

Załącznik nr 2

AUTOREFERAT

**„Rozwój techniki szumowego charakteryzowania obwodów elektrycznych  
w zakresie wielkich częstotliwości”**

1. Imię i nazwisko: **Wojciech Wiatr**, Instytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa, [wiatr@ise.pw.edu.pl](mailto:wiatr@ise.pw.edu.pl)
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:
  - magistra inżyniera: Wydział Łączności Politechniki Warszawskiej, 1970, specjalność radiotechnika
  - doktora nauk technicznych: Wydział Elektroniki Politechniki Warszawskiej, 1980, specjalność Elektronika,  
Rozprawa doktorska pt.: „Metoda estymacji parametrów szumowych liniowych dwuwrotników w zakresie wielkich częstotliwości”.
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:  
1971-1972 – Instytut Technologii Elektronowej, Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa,  
1972-do dziś – Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. Nowowiejska 15/19, 00-665 Warszawa
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2

Jako „osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczny wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej” wskazuję cykl publikacji dotyczący rozwoju techniki szumowego charakteryzowania obwodów elektrycznych w okresie ostatnich 30 lat, jaki był moim udziałem. Do tego rozwoju przyczyniłem się zarówno przez konstruowanie nowych urządzeń i aparatury pomiarowej, jak też opracowywanie koncepcji nowych metod i wdrażanie ich potem w systemach pomiarowych szumów.

Pierwotnym źródłem danych, dotyczących wskaźnika cytowalności czasopism IF (impact factor) oraz liczby cytowań moich publikacji są internetowe bazy Web of Science Core Collection oraz Journal Citation Reports, z których korzystali pracownicy Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, poszukując cytowań.

**Tytuły publikacji wykorzystanych do tego opracowania** (współczynniki IF i liczba cytowań podane na podstawie kwerendy Biblioteki Głównej PW, chyba że to zaznaczono inaczej):

1. [Comments on 'Design of microwave GaAs MESFET's for broad-band low-noise amplifiers'](#)

M. Pospieszalski, **W. Wiatr**

Źródło: IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, vol. MTT-34, s. 194, rok publikacji: 1986, IF = 0,967, liczba cytowań = 16 .

Swój wkład w tę publikację oceniam na 50 %, M. Pospieszalski – 50 %.

Jestem autorem nierówności obowiązującej dla czterech parametrów szumowych, wyprobowanej w mojej pracy doktorskiej. Tę nierówność wykorzystałem do analizy związków tych parametrów, jakie były publikowane w tamtym czasie przez różnych autorów i producentów tranzystorów.

2. [A method for embedding network characterization with application to low-loss measurements](#)

**W. Wiatr**

Źródło: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. IM-36, ss. 487-490, rok publikacji: 1987, IF = 0,645, liczba cytowań = 4 .

Publikacja samodzielna.

3. [Concepts of de-embedding and unterminating based on the noise power measurements](#)

**W. Wiatr**

Źródło: Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 41, ss. 1-8, rok publikacji: 1993, IF brak, liczba cytowań = 1 .

Publikacja samodzielna.

4. [Characterization of radiometer using eight-term linear model](#)

**W. Wiatr**

Źródło: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. IM-44, ss. 343-346, rok publikacji: 1995, IF = 0,494, liczba cytowań = 8 .

Publikacja samodzielna.

5. [Multistate radiometry: Noise de-embedding and un-terminating](#)

**W. Wiatr**

Źródło: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. IM-44, ss. 503-506, rok publikacji: 1997, IF = 0,613, liczba cytowań = 2 .

Publikacja samodzielna.

6. [The multistate radiometer: A novel means for impedance and noise temperature measurement](#)

**W. Wiatr**, M. Schmidt-Szałowski

Źródło: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. IM-44, ss. 486-489, rok publikacji: 1997, IF = 0,613, liczba cytowań = 4 .

Swój wkład w tę publikację oceniam na 60 %, M. Schmidt-Szałowski – 40 %.

Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji artykułu, sprawdzeniu działania radiometru wielostanowego oraz redakcji artykułu.

