane wyniki pomiaru dotyczą tranzystora o długości bramki 1.5  $\mu\text{m}$ , więc istnieje spory zapas dla zwiększenia górnej częstotliwości pracy. Przy liniowej pracy tranzystora o 2 bramkach o szerokości 300  $\mu\text{m}$  można oczekiwać do 2.5 W mocy wyjściowej (klasa A, punkt pracy  $V_{DS}=28\text{V}$  i  $I_D=0.2\text{A}$ ). Dla podwojenia poziomu mocy wykonano już struktury testowe zawierające 4 bramki o szerokości 250  $\mu\text{m}$  i 300  $\mu\text{m}$  każda.

Należy podkreślić, że uzysk produkcyjny struktur z płytki testowej o wymiarach 10mmx10mm wynosi ok. 80%, co niewątpliwie potwierdza zarówno jakość podłoża jaki i prawidłowość kolejnych procesów technologicznych.

Dla realizacji celów projektu PolHEMT w IRE PW powołano zespół odpowiedzialny za pomiary i charakteryzację DC i RF wytworzonych tranzystorów. Moim podstawowym zadaniem w ramach tego zespołu jest analiza pomiarów aktualnie wytworzonych struktur GaN HEMT prowadząca do powiązania otrzymanych wyników z poszczególnymi etapami procesu technologicznego. W efekcie wprowadzane są na bieżąco korekty procesu w celu badania wpływu parametrów technologicznych dla poprawy jakości następnej serii wytwarzanych struktur. M.in. opracowałem szereg oryginalnych procedur pomiarowych i identyfikacji zależności parametrów elektrycznych od wielkości fizycznych takich jak gęstość 2-wymiarowego gazu elektronowego i ruchliwość nośników w kanale. Ponadto projektuję tranzystory i struktury elementarne GaN HEMT, na podstawie których wykonywane są maski dla processingu.

Drugi obszar mojej działalności obejmuje projektowanie elementów układów scalonych w technologii GaN HEMT. W ramach tych prac zaprojektowałem, które wykonano w ITE, pojedyncze i podwójne klucze tranzystorowe GaN HEMT oraz indukcyjności i pojemności dla realizacji w przyszłości przesuwników fazy i przełączników N/O monolitycznych. Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące.

W ramach programu "Wisła" zespół z Instytutu Radioelektroniki PW jest odpowiedzialny za opracowanie konstrukcji i technologii modułu N/O, oktopaku T/R tj. bloku 8-u modułów i zespołu subapertury złożonej z 64 modułów. Projekt w tym zakresie realizuje zespół w składzie: dr inż. W. Wojtasiak, prof. dr hab. W. Gwarek, dr inż. D. Gryglewski, dr inż. D. Rosołowski i trzech doktorantów. Na potrzeby projektu "Wisła" opracowuję konstrukcję i technologię pojedynczego modułu oraz oktopaku. Wynik moich prac w tym zakresie pokazano na rys.4e.1 i rys.4e.2.



Rys.4e.1. Schemat blokowy i zarys konstrukcji T/RM

Rys.4e.2. Zarys konstrukcji oktopaku

Całkowity rozmiar modułu N/O oszacowałem na 13mmx13mmx78mm dla podłoża o stałej dielektrycznej  $\epsilon_r=8\div 9$ . Moduł zawiera 7 warstw tj. górna warstwa dielektryczna (widoczna) tzw. mikrofalowa ze wzorem linii paskowych, warstwa druga metalowa, aby wytworzyć niesymetryczną linię paskową, warstwa dielektryczna tzw. przekładka, warstwa metalowych ścieżek dla rozprowadzenia sygnałów zasilania i sterowania oraz warstwa dielektryczna zmetalizowana od spodu dla zamontowania płytki T/RM do metalowego podłoża.

W płytce dielektrycznej modułu N/O znajdują się przepusty i otwory na chipy tranzystorów i układów scalonych, które będą mocowane bezpośrednio do metalowego postumentu. Zaproponowana konstrukcja modułu odpowiada poziomem rozwiązań preferowanych przez wiodących producentów i jest dostosowana aktualnego etapu rozwoju technologii warstw dielektrycznych i montażu.

