

dr inż. Krzysztof Czuba
Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Instytut Systemów Elektronicznych
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Krzysztof Czuba

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 2007
- doktor nauk technicznych
 - dyscyplina: elektronika
 - Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
 - tytuł rozprawy: “*RF Phase Reference Distribution System for the TESLA Technology Based Projects*”, rozprawa napisana w języku angielskim
- 2002
- magister inżynier
 - specjalność: elektronika – radiokomunikacja i radiolokacja
 - Politechnika Warszawska
- 2000
- inżynier
 - specjalność: radioelektronika i techniki multimedialne
 - Politechnika Warszawska

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

2016 – obecnie: adiunkt, z-ca dyrektora Instytutu Systemów Elektronicznych ds. Naukowych,
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej

2008 – 2016 adiunkt, Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych

2006 – 2007 asystent, Politechnika Warszawska, Instytut Systemów Elektronicznych

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jako osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej wskazuję **cykl publikacji powiązanych tematycznie** zatytułowany „**Systemy synchronizacji i sterowania dla liniowych akceleratorów cząstek elementarnych**”.

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy)

PUBLIKACJE WCHODZĄCE W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO:

- [A1] **K.Czuba**, H. Weddig, „Synchronization Systems for High Energy Particle Accelerators”, MIKON 2008 Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 587 – 590, Wrocław, Poland 2008. **Mój udział procentowy szacuję na 80%**.
- [A2] **K. Czuba**, K Antoszkiewicz, S. Simrock, H. Weddig, “The RF Phase Reference Distribution System for The European XFEL”, PAC09, Vancouver, Canada, May 2009. **Mój udział procentowy szacuję na 60%**.
- [A3] **K. Czuba**, D. Sikora, L. Zembala, J. Branlard, F. Ludwig, H. Schlarb, H. Weddig, “Overview of the RF Synchronization System for The European XFEL”, IPAC 2013, Shanghai, China, pp 3001-3003. **Mój udział procentowy szacuję na 40%**.
- [A4] **K. Czuba**, D. Sikora, “Temperature stability of coaxial cables”, ACTA PHYSICA POLONICA, Vol. 119 (2011), No. 4, p. 553. **IF: 0.530, MNiSW: 15. Mój udział procentowy szacuję na 70%**.
- [A5] **K. Czuba**, S. Jablonski „Active Compensation of Microwave Amplifier Phase Drifts”, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2012 19th International Conference Proceedings vol. 1, pp. 193-196, Warsaw, Poland, 21-23 May, 2012. **Mój udział procentowy szacuję na 60%**.
- [A6] S. Jablonski, **K. Czuba**, F. Ludwig, H. Schlarb, „ 2π Low Drift Phase Detector for High-Precision Measurements”, IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 62, No. 3, June 2015, **IF: 1.447, MNiSW: 30. Mój udział procentowy szacuję na 20%**.
- [A7] **K. Czuba**, J. Berliński, Ł. Czuba, E. Fistek, M. Kalisiak, T. Leśniak, M. Mielnik, K. Oliwa, R. Papis, D. Sikora, A. Sunesson, W. Wierba, R. Zeng, M. Żukociński: “Concept of the Phase Reference Line for the European Spallation Source”, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2018, Conference Proceedings, ISBN 978-83-949421-0-6, ss. 512-514. **Mój udział procentowy szacuję na 30%**.
- [A8] **K. Czuba**: Generator sygnałów odniesienia dla akceleratora FLASH (w: Elektronika-konstrukcje, technologie, zastosowania). 2009. z. 8. ss. 87-90. **Udział procentowy 100%**.
- [A9] L. Zembala, **K. Czuba**, B. Gąsowski, D. Sikora, J. Branlard, H. Schlarb, H.C. Weddig, “Master Oscillator for the European XFEL”, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC’14 , June 15 - 20, 2014, Dresden, Germany, pp. 2771 – 2773. **Mój udział procentowy szacuję na 30%**.

- [A10] S. Hanasz, **K. Czuba**, B. Gąsowski, H. Weddig, Ł. Zembala, "Low Phase Noise 1.3 GHz Synthesiser", 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Kraków, Poland, 9-11 May, 2016. [Mój udział procentowy szacuję na 30%](#).
- [A11] D. Makowski, W. Koprek, T. Jezynski, G. Jablonski, A. Piotrowski, W. Jalmuzna, P. Predki, **K. Czuba**, S. Simrock, A. Napieralski, "Prototype Real-time ATCA-Based LLRF Control System", IEEE Transactions on Nuclear Science (TNS), Volume 58, Issue 4, August 2011, pp. 1553-1561, doi: 10.1109/TNS.2011.2151284, ISSN: 0018-9499, **IF: 1.447**, **MNiSW: 30**. [Mój udział procentowy szacuję na 17.5%](#).
- [A12] **K. Czuba**, D. Makowski, A. Mielczarek, H. Schlarb, F. Ludwig, „Vector Modulator Card for MTCA-Based LLRF Control System for Linear Accelerators”, IEEE Transactions on Nuclear Science (TNS), Vol. 60, No. 5, October 2013, pp. 3609 – 3614, **IF: 1.447**, **MNiSW: 30**. [Mój udział procentowy szacuję na 20%](#).
- [A13] I. Rutkowski, **K. Czuba**, M. Grzegorzółka, H. Schlarb, D. Makowski, A. Mielczarek, P. Perek, „Improved Vector Modulator Card for MTCA-Based LLRF Control System for Linear Accelerators”, IPAC 2013, Shanghai, China, pp 3207-3209. [Mój udział procentowy szacuję na 30%](#).
- [A14] **K. Czuba**, T. Jezynski, M. Hoffmann, F. Ludwig, H. Schlarb, "RF Backplane for MTCA.4 Based LLRF Control System", IEEE Transactions on Nuclear Science (TNS), Vol. 60, No. 5, October 2013, pp. 3615 – 3619, **IF: 1.447**, **MNiSW: 30**. [Mój udział procentowy szacuję na 60%](#).
- [A15] I. Rutkowski, L. Butkowski, **K. Czuba**, M. Hoffmann, F. Ludwig, H. Schlarb, C. Schmidt, R. Rybaniec, "MTCA.4-Based Digital LLRF Control System for CW SRF Linacs", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 62, No. 6, December 2015, **IF: 1.447**, **MNiSW: 30**. [Mój udział procentowy szacuję na 20%](#).

PATENTY WCHODZĄCE W SKŁAD OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

- [A16] **K. Czuba**, T. Jeżyński, F. Ludwig, H. Schlarb: Backplane Configuration for Use in Electronic Crate Systems, Wynalazek, Zaakceptowany, Numer zgłoszenia: EP20120004371, Numer patentu/prawa: EP 2672793 B1, Data zgłoszenia: 08-06-2012, Data udzielenia (decyzji): 26-07-2017, Publikacja patentu/wzoru: [WUP 26-07-2017]
[Swój wkład w ten wynalazek oceniam na 30%, MNISW 40.](#)
- [A17] **K. Czuba**, T. Jeżyński, F. Ludwig, H. Schlarb: Backplane Configuration for Use in Electronic Crate Systems, Wynalazek, Zaakceptowany, Numer zgłoszenia: US 2013/0329392 A1, Numer patentu/prawa: US9374915 B2, Data zgłoszenia: 12-12-2013, Data udzielenia (decyzji): 21-06-2016
[Swój wkład w ten wynalazek oceniam na 30%, MNISW 40.](#)

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wykaz najczęściej używanych skrótów:

- DESY - *Deutsches Elektronen-Synchrotron*, ośrodek naukowy, Hamburg, Niemcy
- ESS – *European Spallation Source*, Lund, Szwecja

- E-XFEL – *European X-Ray Free Electron Laser*, akcelerator cząstek elementarnych oraz źródło promieniowania rentgenowskiego w Hamburgu
- LLRF – *Low Level Radio Frequency*, system sterowania polem przyspieszającym cząsteczki elementarne w akceleratorze

c.1) Przebieg pracy naukowej

Działalność naukową związaną z tematyką sterowania i synchronizacji liniowych akceleratorów cząstek elementarnych rozpocząłem w roku 2002 wraz ze studiami doktoranckimi na Politechnice Warszawskiej. Od tego roku regularnie wyjeżdżam do niemieckiego ośrodka naukowego Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), znajdującego się w Hamburgu. Moje wyjazdy były częścią programu współpracy naukowej Politechniki Warszawskiej z DESY mającej na celu rozwój technik budowy akceleratorów cząstek elementarnych na potrzeby rozwoju nauki oraz praktycznego wykorzystania m.in. w badaniach przemysłowych struktury materiałów. W DESY zostałem włączony do zespołu badawczego pracującego nad systemami sterowania parametrami pola elektromagnetycznego w.cz. służącego do przyspieszania elektronów w liniowych akceleratorach cząstek. W języku angielskim takie systemy noszą nazwę „*Low Level Radio Frequency control systems*” (LLRF). Budowa systemów LLRF jest tak zaawansowaną i istotną gałęzią nauki, że na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat wytworzyła się ogólnoswiatowa społeczność skupiająca naukowców rozwijających badania w tej dziedzinie techniki.