7. [The multistate radiometer: A novel means for broadband noise and small-signal characterization of microwave semiconductor devices](#)  
**W. Wiatr**, M. Schmidt-Szałowski  
Źródło: 49th Automatic RF Techniques Group Conference Digest, Denver, USA, 1997, ss. 171-180, rok publikacji: 1997, IF brak, liczba cytowań = 1 .  
Swój wkład w tę publikację oceniam na 50 %, M. Schmidt-Szałowski – 50 %.  
Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji referatu, jego redakcji oraz wykonaniu badań dotyczących tranzystora.
8. [Comparison of adapter characterization methods](#)  
J. Randa, **W. Wiatr**, R. L. Billinger  
Źródło: IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, vol. MTT-47, ss. 2613-2620, rok publikacji: 1999, IF = 1,476, liczba cytowań = 8 .  
Swój wkład w tę publikację oceniam na 40 %, J. Randa – 45 %, R. L. Billinger – 15 %.  
Mój udział w powstaniu tej publikacji polegał na pomiarach przejść metodą ML1P, opracowaniu ich wyników i analizie niepewności pomiarowej. Potwierdzenie tego udziału otrzymałem jedynie od dra J. Randy, który był jej głównym autorem, bo R. L. Billinger zmarł.
9. [Monte Carlo estimation of noise-parameter uncertainties](#)  
J. Randa, **W. Wiatr**  
Źródło: IET Science Measurement and Technology, vol. 149, ss. 333-338, rok publikacji: 2002, IF = 0,389, liczba cytowań = 9 .  
Swój wkład w tę publikację oceniam na 30 %, J. Randa – 70 %.  
Mój udział w powstaniu tej publikacji polegał na określeniu wyjściowych warunków dla analizy Monte Carlo oraz wielokrotnych obliczeniach czterech parametrów szumowych dla różnych zbiorów zaburzonych wyników pomiarowych.
10. [Broadband multi-state electronic impedance tuner for on-wafer noise parameter measurement](#)  
D. Pieńkowski, **W. Wiatr**  
Źródło: Proceedings of 32th European Microwave Conference, Mediolan, Włochy, ss. 53-56, rok publikacji: 2002, IF brak, liczba cytowań = 1 .  
Swój wkład w tę publikację oceniam na 50 %, D. Pieńkowski – 50 %.  
Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji działania układu i badań powtarzalności stanów strojnika oraz redakcji referatu.
11. [Systematic errors of noise parameter determination caused by imperfect source impedance measurement](#)  
**W. Wiatr**, D. K. Walker  
Źródło: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, vol. IM-54, ss. 696-700, rok publikacji: 2005, IF = 0,665, liczba cytowań = 11 .  
Swój wkład w tę publikację oceniam na 60 %, D. Walker – 40 %.  
Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu jej koncepcji. wykonaniu i zobrazowaniu wyników analiz w artykule.

12. [Source-pull characterization of FinFET noise](#)

**W. Wiatr**, G. Crupi, A. Caddemi, A. Mercha, D.M.M-P. Schreurs,

Źródło: Proceedings of 17th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, Wrocław, Polska, ss. 425-430, rok publikacji: 2010, IF brak, liczba cytowań 3 (Google Scholar).

Swój wkład w tę publikację oceniam na 30 %, G. Crupi – 20 %, A. Caddemi – 20 %, A. Mercha – 10 %, D. M. M-P. Schreurs – 20 %.

Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na opracowaniu koncepcji ekstrahowania parametrów szumowych, wykonaniu pomiarów i obliczeń oraz redakcji referatu.

13. [Microwave noise modeling of FinFETs](#)

G. Crupi, A. Caddemi, D.M.M-P. Schreurs, **W. Wiatr**, A. Mercha

Źródło: Solid-State Electronics, vol. 56, ss. 18-22, rok publikacji: 2011, IF = 1,397, liczba cytowań = 4 .

Swój wkład w tę publikację oceniam na 15 %, G. Crupi – 35 %, A. Caddemi – 20 %, D. M. M-P. Schreurs – 20 %, A. Mercha – 10 %.

Mój wkład w powstanie tej publikacji polegał na krytycznej analizie pomiarów szumowych tranzystora FinFET.

## **Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Działalność naukową, związaną z miernictwem mikrofalowym, a w szczególności – szumowym charakteryzowaniem obwodów wielkiej częstotliwości (w.cz.), rozpocząłem w 1972 r. po zatrudnieniu mnie w Zakładzie Układów Elektronicznych w Instytucie Podstaw Elektroniki (obecnie Instytut Systemów Elektronicznych – ISE), gdzie znalazłem się w grupie prof. Andrzeja Filipkowskiego, specjalizującej się w małosygnalowym modelowaniu tranzystorów i projektowaniu tranzystorowych wzmacniaczy w.cz. Tam do końca 1975 r. zbudowałem stanowisko do pomiaru parametrów rozproszenia i parametrów szumowych tranzystorów mikrofalowych w zakresie częstotliwości do 3 GHz, samodzielnie konstruując uniwersalną głowicę tranzystorową wraz z układami polaryzacji i opracowując algorytmy dla korekcji systematycznych błędów pomiarowych, uruchomianych początkowo w programowanym kalkulatorze TI-59 firmy Texas Instruments. Powstało wówczas pierwsze tak zaawansowane stanowisko pomiarowe w kraju.

Od 1976 r. moja praca, dotycząca miernictwa tranzystorów, stała się częścią większego projektu realizowanego przez zespół naukowo-badawczy Instytutu Podstaw Elektroniki w ramach umowy o współpracy z Instytutem Technologii Elektronowej (ITE) CEMI. Celem tej współpracy, trwającej aż po rok 1990, były badania i modelowanie małosygnalowych i szumowych właściwości tranzystorów mikrofalowych. Dzięki tej umowie mogłem zebrać bogaty materiał doświadczalny, dotyczący szumowego charakteryzowania tranzystorów w.cz., który wykorzystałem do ukończenia swej pracy doktorskiej, obronionej w 1980 r.

Opracowane stanowisko oraz unikalne doświadczenie zdobyte w zakresie badania tranzystorów w.cz., stały się potem podstawą dla nawiązania współpracy naukowo-badawczej Politechniki Warszawskiej z National Radio Astronomy Observatory (NRAO) w Charlottesville w USA. Taka współpraca, określona umową zawartą w 1981 r., dotyczyła badania zjawisk powstawania szumów w mikrofalowych tranzystorach polowych z GaAs. Strona amerykańska dostarczyła zarówno nowoczesne tranzystory do badań, jak też doposażyła to stanowisko w aparaturę trudno dostępną w kraju, między innymi w minikomputer Apple II+ i kalibrowane półprzewodnikowe źródło szumów. Dzięki temu można było rozpocząć zaawansowane prace nad doskonaleniem metod pomiarowych i częściową automatyzacją procesu pomiaru tranzystorów w.cz. Takie działania były niezbędne, aby móc dalej rozwijać badania dotyczące modelowania takich tranzystorów.