Jak już wielokrotnie powtarzano wytwarzanie bloków RF jest ściśle związane z dostępem do mikrofalowych podzespołów półprzewodnikowych. Obecnie, w zasadzie nie ma problemu wykonania modułów w ilości pojedynczych sztuk z wykorzystaniem tranzystorów mocy i układów scalonych z arsenku galu. Trudności zaczynają się wtedy, gdy trzeba wyprodukować 10 000 modułów. W moim przekonaniu, bez dysonowania własnym zapleczem produkcyjnym elementów półprzewodnikowych nasz kraj nie jest w stanie budować systemów radarowych w oparciu o zagraniczne elementy półprzewodnikowe, czy nawet kompletne modułów N/O. Dlatego wydaje się słuszne wykorzystanie wiedzy i możliwości takich ośrodków jak ITE, ITME, Politechnika Wrocławska i Warszawska oraz nadarżającej się okazji, że dostępne jest dobrej jakości krajowe podłoże GaN z Ammono, dla zbudowania polskiej firmy produkującej m.in. półprzewodniki dla radiolokacji. Byłby to znaczący skok technologiczny nie o jeden, ale o dwa poziomy, który w połączeniu z doświadczeniem PIT-RADWAR mógłby być kluczowy nie tylko dla obronności, ale także dla całej gospodarki kraju. Ze swej strony prowadzę prace nad sterowanymi cyfrowo monolitycznymi przesuwnikami fazy, tłumikami i przełącznikami w technologii GaN HEMT pod kątem stosowania w modułach N/O.

#### **Podsumowanie osiągniętych wyników i perspektywy wdrożeń**

W chwili, gdy przygotowuję ten autoreferat trwają intensywne prace w obu projektach, które są realizowane w wielu instytucjach przez wieloosobowe zespoły. Jesteśmy w przededniu podjęcia istotnych decyzji na szczeblu państwowym, dotyczących możliwości przyszłych wdrożeń.

Polska technologia GaN HEMT osiągnęła poziom pozwalający na optymistyczne kształtowanie perspektyw produkcji modułów dla radiolokacji w niedalekiej przyszłości. W opracowaniu tej technologii miałem swój udział zarówno na etapie rozważań dotyczących planowanych systemów radarowych dla obrony przeciwrakietowej średniego i krótkiego zasięgu jak i na etapie przygotowania produkcji polskich elementów aktywnych, które będą mogły być zastosowane w tych systemach.

#### **Literatura spoza listy w p.3**

- [1] 7-th Wide Band Gap Semiconductors & Components Workshop, ESA, 11÷12 September 2014, Frascati, Italy
- [2] MMIC CHC3014-99F United Monolithic Semiconductors
- [3] T/RM MEADS w technologii GaAs dla radaru MFCR

#### **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych**

Moją aktywność po doktoracie, w innych tematykach niż ta przedstawiona w punkcie 4, można podzielić na kilka zagadnień:

1. Projektowanie generatorów mikrofalowych VCO-PLL. Publikacje z zakresu tej problematyki wymieniono w zał. 5, p.IIA poz. 7, 8.
2. Zagadnienia dotyczące radia programowalnego SDR. Publikacje z zakresu tej tematyki wymieniono w zał. 5, p.IIA poz. 2, 3, 5.
3. Wykonywanie ekspertyz w zakresie wpływu zabudowy w danym rejonie na wskazania radarów pierwotnego i wtórnego będących w zarządzaniu Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej na danym lotnisku, w zał. 5 w p.IIIH poz. 1÷8.
4. Patenty – zał. 5, p.IIB, poz. 1, 2.
5. Kierowanie projektami badawczymi – zał. 5, p.IIF, poz. 1÷14.
6. Wygłaszanie referatów - zał. 5, p.IIH, poz. 1÷22.



7. Współpraca międzynarodowa:

- udział w programach europejskich - zał. 5, p.IIIA, poz. 1, 2.
- udział w konsorcjach i sieciach badawczych - zał. 5, p.IIIB, poz. 1÷4.

8. Staż zagraniczny - zał. 5, p.IIIG, poz. 1.

9. Dydaktyka

- opieka naukowa nad studentami - zał. 5, p.IIIE.
- opieka naukowa nad doktorantami w charakterze konsultanta i opiekuna pomocniczego - zał. 5, p.IIIF, poz. 1÷3.

10. Nagrody

- za działalność naukową - zał. 5, p.IIG, poz. 1, 2.
- inne - zał. 5, p.IIIK, poz. 1



dr inż. Wojciech Wojtasiak