Współpracę z DESY rozpocząłem od udziału w projektach elementów systemu sterowania akceleratora FLASH takich jak układ przemiany częstotliwości, precyzyjny detektor fazy oraz generator sygnału heterodyny. Wykonane projekty zostały zbudowane dla systemu LLRF starszej generacji, opartego na platformie VME, ale stanowiły istotny element konstrukcji nowej generacji systemu LLRF, która jest stosowana obecnie w wielu akceleratorach na całym świecie, np. European-XFEL w Hamburgu, European Spallation Source w Lund oraz PAL w Pohang w Korei Południowej.

W latach 2003-2004 zostałem włączony do prac nad modernizacją systemu LLRF oraz przebudową systemów generatora wzorcowego (SGW) i synchronizacji akceleratora FLASH (przed 2003 rokiem nazywanym UV-FEL). Modernizacja i rozwój podsystemów akceleratora FLASH miały służyć poprawie parametrów tego akceleratora, a także stanowić bazę sprzętową dla konstrukcji zderzacza TESLA (długość około 31 km), który miał powstać w Hamburgu. Jednym z moich głównych zadań było zbudowanie łącza do synchronizacji urządzeń w.cz. pracujących na częstotliwości 1,3 GHz w odległości do 15 km (połowa długości akceleratora TESLA) z dokładnością sięgającą 1 pikosekundy. Zadanie okazało się niezwykle trudne, ale po około trzech latach prac zbudowałem demonstrator optoelektronicznego systemu aktywną kompensacją dryftów fazy, który z kilkukrotnym nadmiarem spełniał wymagania projektowe. W tym samym czasie pracowałem też nad systemami generatora wzorcowego oraz synchronizacji akceleratora FLASH i stałem się jednym z głównych konstruktorów tych systemów. Łącząc doświadczenia praktyczne oraz badania i analizę wyników opracowałem metodykę budowania systemów synchronizacji dużych akceleratorów cząstek elementarnych, którą przedstawiłem w wyróżnionej rozprawie doktorskiej obronionej w roku 2007.

W trakcie moich prac nad doktoratem, ze względu na olbrzymie koszty budowy i zmiany sytuacji gospodarczej, Niemcy zrezygnowały z budowy akceleratora TESLA, a społeczność międzynarodowa zdecydowała o zmianie tego projektu na International Linear Collider (ILC), który wciąż jest w fazie koncepcyjnej i najprawdopodobniej powstanie w Japonii. Równoległe z zaniechaniem przez Niemcy budowy zderzacza TESLA podjęto decyzję o budowie Europejskiego Lasera Rentgenowskiego (European-XFEL, w skrócie E-

XFEL) w Hamburgu. Akcelerator FLASH stał się urządzeniem prototypowym dla projektu E-XFEL. Moje prace nad elementami systemu sterowania LLRF były kontynuowane, a ja zostałem kierownikiem projektów generatora wzorcowego i synchronizacji akceleratora E-XFEL. Wymagania projektowe były jeszcze trudniejsze do spełnienia niż w przypadku zderzacza TESLA: synchronizacja krótkoterminowa na poziomie 10 femtosekund przy odległościach pomiędzy urządzeniami sięgających 2 km. Przez prawie 9 lat kierowania tymi projektami, wraz zespołem opracowałem i wdrożyłem rozwiązania, które spełniają wymagania synchronizacji akceleratora E-XFEL i pozwoliły na jego uruchomienie w roku 2017.

Pomimo iż moim głównym zadaniem była budowa systemów generacji sygnałów wzorcowych oraz synchronizacji femtosekundowej urządzeń, nie zaprzestałem prac nad elementami systemu sterowania LLRF. Brałem udział w pracach nad prototypowym systemem LLRF wykonanym w zmodyfikowanej technologii telekomunikacyjnej Advanced TCA (ATCA, *Advanced Telecommunications Computing Architecture*). W latach 2009-2013 byłem kierownikiem zadania w europejskim projekcie 7 programu ramowego *European Coordination for Accelerator Research and Development* (EuCARD), w ramach którego opracowałem nowatorskie rozwiązania do rozprowadzania sygnałów analogowych w kasetach ATCA, a także moduły służące do generacji sygnałów zegarowych i modulacji wektorowej sygnałów w.cz.. W ramach projektu współfinansowanego TESLA-XFEL, którego byłem kierownikiem po stronie Politechniki Warszawskiej, wziąłem udział w budowie i uruchomieniu prototypowego systemu sterowania LLRF wykonanego w technologii ATCA.

W roku 2010 w DESY podjęto decyzję o zmianie platformy sprzętowej dla systemu LLRF z ATCA na siostrzaną (ale charakteryzującą się nieco mniejszymi rozmiarami fizycznymi) MTCA.4. W związku z tą decyzją urządzenia zaprojektowane w technologii ATCA musiały zostać zaadaptowane do formatu MTCA.4 i dalej rozwijane w tej technologii. Brałem intensywny udział w budowie modułów precyzyjnej przemiany częstotliwości, modulatorów wektorowych, układów generacji ultraprecyzyjnych sygnałów heterodyny i zegara, a także integracji całego systemu. Jestem pomysłodawcą integracji dodatkowej płyty zbiorczej (tzw. *backplane*) o nazwie RTM Backplane, która umożliwi rozprowadzanie sygnałów analogowych oraz znaczne rozszerzenie możliwości standardu MTCA.4. Rozwiązanie zostało opatentowane w Unii Europejskiej i w USA. W celu opracowania rozwiązania RTM Backplane w latach 2010 – 2013 prowadziłem bardzo intensywną współpracę z firmami budującymi kasety standardu MTCA.4, dzięki której powstała i została wdrożona produkcja RTM Backplane na potrzeby akceleratora XFEL. Rozwiązanie okazało się unikatowe i bardzo interesujące dla szerokiej społeczności. W konsekwencji zostałem członkiem międzynarodowej organizacji PCI Industrial Computer Manufacturers Group (PICMG), która opracowała m.in. standardy komputerowe takie jak PCI Express, czy telekomunikacyjne AdvancedTCA, MicroTCA, AMC. W latach 2014 – 2016 czynnie uczestniczyłem w pracach grupy roboczej Physics Hardware Architectures, która prowadzi prace rozwojowe nad nowymi standardami takimi jak MTCA.4 i MTCA.4.1 oraz zajmuje się dalszą adaptacją standardów xTCA (ATCA.0, MTCA.0, AMC.1, AMC.2) na potrzeby eksperymentów fizyki wysokich energii. Wynikiem prac komisji jest wprowadzenie mojego rozwiązania RTM Backplane do aktualizacji standardu opublikowanej w dokumencie PICMG „Enhancements for MicroTCA.4” [1]. Obecnie to rozwiązanie jest wykorzystywane w kilku ośrodkach akceleratorowych na świecie: m.in. w DESY, CERN w Szwajcarii oraz w KEK w Japonii.

Od roku 2008 jestem koordynatorem technicznym współpracy DESY – PW. Kieruję zespołem naukowców i doktorantów realizujących badania w DESY oraz ustaląm zakres wspólnych badań i projektów, a także nadzoruję pracę zespołu. Do roku 2018 byłem kierownikiem łącznie 28 grantów współfinansowanych, niewspółfinansowanych

i kontraktów z DESY. W czasie pisania tego autoreferatu uzgodniłem zakres kolejnej pracy badawczej, którą wykonam wspólnie z naukowcami z ośrodka DESY.

Od 2015 roku prowadzę współpracę z Europejskim Źródłem Neutronów (*European Spallation Source*, ESS ERIC). Jest to projekt realizowany obecnie w Lund w Szwecji, bazujący na liniowym akceleratorze protonów. Jestem kierownikiem czterech projektów dla ESS ERIC:

1. Polskiego wkładu do systemu LLRF realizowanego w ramach konsorcjum PEG (NCBJ, Politechnika Łódzka i Politechnika Warszawska).
2. Systemu synchronizacji - *Phase Reference Line* (PRL) – akceleratora ESS.
3. Budowy elektroniki do pomiaru prądu wiązki protonowej - *Beam Current Monitor* (BCM).
4. Projektowania okablowania oraz infrastruktury dla systemów diagnostyki wiązki ESS.

W pracach nad podsystemami akceleratora ESS wykorzystuję i rozwijam doświadczenie zdobyte przy projektach FLASH oraz XFEL, a projekt PRL należy do grupy projektów najlepiej ocenianych przez społeczność ESS oraz komisję Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod względem jakości organizacji, wyników oraz postępów prac.