Należy dodać, że modelowanie małosygnalowych i szumowych właściwości tranzystorów mikrofalowych jest jednym z wiodących kierunków badań, prowadzonych na świecie od lat sześćdziesiątych XX w. Postępy takiego modelowania są ważne zarówno dla rozwoju technologii przyrządów półprzewodnikowych, jak też – komputerowych narzędzi do analizy i optymalizacji obwodów mikrofalowych, stosowanych do projektowania układów elektronicznych w.cz. Ponieważ podstawę modelowania stanowią dane uzyskiwane eksperymentalnie, więc ich jakość silnie wpływa na wyniki takiego modelowania. W rezultacie postęp na wspomnianych wyżej polach wciąż zależy od stopnia rozwoju techniki pomiarowej. Niestety

w latach osiemdziesiątych jakość tych danych była często niezadawalająca, wskutek zarówno niedoskonałości metod usuwania wpływu systematycznych błędów pomiarowych, jak też ograniczonych umiejętności osób mierzących tranzystory mikrofalowe. Na przykłady niedostatecznej jakości takich pomiarów wskazaliśmy w publikacji [1]. Wykazaliśmy w niej, że cztery parametry szumowe, podawane w cytowanych przez nas pracach, nie mają sensu fizycznego, gdyż nie spełniają fundamentalnego kryterium matematycznego, jakie wyprowadziłem w swej pracy doktorskiej.

Ogólnie rozwój współczesnej metrologii wynika z postępu osiąganego w triadzie jej następujących, głównych składowych:

- 1) instrumentarium, obejmującym urządzenia pomiarowe,
- 2) metod pomiarowych, wykorzystujących osiągnięcia ogólnie matematyki i fizyki,
- 3) techniki komputerowej, służącej w systemach pomiarowych do automatyzacji procesu pomiaru i wdrażania zaawansowanych metod przetwarzania danych.

Harmonijnie łącząc te trzy elementy, można skutecznie rozwiązywać coraz bardziej złożone zadania pomiarowe, jak też zwiększać dokładność pomiarów przy pomocy coraz bardziej zaawansowanych metod numerycznego przetwarzania sygnałów pomiarowych, dzięki którym usuwa się wpływ systematycznych błędów pomiarowych. Moja działalność, jaką przedstawiam w tym autoreferacie, zamykała się właśnie w obrębie tej triady. A ponieważ szumowe charakteryzowanie obwodów elektrycznych wymaga precyzyjnego mierzenia zarówno impedancji (współczynnika odbicia) generatora, jak też zmian poziomu mocy szumów, więc należało jednocześnie działać na obu tych polach, aby móc skutecznie doskonalić tę technikę.

Dzięki współpracy ISE PW z NRAO, trwającej do 1987 r., opracowałem nowe metody i urządzenia pomiarowe dla szumowego charakteryzowania tranzystorów mikrofalowych, w tym również mechanicznie przełączany strojnik impedancji. Większość swoich osiągnięć przedstawiałem głównie na krajowych konferencjach mikrofalowych w latach 80. Najważniejszym z tych osiągnięć jest oryginalna, statystyczna metoda charakteryzowania małowatnych obwodów transformujących przy użyciu ruchomego zwarcia. Dzięki niej mogłem usuwać wpływ systematycznych błędów pomiarowych, jakie wynikają ze zmienności strat pochłaniania w obwodach strojnika przy zmianach transformacji. Tę metodę i jej wyniki opisałem w publikacji [2]. Później z powodzeniem stosowałem ją także w szerokim zakresie częstotliwości do charakteryzowania przejść pomiędzy różnego rodzaju przewodnicami falowych. Ponieważ tego rodzaju pomiary są szczególnie ważne dla laboratoriów metrologicznych, specjalizujących się w kalibrowaniu źródeł szumów, czujników mocy lub też w precyzyjnym mierzeniu transmisji mocy w torze, w końcu lat 90. współpracowałem na tym polu z National Institute of Standards and Technology (NIST) w Boulder, Kolorado, w USA. W takim charakteryzowaniu przejść uzyskaliśmy bardzo dobre wyniki i przedstawiliśmy je we wspólnym artykule [8].

Moje prace nad charakteryzowaniem tranzystorów w.cz., jakie kontynuowałem w latach 1985 – 1990 wciąż w ramach programu współpracy z ITE CEMI, koncentrowały się

głównie na budowie nowego, zautomatyzowanego systemu pomiarowego o większej dokładności pomiarowej i szerszym zakresie częstotliwości. Dla tego systemu skonstruowałem wtedy kolejną, uniwersalną głowicę tranzystorową (patrz rys. 1), która wraz z układami polaryzacji (rys. 2) była przeznaczona do pracy w zakresie częstotliwości do 18 GHz. Kilka lat później z powodzeniem użyłem tej głowicy, aby charakteryzować monolityczne mikrofalowe układy scalone (MMUS) z GaAs, jakie, zaprojektowane w ISE i wykonane za granicą, były montowane na niewielkich płytkach podłożowych – patrz rys. 1 d.). Aby móc wstawiać takie płytki w głowicę, wyposażyłem ją w dodatkową wkładkę z dwoma wbudowanymi obwodami polaryzacji – patrz rys. 1 c.).