W styczniu 2019 roku ruszyła budowa polskiego akceleratora PolFEL, który powstaje w ośrodku NCBJ w Świerku. Umowa konsorcjum została podpisana w październiku 2018 roku. Jestem kierownikiem projektów systemów generatora wzorcowego oraz synchronizacji tego akceleratora. Dzięki udziałowi w tym projekcie będę mógł wykorzystać doświadczenia zdobyte za granicą do rozwoju polskiej infrastruktury naukowej.

Od roku 2016 pełnię funkcje Zastępcy Dyrektora Instytutu ds. Nauki oraz Kierownika Zespołu Projektowania Systemów Wielkiej Częstotliwości w Instytucie Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej.

Moje najważniejsze osiągnięcia naukowo badawcze związane z opisanym powyżej przebiegiem pracy naukowej można podzielić na trzy spokrewnione tematycznie grupy:

1. Badania i projektowanie systemów synchronizacji femtosekundowej urządzeń w.cz. (wraz z badaniami i minimalizacją dryftów fazy sygnałów).
2. Konstruowanie, badania oraz optymalizacja generatorów sygnałów wzorcowych o femtosekundowej stałości fazy.
3. Badania i rozwój podzespółów systemów sterowania LLRF dla akceleratorów cząstek elementarnych.

c.2) Badania i projektowanie systemów synchronizacji femtosekundowej urządzeń w.cz.

Nowoczesne rozproszone systemy elektroniczne oraz duże urządzenia badawcze takie jak akceleratory cząstek elementarnych charakteryzują się systematycznie wzrastającymi rozmiarami oraz złożonością. Każdy taki system zawiera olbrzymią liczbę urządzeń elektronicznych wymagających precyzyjnej synchronizacji. Do najbardziej zaawansowanych współcześnie systemów należy zaliczyć projekty akceleratorów cząstek elementarnych takie jak Europejski Laser Rentgenowski (European XFEL). Projekt ten zawiera tysiące urządzeń wielkiej częstotliwości zainstalowanych w tunelach o łącznej długości sięgającej prawie 7 km i wymagających precyzyjnej synchronizacji fazy z dokładnością rzędu pojedynczych femtosekund. Projektowanie i budowa systemu synchronizacji (bardziej precyzyjnie: systemu

dystrybucji sygnału odniesienia fazy) spełniającego takie wymagania jest niezwykle trudnym zadaniem naukowym i inżynierskim. Jest tak dlatego, że dla zapewnienia odpowiedniej dokładności synchronizacji fazy w budowanym systemie należy wykorzystać wiedzę z różnych dziedzin techniki, a także dlatego, że aspekty pozornie mało ważne, często pomijane w innych zastosowaniach danej techniki, mogą mieć znaczący wpływ na precyzję działania całego systemu dystrybucji. W ciągu ostatnich kilkunastu lat problematyka femtosekundowej synchronizacji fazy systemów w.cz. zaczęła być traktowana jako odrębna dziedzina badań. Do niedawna praktycznie nie istniała literatura opisująca tę tematykę, a moje publikacje, poczynając od rozprawy doktorskiej, były często pierwszymi pozycjami opisującymi wybrane aspekty tej tematyki. Były one też często komentowane w środowisku naukowców zajmujących się budową akceleratorów cząstek elementarnych.

Problematyka synchronizacji rozległych systemów w.cz. znacząco różni się od rozwijanych od dziesięcioleci technik synchronizacji systemów cyfrowych i telekomunikacyjnych, które bazują głównie na synchronizacji czasu względem określonego źródła sygnału [1, 2, 3]. Niezależnie od złożoności i architektury tych systemów można - bardzo upraszczając - stwierdzić, że podstawą działania tych systemów jest określenie czasu wystąpienia zbocza sygnału „cyfrowego” względem sygnału ze źródła odniesienia. Osiągane dokładności synchronizacji czasowej mieszczą się zwykle w zakresie od nanosekund do mikrosekund, co jest wystarczające dla takich systemów.

Systemy elektroniczne wchodzące w skład akceleratorów cząstek elementarnych wymagają dwójakiej synchronizacji: czasowej oraz fazowej. Pierwszy rodzaj synchronizacji opiera się na podobnej zasadzie jak synchronizacja systemów cyfrowych i zwykle bazuje na rozpowszechnionych standardach (tak jak np. system White Rabbit [1]). Synchronizacja czasowa akceleratorów zwykle nie wymaga bardzo wysokiej precyzji czasowej, która podobnie jak w systemach telekomunikacyjnych zawiera się w zakresie nano- lub mikrosekund.

Synchronizacja fazowa jest zupełnie innym zagadnieniem, gdyż polega na synchronizacji fazy sygnału harmonicznego względem źródła odniesienia i zwykle wymaga znacznie większej precyzji niż synchronizacja w dziedzinie czasu. Projektowania systemów synchronizacji fazy wymaga znacznie bardziej zaawansowanych technologii generacji, dystrybucji oraz badań stałości fazy sygnału niż metody czasowo-częstotliwościowe. W szczególności poprzez wykorzystanie pomiaru szumów fazowych i obliczania gęstości prawdopodobieństwa odchylenia fazy od pewnej wartości referencyjnej do określenia precyzji synchronizacji. Dlatego nie mają w tym przypadku zastosowania szeroko rozpowszechnione standardy telekomunikacyjne synchronizacji fazy, takie jak IEEE 1588-2008 [4].

Synchronizacja systemów sterowania akceleratorów cząstek elementarnych polega na doprowadzeniu harmonicznego sygnału odniesienia fazy z generatora wzorcowego (ang. *Master Oscillator*) do urządzeń odbiorczych. Idealny sygnał napięciowy $u(t)$ o sinusoidalnej zależności od czasu opisywany jest zależnością:

$$u(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi f_0 t), \quad (1)$$

gdzie U_0 - amplituda napięcia, f_0 - częstotliwość sygnału, t - czas.

Określając sygnał jako stabilny nie mamy na myśli sygnału idealnego, lecz rzeczywisty, którego chwilowe napięcie (np. wyjściowe z precyzyjnego generatora) może być określone jako:

$$u(t) = (U_0 + \epsilon(t)) \cdot \sin(2\pi f_0 t + \varphi(t)), \quad (2)$$

gdzie $\epsilon(t)$ jest odchyłką od nominalnej amplitudy, a $\varphi(t)$ jest odchyłką od nominalnej fazy. Doprecyzowania wymaga fakt, że mówiąc o stałości jakiegoś parametru często mamy na myśli wartość jego odchylenia od stałej, idealnej wartości. Zatem gdy określamy precyzję

działania systemu synchronizacji fazy, to mówimy o niestałości fazy i wyrażamy ją w postaci odchyłki wartości $\varphi(t)$ od nominalnej wartości fazy sygnału [KC15] .

W środowisku projektantów akceleratorów cząstek elementarnych przyjęło się podawanie wartości niestałości fazy w dziedzinie czasu uzyskanej w wyniku przeliczenia wartości kąta fazowego sygnału harmonicznego wyrażonej w stopniach lub radianach na odpowiadającą jej wartość czasową ułamka okresu sygnału. Do tego przeliczenia niezbędna jest znajomość częstotliwości / okresu sygnału. Definiowanie niestałości fazy w dziedzinie czasu ma znaczenie praktyczne, gdyż od dokładności synchronizacji fazy podsystemów w.cz. akceleratora zależy pośrednio czas przelotu wiązki cząsteczek przez rezonatory przyspieszające, bądź też czas dotarcia cząsteczek do celu i jest on oczywiście wyrażany w sekundach. Dzięki temu łatwiej jest fizykom odpowiedzialnym za dynamikę wiązki cząsteczek określić wymagania na stałość fazy w mierze czasowej niż w dziedzinie kątowej. Drugi aspekt praktyczny to możliwość ilościowego porównania wartości niestałości fazy sygnałów o różnych częstotliwościach, które nie ma sensu w dziedzinie kątowej. Często różne podsystemy akceleratora pracują na innych częstotliwościach w.cz.. Po przeliczeniu wartości niestałości na miarę czasową takie porównanie jest możliwe i w dodatku może zostać bezpośrednio odniesione do wymagań czasowych dla wiązki cząstek elementarnych.