Do nowego systemu zaprojektowałem także i złożyłem radiometr dla pomiaru całkowitej mocy szumów. Składał się on z układu przestrajanego, mikrofalowego konwertera pomiarowego na zakres 0,1 - 4,3 GHz oraz z nowatorskiego, cyfrowego odbiornika pośredniej częstotliwości (p.cz.). Dzięki starannemu zaprojektowaniu analogowej części toru odbiornika oraz zastosowaniu koncepcji zmiennoprzecinkowego, analogowo-cyfrowego przetwarzania sygnału i numerycznej korekcji błędów nieliniowości w oprogramowaniu mikroprocesorowego sterownika, odbiornik zapewniał wysoką precyzję pomiaru poziomu mocy szumów. Zdalnie sterowany poprzez magistralę IEC-625, mógł działać także jako precyzyjny miernik współczynnika szumów. Oba te urządzenia, za wyjątkiem mikroprocesorowego sterownika, zostały całkowicie wykonane własnymi siłami w ISE PW wraz z dodatkowym układem przemiany częstotliwości na zakres częstotliwości 11,5 – 12,5 GHz. W 1996 za pomocą pomiarów kalibracyjnych, jakie mogłem wykonać w NIST, potwierdziłem dużą dokładność cechowania odbiornika dla pomiarów mocy na częstotliwości 30 MHz.

Dla tego systemu opracowałem również wymagania techniczne dla budowy regulowanego zasilacza mierzonych tranzystorów, sterowanego także poprzez magistralę IEC-625. Zasilacz został zrealizowany po części własnymi siłami, tj. pracowników ZUiAM, a częściowo we współpracy z przedsiębiorstwem zewnętrznym.

Ponieważ skutek przemian politycznych w Polsce, podstawowe finansowanie projektu ustało w 1990 r., zakończenie wszystkich tych prac i uruchomienie systemu w ISE PW nastąpiło z opóźnieniem w roku 1994. W miarę ich postępu, nasze wyniki przedstawialiśmy na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych już od początku lat 90. Kompletny system do pomiaru szumów, w jego wczesnej postaci, ukazuje rys. 2. Jego późniejsza modyfikacja polegała na zastąpieniu przestarzałego komputera Laser 128 komputerem typu PC.

Obok wyżej opisanych prac konstrukcyjno-wdrożeniowych, równocześnie pracowałem też nad teoretycznymi zagadnieniami charakteryzowania szumów dwuwrotników. Aby móc pełniej opisać zależność wyjściowej mocy szumów od współczynnika odbicia generatora, mierzoną przez radiometr, wyprowadziłem wtedy ośmioczynnikowy model pomiaru. Na jego podstawie opracowałem i następnie wdrożyłem metodę jednoczesnego wyznaczania czterech parametrów szumowych oraz wzmocnienia i impedancji wejściowej badanego dwuwrotnika. Wyniki tej kompleksowej metody, stosowanej w systemie radiometru mierzącego

całkowitą moc szumów, publikowałem na międzynarodowych konferencjach naukowych oraz podsumowałem w artykule [4].

Moje dalsze prace teoretyczne zaowocowały powstaniem nowatorskiej koncepcji radiometrii wielostanowej, umożliwiającej pełne charakteryzowanie jednowrotników, pod względem szumowym i małosygnałowym, wyłącznie na podstawie pomiarów całkowitej mocy szumów na wyjściu toru pomiarowego. Termin radiometria wielostanowa podkreśla specyfikę procesu mierzenia danego jednowrotnika, podczas którego modyfikuje się stan radiometru, zmieniając w powtarzalny sposób właściwości szumowe radiometru. Ten wielostanowy system podlega wprawdzie kalibracji za pomocą zestawu odpowiednich wzorców, a następnie jest wykorzystywany do pomiaru właściwości elektrycznych nieznanego jednowrotnika. W wyniku takiego pomiaru wyznacza się współczynnik odbicia i temperaturę szumów danego jednowrotnika. Polega to numerycznym usuwaniu wpływu szumów radiometru na wykonywane pomiary. Zarys tej koncepcji przedstawiłem w [3], wskazując na bliskie podobieństwo modelu pomiarów radiometrycznych do znanego modelu, jaki wykorzystuje się w interferometrii do opisu, np. pomiarów wykonywanych za pomocą sześciowrotnika lub reflektometru wielostanowego.

W ramach projektu badawczego, finansowanego przez KBN, tę nową koncepcję pomiaru szumów rozszerzyliśmy na charakteryzowanie dwuwrotników i wdrożyliśmy w ISE PW, budując pierwszy na świecie system radiometru wielostanowego. Za pomocą tego systemu sprawdziliśmy jego działanie w praktyce i wykazaliśmy prawidłowość opracowanej metody. Matematyczne podstawy radiometrii wielostanowej przedstawiłem później w artykule [5], a sam system i uzyskane w nim wyniki opisaliśmy we wspólnej pracy [6]. Szersze możliwości pomiarowe systemu i wyniki naszych doświadczeń podsumowaliśmy następnie w referacie konferencyjnym [7], publikując wyniki szumowego charakteryzowania przyrządów półprzewodnikowych (diody mieszającej i tranzystora polowego z GaAs).