Ze względu na różne procesy fizyczne odpowiadające za wolne i szybkie zmiany fazy rzeczywistych wzorcowych sygnałów harmonicznym odróżnia się dwa rodzaje niestałości fazy [KC15]:

1. Niestalość krótkoterminowa odnosząca się do wszystkich zmian fazy / częstotliwości, które nastąpiły w przyjętym umownie czasie nie dłuższym niż jedna sekunda. Parametr ten wywodzi się z „szybkich” składowych szumowych fazy (mierzonych dla częstotliwości przekraczających 1 Hz). Miarą tego rodzaju niestałości jest gęstość widmowa sygnału lub jitter fazy o wartości wyrażonej miarą w dziedzinie czasu.
2. Niestalość długoterminowa odnosząca się do zmian fazy / częstotliwości, które nastąpiły w czasie dłuższym niż jedna sekunda. Ten rodzaj niestałości wywodzi się z wolnych procesów takich jak długoterminowe dryfty fazy / częstotliwości, starzenie się lub podatność parametrów na czynniki zewnętrzne, takie jak zmiany temperatury lub wilgotności. Niestalość ta jest często podawana jako parametr precyzyjnych generatorów wzorcowych, tj. generatorów kwarcowych lub atomowych. Miarą tego parametru najczęściej jest ppm na jednostkę czasu (minuty, godziny, dni, miesiące a nawet lata). Inną użyteczną miarą niestałości fazy sygnałów są ps (pikosekundy) na jednostkę czasu lub w (dziedzinie fazowej) stopnie na jednostkę czasu. Te ostatnie dwie miary są często wykorzystywane w systemach synchronizacji akceleratorów cząstek elementarnych

W akceleratorach konstruowanych w czasie minionych kilkunastu lat częstotliwość głównego sygnału odniesienia fazy zwykle jest równa częstotliwości własnej wnek rezonansowych służących do wytworzenia pola przyspieszającego cząsteczki i zawiera się w zakresie od kilkuset MHz do kilku GHz (np. jest równa 1.3 GHz w przypadku akceleratora E-XFEL). Precyzyjne rozprowadzenie i rozdzielanie takich typowo mikrofalowych sygnałów do wielu urządzeń rozłożonych na przestrzeni setek metrów lub kilometrów jest niezwykle utrudnione przez typowe właściwości mikrofalowych torów transmisyjnych i wymaga m.in. precyzyjnych badań parametrów tych torów. Główne problemy to straty mocy sygnałów wnoszone przez tory transmisyjne, odbicia sygnałów spowodowane przez niedopasowanie poziomów impedancji elementów toru, a także wrażliwość podzespołów na zmiany temperatury i wilgotności.

Pracując nad systemami synchronizacji akceleratora TESLA, a potem FLASH oraz XFEL uporządkowałem dostępne wiadomości i doświadczenia oraz opracowałem metodykę projektowania takich systemów synchronizacji. Ważną i pierwszą tego typu publikacją była moja rozprawa doktorska [KC15] , która była wielokrotnie cytowana i komentowana w środowisku naukowym. Rozprawa ta została doceniona i wydana jako monografia w 2013

roku w ramach serii wydawniczej „Technika Akceleratorowa” [KC48] . Jednym z moich najważniejszych osiągnięć jest to, że na podstawie moich rozważań zawartych w rozprawie doktorskiej - po doktoracie - powstały systemy synchronizacji akceleratorów FLASH (ogólną koncepcję systemu oraz podstawowe bloki generatora wzorcowego zaprojektowałem w trakcie pisania doktoratu, natomiast budowę większości bloków oraz uruchomienie całego systemu ukończyłem po doktoracie) oraz E-XFEL (system zaprojektowany i zbudowany w całości po doktoracie). Skrócony opis problematyki projektowania takich systemów zawarłem w publikacji [A1].

Główne problemy, które musi rozwiązać projektant systemów synchronizacji to:

- rozdzielenie i dostarczenie sygnału w.cz. do wielu urządzeń rozłożonych w systemie o dużych rozmiarach fizycznych,
- zapewnienie odpowiednich poziomów mocy (często wymagana jest także precyzyjna stabilizacja amplitudy sygnału) przy olbrzymim tłumieniu wprowadzanym przez tor transmisyjny w.cz.,
- zapewnienie odpowiednio niskich wartości niestałości krótko i długoterminowych fazy sygnału względem źródła w obecności szumów własnych oraz z uwzględnieniem wrażliwości elementów toru transmisyjnego na czynniki zewnętrzne takie jak zmiany temperatury i zakłócenia elektromagnetyczne,
- zapewnienie niezawodności działania systemu oraz wysokiej dostępności sygnału synchronizującego w akceleratorze (np. w E-XFEL wymagana jest dostępność sygnału na poziomie 99,999% czasu pracy),
- wykonanie precyzyjnych badań pomiarów wszystkich elementów oraz opracowanie modelu toru transmisyjnego,
- ograniczony budżet projektu.

Wyliczone powyżej problemy są często współzależne i sprawiają, że projektowanie systemów synchronizacji femtosekundowej jest niezwykle trudnym zadaniem naukowym i inżynierskim. Bardzo często pojawiają się argumenty, że wiele z tych problemów rozwiązuje zastosowanie technik optycznych transmisji sygnałów w.cz. W niektórych przypadkach jest ono słuszne, jednak szeroko dostępne techniki rozprowadzania sygnałów w.cz. poprzez łącza światłowodowe (takie jak *RF over Fiber*) gwarantują dokładności synchronizacji fazy znacznie mniejsze od wymaganych (zwykle w zakresie nanosekundowym). W kilku ośrodkach trwają bardzo intensywne i owocne prace nad optycznymi systemami synchronizacji femtosekundowej. Między innymi w DESY opracowano system o znakomitych parametrach [5], [6]. Jednak koszt budowy takich systemów jest olbrzymi w porównaniu z systemami opartymi na technikach w.cz. Koszt budowy jednego optycznego łącza od źródła sygnału odniesienia do urządzenia docelowego może sięgnąć kilkuset tysięcy euro, a niezawodność niektórych podzespołów jest wciąż na znacząco niższym poziomie niż niezawodność znanych od dziesięcioleci i dopracowanych elementów systemów w.cz. Koszt budowy jednego klasycznego łącza w.cz. zwykle nie przekracza kilku tysięcy euro.

Kolejny problem to odporność światłowodów na promieniowanie występujące w tunelach akceleratorów. Powoduje ono m.in. wzrost tłumienia optycznego światłowodów i w efekcie degradację parametrów łącza. Istnieją światłowody odporne na radiację, ale ich koszt jest olbrzymi. Wyżej wymienione czynniki powodują, że systemy synchronizacji fazy akceleratorów są budowane albo w czysto klasycznej technologii w.cz. (mniej wymagające), albo hybrydowo, czyli z wykorzystaniem technik optycznych do dystrybucji sygnałów do kilku krytycznych podzespołów akceleratora oraz do poprawy dokładności synchronizacji poprzez łącza w.cz., które stanowią główny sposób dystrybucji sygnałów.

Bardzo dobrym przykładem konstrukcji takiego systemu jest system synchronizacji akceleratora E-XFEL opisany w moich publikacjach [A2] oraz [A3]. System ten zawiera zarówno łącza optyczne jak i elektryczne w.cz., zoptymalizowane pod względem jakości oraz

możliwości finansowych projektu. W latach od 2008 do 2017 byłem kierownikiem projektu systemu synchronizacji w.cz. akceleratora E-XFEL. Jestem autorem ogólnej koncepcji systemu, architektury łącz oraz wielu rozwiązań technicznych (np. dobór medium dystrybucji, optymalizacja położenia łączy optycznych i kablowych, integracja z systemami akceleratora oraz systemem femtosekundowej synchronizacji optycznej, aktywna redukcja dryftów fazy i wiele innych). Akcelerator E-XFEL został z sukcesem uruchomiony w roku 2017 i już od ponad roku trwają w nim badania nad strukturą materii. W czasie prac nad tym systemem kierowałem zespołem inżynierów, studentów i doktorantów z Politechniki Warszawskiej oraz DESY. W chwili obecnej wciąż prowadzę współpracę z ośrodkiem DESY w celu dalszej optymalizacji podsystemów i poprawy parametrów systemu synchronizacji. Poniżej opisany jest bardziej szczegółowo mój wkład w budowę tego systemu.

Poza projektowaniem i budową całości systemu synchronizacji do moich osiągnięć należy zaliczyć udział w badaniu parametrów podzespołów tego systemu. Już na wczesnym etapie projektu wykazałem, że znacznie trudniejsze technicznie i badawczo będzie spełnienie wymagań długoterminowej niż krótkoterminowej stałości fazy w systemie. O ile stosunkowo łatwo było przeprowadzić sygnał bez znaczącej degradacji poziomu szumów fazowych, o tyle bardzo trudne okazało się zapewnienie odpowiednio niskich dryftów fazy (w najtrudniejszym przypadku na poziomie poniżej 100 fs). W praktyce każdy element łączy - poczynając od elementów pasywnych takich jak przewody koncentryczne i dzielniki mocy, a kończąc na wzmacniaczach mocy – wprowadza długoterminowe dryfty fazy do sygnału i niestety dryfty wprowadzone przez wszystkie elementy toru w.cz. sumują się. Co więcej, nie znalazłem literatury traktującej o tych zjawiskach ani o metodyce ich pomiaru. W związku z tym prowadziłem badania dryftów fazy sygnału w wielu elementach toru w.cz. (m. in. w przewodach koncentrycznych, wzmacniaczach, syntezerach i dzielnikach częstotliwości), a także opracowałem metodykę i stanowiska laboratoryjne do prowadzenia tych badań.

Jednym z moich ważniejszych osiągnięć w tej tematyce było zidentyfikowanie problematyki oraz opracowanie metodyki badania dryftów fazy w przewodach koncentrycznych w.cz. Mimo iż samo zjawisko zmiany długości elektrycznej i impedancji przewodu pod wpływem zmian temperatury było znane od kilkudziesięciu lat, to nie znalazłem żadnej publikacji traktującej o metodzie pomiaru i zakresie zmian długości elektrycznej (w efekcie wartości dryftów fazy sygnałów) w typowych przewodach koncentrycznych. Moja publikacja [A4] była pierwszą znaną mi publikacją na ten temat. W publikacji tej wraz ze współautorem pokazaliśmy wartości dryftów fazy sygnałów w popularnych przewodach. Publikacja ta była wielokrotnie cytowana, a po jej ukazaniu się otrzymałem kilkanaście zapytań od instytucji i firm w celu wyjaśnienia im pewnych aspektów problematyki. W efekcie nawiązałem współpracę z dwiema firmami. Teledyne Storm Microwave (USA) oraz JYEBAO (Chiny), dla których wykonywałem pomiary parametrów przewodów i pomagałem im opracować własne stanowiska badań. Efektem prac było wprowadzenie na rynek nowych, stabilnych fazowo przewodów koncentrycznych. Niestety ze względu na tajemnicę przemysłową firmy nie były zainteresowane opublikowaniem wyników tych badań.

Poza przewodami koncentrycznymi prowadziłem badania dryftów fazy w mikrofalowych wzmacniaczach mocy. Wyniki badań pokazały, że dryfty pojedynczego wzmacniacza mogą przekroczyć wymagania stawiane całemu systemowi synchronizacji akceleratora. Jednak ze względu na brak znajomości budowy wewnętrznej komercyjnych wzmacniaczy bardzo trudno było opublikować ogólne wytyczne na temat metodyki selekcji tych urządzeń. W związku z tym podjąłem próby zbudowania aktywnych systemów do automatycznej kompensacji dryftów własnych wzmacniaczy w.cz. Jedną z tych konstrukcji oraz wyniki jej badań opisałem w pozycji [A5]. Demonstracja dryftów własnych wzmacniacza

na poziomie 40 fs/°C jest znakomitym osiągnięciem i jest to pierwsza znana mi publikacja traktująca o tej tematyce.

Prace nad kompensowanymi fazowo wzmacniaczami były kontynuowane po tej publikacji. Opracowałem nową, poprawioną koncepcję takiego wzmacniacza, którą w roku 2017 zbudował i przetestował mój dyplomant, Radosław Papis [13]. Uzyskane dryfty fazy wzmacniacza miały wartości na poziomie około 7,1 fs/°C! Wyniki tej pracy, po drobnej optymalizacji oraz wykonaniu kilku pomiarów będą przedmiotem kolejnej publikacji w recenzowanym czasopiśmie, której ukończenie planuję w roku 2019.

Kolejnym z obszarów moich badań było opracowanie metodyki precyzyjnej detekcji wartości długoterminowych dryftów fazy. Badałem dryfty własne różnych rodzajów mikrofalowych detektorów fazy, a także brałem udział w pracach nad opracowaniem detektora bazującego na szybkich przetwornikach A/C z bezpośrednim próbkowaniem sygnałów mikrofalowych. Konstrukcja oraz wyniki badań zostały opisane w publikacji [A6]. Uzyskane dryfty własne detektora nie przekraczają 20 fs przy pomiarze sygnałów o częstotliwości 1.3 GHz. Jest to znakomity wynik, tym bardziej, że zbudowany detektor umożliwia pracę w pełnym zakresie zmian fazy pomiędzy sygnałami (2π) z zachowaniem dużej liniowości charakterystyki.

W 2017 na podstawie mojego pomysłu powstała praca inżynierska K. Sąpóra, który zbudował samokalibrujący się detektor fazy i uzyskał stałość na poziomie 10 fs/5°C [14] Jest to znacznie lepszy wynik niż praca z 2015 roku opisana w [A6], jednak należy zwrócić uwagę na nieco inny charakter i przeznaczenie tych prac. Wyniki realizacji tego układu także będą przedmiotem planowanej publikacji w recenzowanym czasopiśmie.

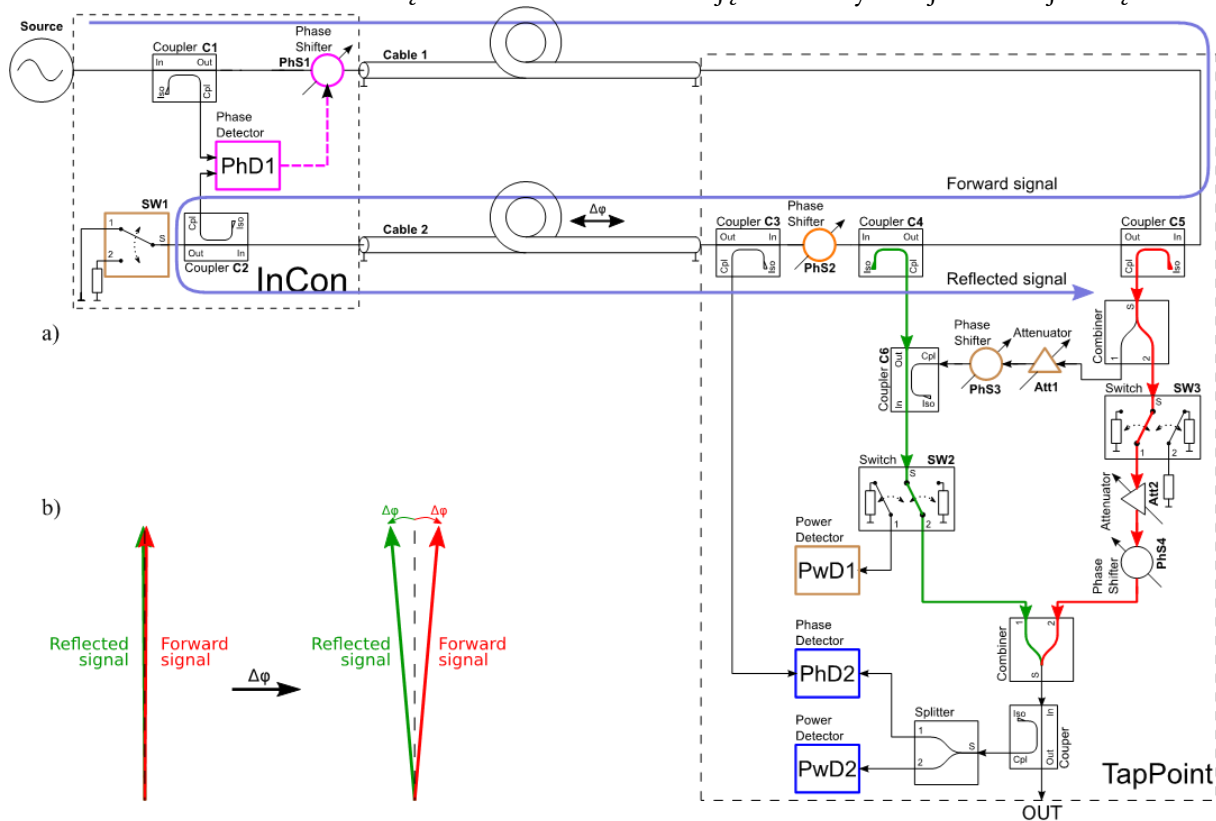
Kolejnym, z moich ważnych osiągnięć są wyniki pracy nad aktywną stabilizacją dryftów fazy w łączach bazujących na przewodach koncentrycznych. Zespół inżynierów z ośrodka SLAC (Stanford) opublikował koncepcję łącza z uśrednianiem fazy sygnału transmitowanego i odbitego [8], które było częścią systemu synchronizacji akceleratora NLC. Opis systemu był bardzo skrótowy i z pewnością koncepcja nie nadawała się do bezpośredniego wykorzystania w akceleratorze E-XFEL. Przede wszystkim istniał duży problem ze strojeniem łącza oraz z długoterminowym utrzymaniem parametrów na poziomie niezbędnym dla pracy akceleratora, w szczególności takiego jak E-XFEL. Nie ukazały się też kolejne publikacje z ośrodka SLAC opisujące uzyskaną dokładność synchronizacji.