Należy podkreślić, że system zbudowany w PW, wciąż pozostaje unikalnym radiometrem wielostanowym. Istnieje kilka powodów, dla których nie został do tej pory wdrożony w innych miejscach, chociaż do tego celu można by z powodzeniem wykorzystać jeden z obecnie produkowanych analizatorów widma, jakie umożliwiają detekcję mocy szumów i sprawne uśrednianie wyników. Niewątpliwie decydującym czynnikiem, utrudniającym upowszechnienie radiometrii wielostanowej, jest brak możliwości nabycia dwu kluczowych elementów systemu, niezbędnych do jego pełnej automatyzacji. Tymi elementami są: wielostanowy, elektroniczny strojnik impedancji do kalibracji systemu oraz szerokopasmowy układ modulatora PM/AM, służący do zmiany stanu radiometru poprzez wstrzykiwanie dodatkowych szumów na wejście toru pomiarowego. Niestety obecnie użytkownik musi sam je zaprojektować, wykonać i zastosować w systemie.

Wskutek nieuchronnego dryftu systemu, czas pomiaru jest ważnym czynnikiem, mającym wpływ na powstawanie błędów szumowego charakteryzowania obwodów. Ponieważ w przypadku radiometru wielostanowego, ten czas jest potrzebny do uśredniania wyników oraz kilkakrotnych zmian jego stanu, więc pomiar może trwać nawet kilka minut. Niestety



jeszcze dłużej trwa kalibracja systemu, bo wymaga użycia co najmniej siedmiu wzorców o różnej impedancji, wśród których przynajmniej jeden jest cechowanym źródłem szumów o znanej temperaturze, różnej od temperatury otoczenia.

Krótszy czas pomiaru zapewniają współczesne, typowe systemy charakteryzowania szumów obwodów, o działaniu równoważnym radiometrowi wielostanowemu, które składają się z dwu podsystemów; radiometru mocy całkowitej i wektorowego analizatora obwodów, mierzącego parametry rozproszenia badanego układu, niezbędne, aby móc usuwać wpływ systematycznych błędów w pomiarach radiometrycznych. Charakteryzowanie szumów trwa w nich krócej, bo radiometr mierzy szumy tylko w jednym stanie, a faza pomiaru analizatora obwodów jest, w normalnych warunkach, też bardzo krótka. Są jednak bardzo kosztowne, a ze względu na naprzemiennie działanie, ich urządzenia nie mogą być efektywnie eksploatowane. Co więcej, ta przewaga szybkości mierzenia nad radiometrem wielostanowym wyraźnie maleje, gdy moc sygnału pobudzającego w analizatorze wektorowym należy znacznie zmniejszyć, aby nie dopuścić do powstania zjawisk nieliniowych w badanym elemencie, np. podczas charakteryzowania diod mieszających lub tranzystorów polaryzowanych małym prądem. Wówczas to ujawnia się główna zaleta radiometru wielostanowego, którą jest możliwość mierzenia układów przy niezwykle małym poziomie mocy szumu pobudzającego (poniżej -60 dBm) [7].

Skuteczne wdrożenie radiometrii wielostanowej wymaga pełnej automatyzacji procesu kalibracji systemu, aby móc skrócić czas pomiaru. Dlatego kolejne prace, dotyczące instrumentarium, koncentrowały się na opracowaniu elektronicznego strojnika impedancji. Chodziło o to, aby zastąpić nim dotychczasowy strojnik mechaniczny, którego ręczna obsługa była zbyt czasochłonna. W związku z tym opracowałem wpierw nową koncepcję budowy wielostanowego, szerokopasmowego układu takiego strojnika, opartą na nowoczesnych przełącznikach elektronicznych w.cz. z tranzystorami MESFET z GaAs. W procesie projektowania zastosowaliśmy nowatorskie podejście do szerokopasmowej optymalizacji konstrukcji strojnika, oparte na kryteriach optymalności, zaczerpniętych z teorii planowania eksperymentów. W ten sposób powstało unikalne rozwiązanie układu takiego strojnika o 36 różnych stanach impedancji w zakresie częstotliwości od 50 do 2000 MHz. Strojnik poddaliśmy wszechstronnym badaniom, sprawdzając powtarzalność realizowanych wartości współczynnika odbicia i temperatury szumów. Wyniki tych badań przedstawiliśmy w referacie [10] na międzynarodowej konferencji naukowej.

Jeden z ważnych etapów badań, prowadzonych w związku z szumowym charakteryzowaniem obwodów, dotyczył analizy niepewności identyfikowanych parametrów. Na przełomie wieków te badania miały charakter pionierski. Większość naszych osiągnięć na tym polu przedstawialiśmy na konferencjach międzynarodowych. Nasze referaty dotyczyły zarówno niepewności pomiarów wykonywanych radiometrem wielostanowym, jak też błędów pomiaru mocy szumów, powstających wskutek skończonej szerokości pasma pomiarowego i niedopasowania badanych elementów półprzewodnikowych. Część tych badań prowadziłem współpracując z NIST. Zastosowaliśmy znaną metodę Monte Carlo do analizy niepewności

klasycznej metody wyznaczania czterech parametrów szumowych [9] i badaliśmy, jak niedokładne pomiary współczynnika odbicia generatora, wywołane przez resztowe błędy kalibracji wektorowego analizatora obwodów, zaburzają parametry modelu ośmioczynnikowego.