Wraz z zespołem rozwinąłem koncepcję opracowaną w Stanford o elementy niezbędne do automatycznej kalibracji i monitorowania parametrów łącza. Projekt ten nazwałem „łączem interferometrycznym” lub w skrócie „interferometrem”. Zadanie było bardzo trudne, gdyż wymagało opracowania układu wielkiej częstotliwości, który wykona automatyczną kalibrację fazy na poziomie femtosekundowym. Uproszczony schemat blokowy systemu jest pokazany na Rys. 1. Opracowany system zawiera nadajnik / sterownik interferometru nazwany „InCON” od słów *Interferometer Controller* oraz odbiorniki (założyłem, że od jednego do trzech w jednym łączu) o nazwie TapPoint. Moduł InCon wysyła sygnał (*Forward signal*), który propaguje się do końca łącza i z powrotem poprzez przewody koncentryczne oraz moduł / moduły TapPoint. Następnie sygnał ten jest odbijany od zwarcia w module InCon i powraca do modułu TapPoint (*Reflected signal*). Części sygnałów padającego oraz odbitego są sumowane wektorowo w module TapPoint po odsprężeniu z linii głównej przez sprzęgacze kierunkowe C4 oraz C5.

Moduł InCon realizuje pętlę synchronizacji fazowej sygnału, który „obiegł” całe łącze z sygnałem wejściowym za pomocą detektora oraz przesuwnika fazy (PhD1, PhS1). Dzięki istnieniu pętli fazowej, fazy sygnałów sumowanych w module TapPoint względem sygnału wejściowego interferometru zmieniają się o $+\Delta\varphi$ lub $-\Delta\varphi$, gdzie $\Delta\varphi$ jest zmianą fazy w przewodzie łączącym moduły InCon i TapPoint (*Cable 2* na Rys. 1). W efekcie dryfty fazy

powstałe w przewodzie znoszą się i faza sygnału wyjściowego modułu TapPoint jest stabilizowana względem wejścia systemu.

Nowością w tym łączy jest wprowadzenie sprzęgacza kierunkowego C3 (mój pomysł), który dzięki istnieniu pętli fazowej InCon dostarcza do modułu TapPoint sygnał, który może zostać uznany za referencyjny (przesunięty jedynie o stałą wartość kąta fazowego względem modułu InCon), pod warunkiem, że jest mierzony w krótkim czasie - na tyle krótkim, że wartości dryftów fazy spowodowane zmianami temperatury będą pomijalnie małe. „Przeniesienie referencji” fazy do modułu TapPoint oraz wprowadzenie przełączników w.cz. oraz detektorów w modułach łączy umożliwiło realizację automatycznej kalibracji urządzenia.



Rys. 1. Uproszczony schemat łączy interferometrycznego z aktywną stabilizacją fazy sygnałów w przewodach koncentrycznych z możliwością przeprowadzenia automatycznej kalibracji [KC82].

Dla umożliwienia oceny jakości działania łączy zdefiniowałem tzw. współczynnik kompresji dryftów fazy w łączy aktywnym, który jest równy stosunkowi zmian fazy w łączy bez stabilizacji do zmian fazy w łączy z włączoną aktywną stabilizacją. Innymi słowy, parametr ten charakteryzuje ilościowo redukcję dryftów przez układy aktywne łączy.

Cechą łączy z Rys. 1 jest silnie nieliniowy charakter przebiegu współczynnika kompresji dryftów z wąskimi maksimumami lokalnymi w funkcji długości elektrycznej przewodu „Cable 2”. Aby umożliwić poprawną pracę łączy należy znaleźć jedno z maksimumów lokalnych. Służy do tego system przełączników (SWn) i detektorów (PwDn, PhDn) oraz przesuwnik fazy PhS2. Moduły InCon oraz TapPoint pracują w systemie wyposażonym w interfejsy ethernetowe, przez które następuje komunikacja z zewnętrznym kontrolerem systemu. Kontroler ten odpowiada za koordynację procesu automatycznej kalibracji oraz monitorowanie stanu pracy całego łączy.

Fizyczne realizacje modułów InCon i TapPoint zostały opracowane w ramach prac dyplomowych studentów [15], [16], [17], których byłem promotorem. Ostatnia z prac została nagrodzona w konkursie IEEE organizowanym przy konferencji MIKON 2018.

Zdjęcia prototypowych wersji modułów InCon oraz TapPoint zostały pokazane na Rys. 2 oraz Rys. 3.

Moduły InCon oraz Tap point były zaprojektowane z myślą o minimalizacji własnych dryftów. Stąd m.in. specjalnie dobrany laminat płyty, przystosowanie do stabilizacji temperatury za pomocą zewnętrznej grzałki i sterownika, a także hermetyczne obudowy. Oprócz toru w.cz. moduły zawierają także znaczną liczbę układów diagnostycznych (w tym detektory mocy i fazy) oraz interfejsy do komunikacji z zewnętrznym sterownikiem łącza. Wykonane moduły były częścią opracowanej przeze mnie koncepcji łącza interferometrycznego, które dzięki modułowości umożliwiała dostosowanie do potrzeb synchronizacji różnych fragmentów akceleratora XFEL przy jednoczesnej minimalizacji liczby wersji wykorzystanych podzespołów. Było to niezwykle istotne z punktu widzenia kosztów wytworzenia, a także utrzymania systemu synchronizacji.

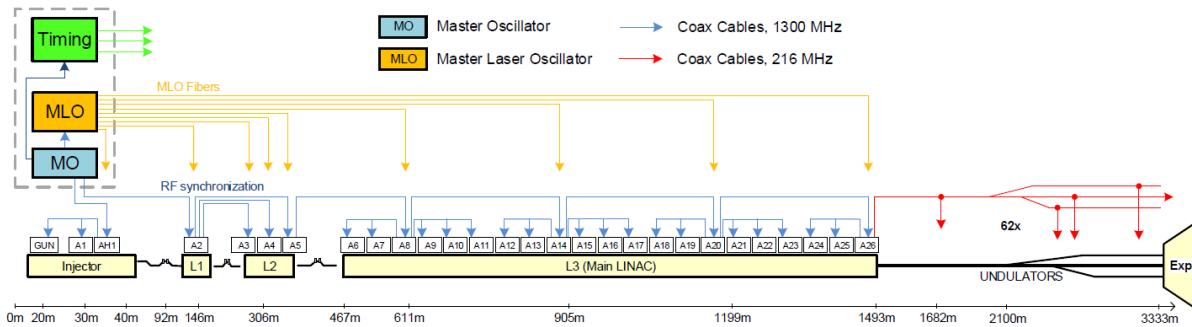


Rys. 2 Zdjęcie płyty z obwodami modułu InCon [15] Autor Dawid Kolcz, promotor K. Czuba.



Rys. 3 Zdjęcie modułu TapPoint [17] Autor Maciej Urbański, promotor K. Czuba.

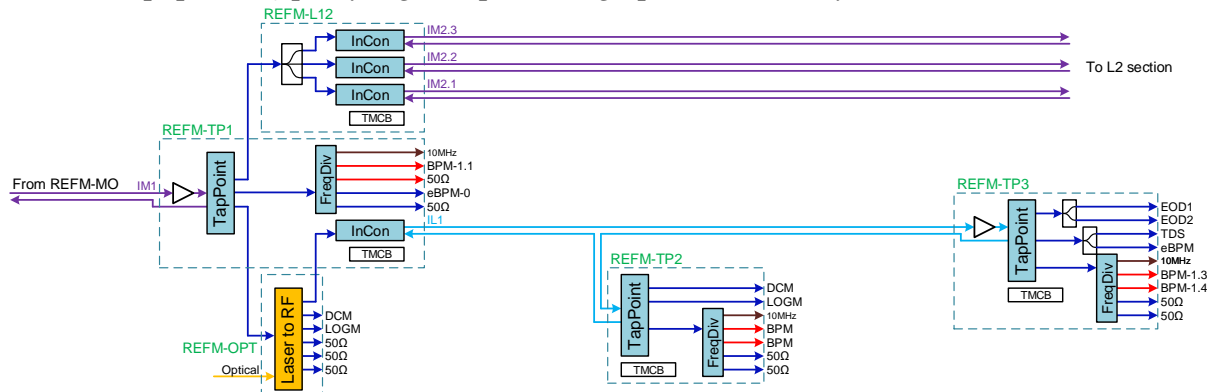
Bazując na powyższych założeniach opracowałem ogólną koncepcję konfigurowalnego łącza interferometrycznego [A3], która stała się podstawowym elementem konstrukcyjnym systemu synchronizacji akceleratora E-XFEL (Rys. 4).



Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy systemu synchronizacji akceleratora European XFEL.

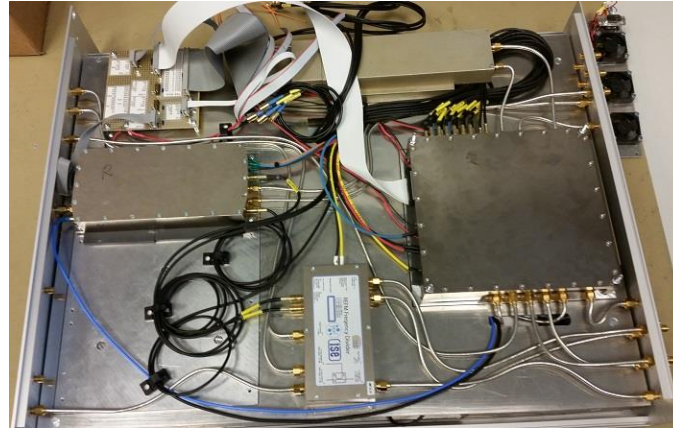
System składa się z femtosekundowych łączy optycznych (kolor pomarańczowy) [6] oraz z łączy interferometrycznych (kolor niebieski). Liczba łączy optycznych została ograniczona do 12 (nie wszystkie połączenia zostały pokazane na Rys. 4) ze względu na wysoki koszt budowy tego rozwiązania. Łącza optyczne służą do poprawy precyzji synchronizacji sygnałów rozprawdanych przez interferometry. Łącza interferometryczne są tańsze i zapewniają większą niezawodność. Dzięki temu osiągnąłem kompromis pomiędzy kosztem a precyzją działania całego systemu synchronizacji. Rozwiązanie to zostało zaakceptowane przez konstruktorów akceleratora i przeznaczone do realizacji.

Jak już wspominałem powyżej, łącza interferometryczne są zaprojektowane w sposób modułowy dla optymalizacji kosztów produkcji oraz utrzymania. Całość systemu bazuje na tzw. modułach referencyjnych (*RE*ference *MO*dule, REF_M). Wziąłem udział w projektowaniu kilku typów modułów REF_M-<nnn>. Na Rys. 5 pokazany jest fragment systemu synchronizacji w stacji A2, sekcja L1 akceleratora (patrz Rys. 4). Widoczne są schematy blokowe modułów REF_M-L12, REF_M-TP1 itd., zawierające różną liczbę modułów InCon oraz TapPoint, a także dzielniki częstotliwości (FreqDiv) i elementy komunikacyjne (TMCB) niezbędne poprawnej pracy tego rozproszonego przestrzennie systemu.



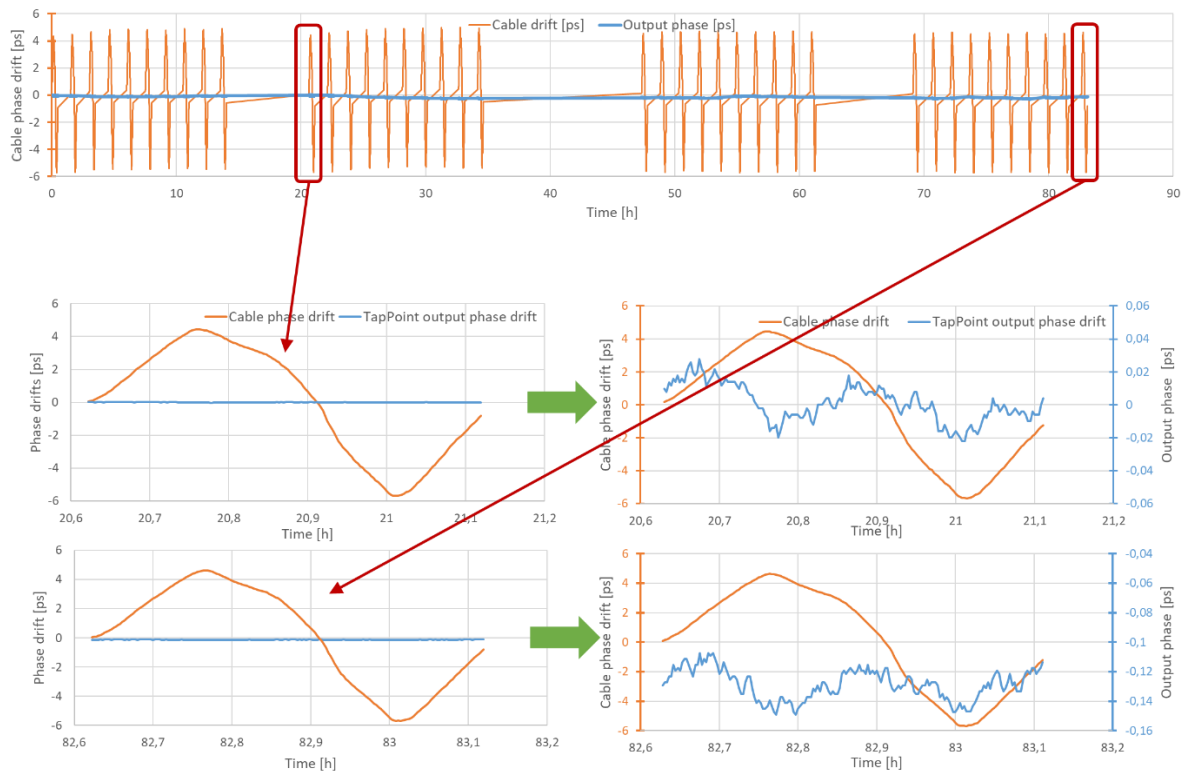
Rys. 5 Schemat blokowy fragmentu systemu synchronizacji w sekcji L1 akceleratora E-XFEL

Przygotowanie projektów modułów REF_M było olbrzymim przedsięwzięciem badawczym, inżynierskim oraz logistycznym. Na Rys. 6 pokazane jest zdjęcie jednego z modułów o nazwie REF_M-TP1, który posłużył do badania precyzji działania łączy interferometrycznych. Kierowałem zespołem, który wykonał wiele prac związanych z przygotowaniem stanowiska pomiarowego, napisaniem oprogramowania oraz wykonaniem badań. Mój wkład do projektu polegał na opracowaniu koncepcji całości systemu, opracowaniu wielu rozwiązań technicznych stosowanych w modułach REF_M, sprawdzaniu i optymalizacji projektów poszczególnych modułów, optymalizacji algorytmów kalibracji, przygotowaniu i optymalizacji stanowisk testowych, a także analizie wyników badań.



Rys. 6. Realizacja sprzętowa modułu REFM-TP1

Przykładowe wyniki pomiarów zostały pokazane na Rys. 7. Łącze zostało automatycznie skalibrowane, a następnie przez 85 godzin badana była stałość fazy na wyjściu interferometru (górny wykres, kolor niebieski) oraz w niestabilizowanym przewodzie (kolor pomarańczowy). Periodycznie wymuszane były zmiany fazy w przewodzie sięgające wartości 10 ps. Dzięki aktywnej stabilizacji przez interferometr dryfty zostały zmniejszone do zakresu około 50 fs (patrz dolne wykresy na Rys. 7). Wyniki badań zostały zaprezentowane na konferencji IEEE RT2018 i zgłoszone do publikacji w czasopiśmie IEEE Transactions on Nuclear Science. Artykuł jest obecnie w recenzji i ukaże się prawdopodobnie wiosną roku 2019. Wersja konferencyjna artykułu jest dostępna w serwisie Arxiv.org [KC82].



Rys. 7. Wyniki pomiaru dryftów fazy na wyjściu łącza interferometrycznego w porównaniu z dryftami fazy w przewodzie bez kompensacji [KC82].

Od roku 2016 jestem kierownikiem projektu systemu synchronizacji dla Europejskiego Źródła Neutronów (European Spallation Source) mieszczącego się w Lund w Szwecji. Projekt zatytułowany „Phase Reference Line” (PRL) ma zapewnić dostarczenie sygnałów synchronizujących o częstotliwościach 352 MHz oraz 704 MHz do około trzystu

wyjść w tunelu o długości 600 metrów. Wymagana krótkoterminowa stałość fazy wynosi $0,1^\circ$, a stałość długoterminowa 2° . Wartość 2° odpowiada 15,8 ps na częstotliwości 352 MHz oraz 7,9 ps na częstotliwości 704 MHz. Są to wartości o około trzy rzędy wielkości większe od wymaganych w akceleratorze E-XFEL. Jednak ze względu na znacznie niższe częstotliwości, pracę w środowisku narażonym na wysokie poziomy radiacji (akcelerator protonów), znacznie mniejszą dostępność podzespołów dla tych częstotliwości, a także nietypowe rozwiązanie polegające na rozprowadzaniu dwóch sygnałów w jednym medium transmisyjnym, budowa tego systemu stanowi olbrzymie wyzwanie naukowe oraz inżynierskie. Od połowy roku 2016 kieruję zespołem kilkunastu naukowców, inżynierów oraz doktorantów, który buduje projekt PRL. Koncepcja projektu została opisana w publikacji [A7]. W latach 2016 i 2017 zbudowaliśmy prototyp systemu na Politechnice Warszawskiej, a następnie rozpoczęliśmy instalację systemu w tunelu akceleratora. Do czasu przygotowywania tego autoreferatu w tunelu akceleratora zainstalowano już około 500 metrów linii. *Mój merytoryczny wkład do projektu to opracowanie koncepcji całego systemu, wybór medium transmisyjnego, decyzja o pasywnej dystrybucji sygnałów z aktywną stabilizacją temperatury, koncepcja aktywnej stabilizacji fazy w łączy od generatora wzorcowego do linii głównej w tunelu oraz opracowanie wielu szczegółów technicznych budowy systemu PRL.*