Znaczący rozwój instrumentarium do charakteryzowania sygnałów (w tym i szumów), obserwowany w ostatnim dziesięcioleciu, jest już udziałem dużych firm, które dysponują zaawansowaną technologią oraz ogromnym doświadczeniem w konstruowaniu i wytwarzaniu aparatury pomiarowej. Dzięki powszechnemu zastosowaniu cyfrowego przetwarzania sygnałów, dokładność i szybkość wykonywanych pomiarów znacznie wzrosła. Obecnie badania szumów przyrządów półprzewodnikowych i układów scalonych wykonuje się na płytkach podłożowych w sposób w pełni zautomatyzowany. Chociaż takie kompletne systemy pomiarowe są wciąż bardzo kosztowne, to do próbnych pomiarów została nam wypożyczona kluczowa aparatura jednego z nich. Dzięki temu miałem sposobność, aby sprawdzić działanie swoich metod w nowoczesnym systemie pomiarowym, ukazanym na rys. 3. W praktyce okazało się, że dzięki zastosowaniu modelu ośmioczynnikowego [4] i własnego oprogramowania ekstrakcji parametrów, mogłem osiągać lepsze rezultaty (mniejsze błędy), niż korzystając z firmowego oprogramowania systemu. Zatem moje podejście może stać się przydatne w badaniach szumów nowoczesnych elementów półprzewodnikowych, których rozmiary z roku na rok stają się coraz mniejsze.

Charakteryzowanie szumów tranzystorów o rozmiarach nanometrycznych stanowi obecnie poważne wyzwanie dla miernictwa szumów. Z problemami takich badań zetknąłem się bliżej, dzięki międzynarodowej współpracy z naukowcami z Belgii i Włoch, mierząc parametry szumowe tranzystora typu FinFET o długości bramki 60 nm we wspomnianym wyżej nowoczesnym systemie pomiarowym. Wyniki ekstrakcji parametrów szumowych tego tranzystora przedstawiliśmy we wspólnej publikacji konferencyjnej [12], a wyniki pełnego modelowania jego właściwości szumowych i sygnałowych opublikowaliśmy wspólnie w [13].

W ISE PW powstaje teraz kolejny zautomatyzowany system nowej generacji do szumowego charakteryzowania przyrządów półprzewodnikowych. Zamierzamy wykorzystać w nim nowoczesną aparaturę; wektorowy analizator obwodów oraz analizator widma sygnałów, zakupione dzięki dotacjom z funduszy europejskich. Ten nowy system, wyposażony w małoszumne, szerokopasmowe przedwzmacniacze i osprzęt pomocniczy, pozwoli nam charakteryzować małosygnałowe i szumowe właściwości przyrządów półprzewodnikowych w znacznie szerszym zakresie częstotliwości niż dotychczas. Przewidujemy, że wykorzystamy go, aby wspomagać produkcję zaawansowanych urządzeń elektronicznych w kraju. Już teraz współpracujemy na tym polu z firmą Vigo System z Ożarowa Mazowieckiego, realizując wspólny projekt badawczo-wdrożeniowy. Zamierzamy zastosować ten system do badań detektorów podczerwieni oraz przedwzmacniaczy, stosowanych w modułach detekcyjnych Vigo. Ponieważ podczas badania tych detektorów należy znacznie zmniejszyć poziom sygnału pobudzającego (poniżej -35 dBm), aby uniknąć zjawisk nieliniowych, więc nosimy się z zamiarem uruchomienia także alternatywnego systemu radiometru wielostanowego, wykorzystując w tym celu analizator widma, przedwzmacniacz oraz nowy układ PM/AM, który należy

jeszcze zbudować. Biorąc pod koszt budowy takiego systemu, wydaje się, że wdrożenie takiego rozwiązania będzie dla Vigo korzystniejsze.

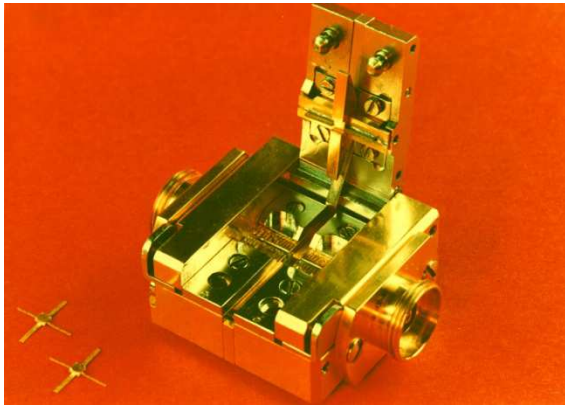
W podsumowaniu pragnę podkreślić, że moja wieloletnia i konsekwentna praca nad rozwojem techniki szumowego charakteryzowania obwodów elektrycznych w zakresie wielkich częstotliwości obejmowała szeroki zakres zagadnień, zdefiniowanych wcześniej jako triada. Moje najważniejsze osiągnięcia na tym polu dotyczyły następujących opracowań w zakresie:

- 1) instrumentarium – budowa aparatury do **systemu pomiarowego szumów** (rys. 2):
  - a. **uniwersalnej głowicy tranzystorowej** (rys. 1) oraz **układów polaryzacji** (zakres częstotliwości do 18 GHz),
  - b. precyzyjnego, cyfrowego **miernika współczynnika szumów** wraz z **odbiornikiem pomiarowym p. cz.**, sterowanego poprzez magistralę IEC-625,
  - c. **wielozakresowego konwertera pomiarowego** (przestrajanego w zakresie od 0,1 do 4,3 GHz oraz 11,5 – 12,5 GHz),
  - d. **wielostanowych strojników impedancji** o konstrukcji:
    - mechanicznej (zakres częstotliwości 0,1 – 4,3 GHz),
    - elektronicznej i zdalnym sterowaniu (zakres częstotliwości 0,05 – 2 GHz) [10],
  - e. **układu PM/AM** do realizacji wielu stanów radiometru (wbudowanego w blok konwertera),
- 2) oryginalnych metod pomiarowych dla charakteryzowania:
  - a. małosygnalowych i szumowych właściwości tranzystorów mikrofalowych w systemie radiometrycznym (opartych na ośmioczynnikowym modelu pomiaru [4]),
  - b. małosygnalowych i szumowych właściwości jedno- i dwuwrotników za pomocą radiometru wielostanowego [5], [6], [7],
  - c. małosygnalowych obwodów transformujących [2] i przejść [8],
- 3) techniki komputerowej – tworzenie **oprogramowania pomiarowego** w celu:
  - a. automatyzacji procesu pomiaru parametrów rozproszenia oraz czterech parametrów szumowych mikrofalowych tranzystorów i monolitycznych mikrofalowych układów scalonych,
  - b. **ekstrakcji parametrów ośmioczynnikowego modelu pomiaru radiometrycznego**,
  - c. **ekstrakcji szumowych i małosygnalowych parametrów jednowrotników oraz dwuwrotników w systemie radiometru wielostanowego**,
  - d. analizy błędów [11] i niepewności wyznaczanych parametrów badanych układów.

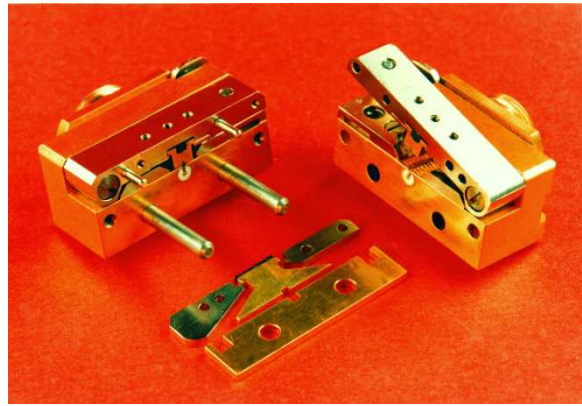
Dzięki temu stworzyłem podstawy do dalszego rozwoju tego rodzaju miernictwa w kraju. W najbliższych latach chciałbym, służąc swym bogatym doświadczeniem pomiarowym, móc kształcić w tej dziedzinie inżynierów oraz skutecznie wspierać rozwój krajowego przemysłu elektronicznego, który ostatnio przejawia pewne zainteresowanie wykorzystaniem naszych unikalnych umiejętności i aparatury.



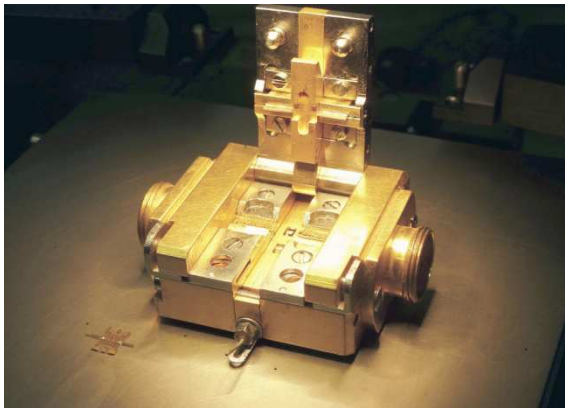
a.)



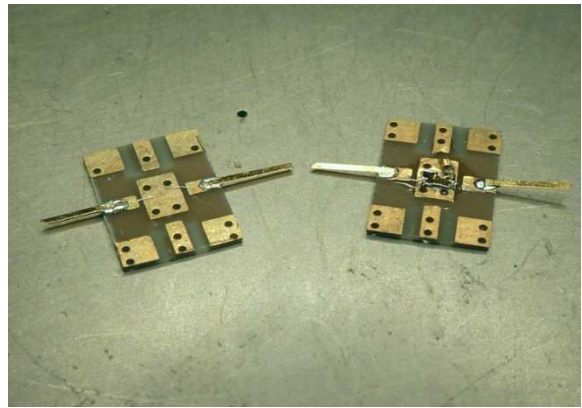
b.)



c.)



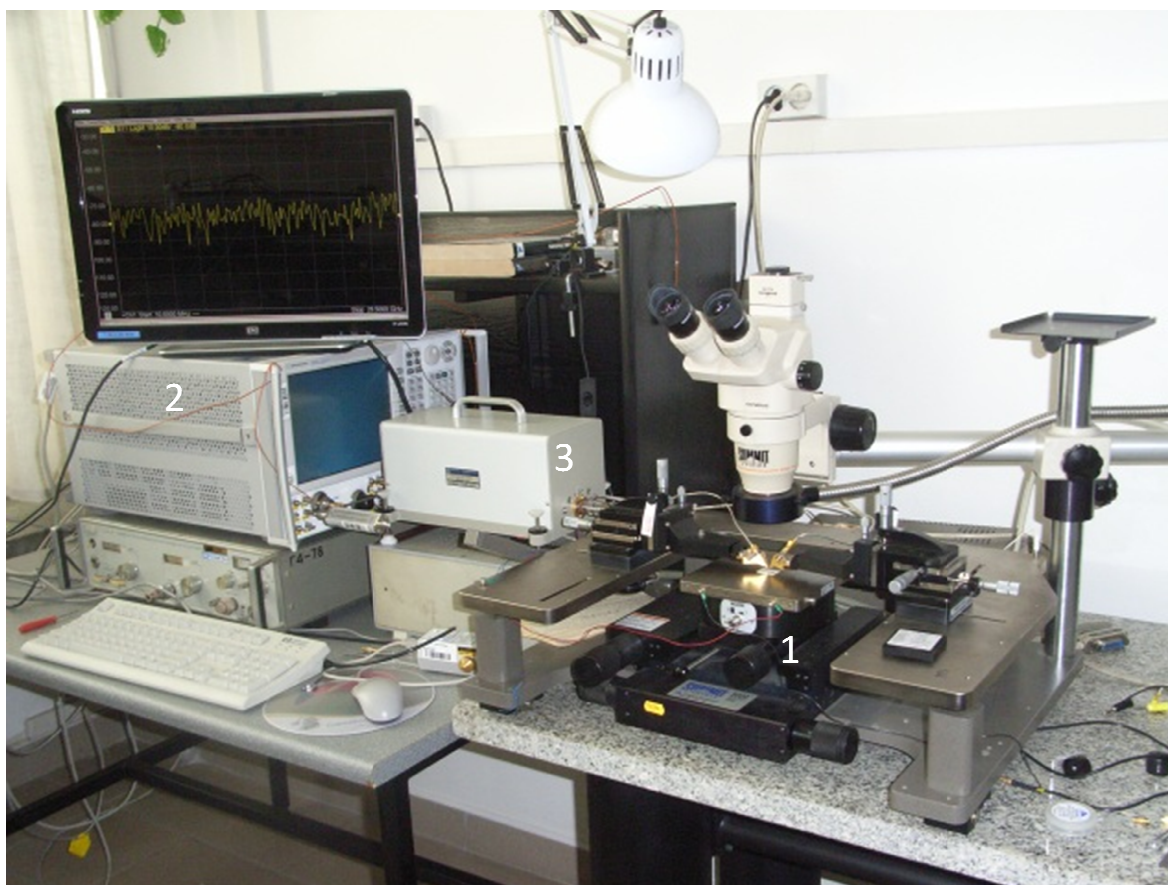
d.)



Rys.1. Uniwersalna głowica do badania tranzystorów w obudowach paskowych, obudowanych układów scalonych w.cz. oraz monolitycznych mikrofalowych układów scalonych. Fotografie przedstawiają: a.) otwartą głowicę tranzystorową, b.) głowicę w stanie rozłożenia z widoczną wymienną wkładką tranzystorową, c.) otwartą głowicę z zamontowaną wkładką do badania układów scalonych, d.) płytkę testową (po lewej) i płytkę z zamontowanym monolitycznym mikrofalowym układem scalonym (po prawej).



Rys. 2. System pomiarowy szumów (wersja z 1994 r.), zbudowany w ISE PW dla charakteryzowania przyrządów półprzewodnikowych. System zawiera zestaw komputerowy Laser 128 (1) z monitorem, sterujący za pośrednictwem interfejsu IEC-625 (2) zasilaczem tranzystorowym ZPT-100 (3) oraz cyfrowym miernikiem współczynnika szumów (4) wraz z odbiornikiem pomiarowym p.cz. (5). Na wejściu radiometru znajduje się konwerter pomiarowy (6) o zakresie częstotliwości od 0,1 do 4,3 GHz, do którego jest dołączona uniwersalna głowica mikrofalowa (7) z badanym tranzystorem wewnątrz, mechaniczny strojnik impedancji (8), układ polaryzacji (9) i cechowane źródło szumów (10). System jest wyposażony także w cyfrowy miernik (11) dla śledzenia częstotliwości heterodyny konwertera i dodatkowy układ przemiany częstotliwości (12) na zakres 11,5 – 12,5 GHz.



Rys. 3. Nowoczesny system pomiarowy ze stacją do bezpośrednich pomiarów struktur MMUS (1) do szumowego charakteryzowania układów. W skład systemu wchodzi: wektorowy analizator obwodów PNA-X (2) z wbudowanym układem radiometrycznym (produkcji Agilent) oraz automatyczny strojnik (3) typu MT982EU (produkcji Maury Microwave), wypożyczone przez producentów do próbnych badań w ISE Politechniki Warszawskiej.