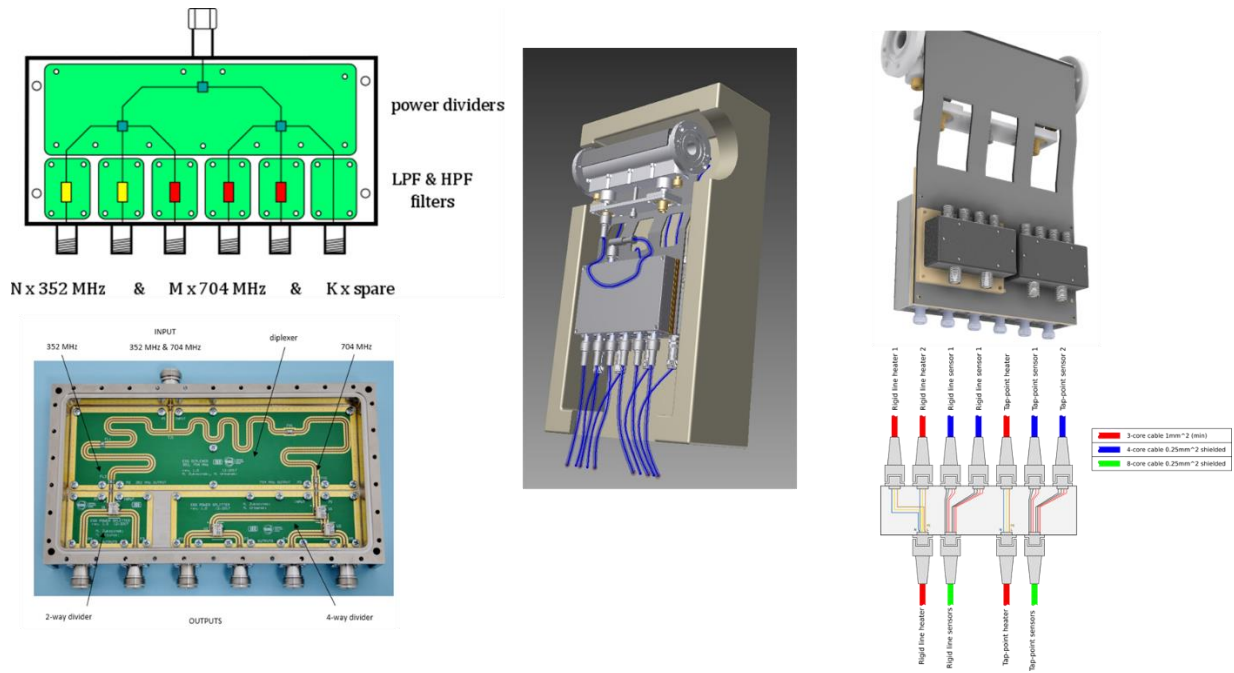
W ramach projektu powstało wiele nowatorskich rozwiązań technicznych, a po jego uruchomieniu są planowane zaawansowane badania parametrów oraz publikacje w czasopismach naukowych. Będą to najprawdopodobniej pierwsze opublikowane tego typu badania systemu synchronizacji o tak dużej złożoności oraz rozmiarach.

Na Rys. 8 pokazany jest sprzęgacz kierunkowy zaprojektowany na potrzeby projektu PRL we współpracy z polską firmą Space Forest. Ma on unikatową konstrukcję umożliwiającą synchroniczne dostrojenie wartości sprzężenia na dwóch różnych częstotliwościach, a także jest odporny na promieniowanie. Dzięki temu mógłby pracować nawet w warunkach kosmicznych.



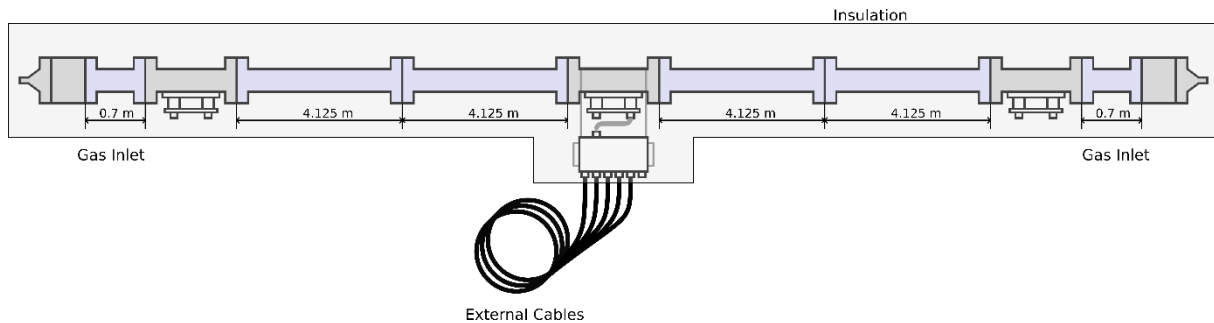
Rys. 8. Sprzęgacz kierunkowy zaprojektowany na potrzeby projektu PRL.

Na Rys. 9 pokazane są wybrane szczegóły konstrukcji modułu TapPoint, który służy do oddzielenia i wyprowadzenia sygnałów o częstotliwościach referencyjnych z linii głównej PRL do sześciu różnych wyjść. Moduł jest stabilizowany termicznie (ze względu na wymaganą stałość fazy sygnałów), a także jest wykonany z materiałów odpornych na radiację. Przede wszystkim jednak jego konstrukcja została zoptymalizowana pod względem minimalizacji dryftów fazy sygnałów. W czasie przygotowywania tego referatu kieruję badaniami parametrów prototypu tego modułu.



Rys. 9. System TapPoint zaprojektowany dla projektu PRL.

Na Rys. 10 i Rys. 11 pokazano schemat oraz zdjęcie prototypowego odcinka linii PRL, który został zbudowany i podwieszony w korytarzu Wydziału Elektroniki Politechniki Warszawskiej w celu optymalizacji oraz badań parametrów przed zainstalowaniem całej linii w tunelu akceleratora w Szwecji. Na Rys. 12 pokazany jest fragment linii głównej PRL w trakcie instalacji w tunelu akceleratora. W chwili sporządzania tego referatu zainstalowano już około pięćset z sześciuset metrów linii głównej.



Rys. 10. Schemat prototypowego odcinka linii referencyjnej (PRL) dla akceleratora ESS.

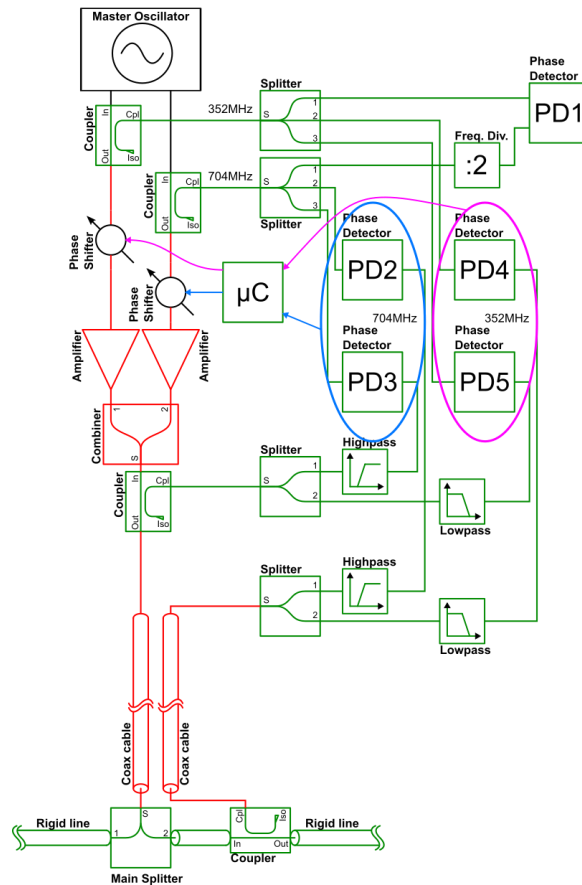


Rys. 11. Instalacja prototypowego odcinka linii PRL w korytarzu na Politechnice Warszawskiej.



Rys. 12. Instalacja linii głównej PRL w tunelu akceleratora ESS.

W projekcie systemu synchronizacji akceleratora ESS planuję także wykorzystanie mojego doświadczenia zdobytego przy konstruowaniu łączy z aktywną stabilizacją fazy dla akceleratora E-XFEL. Na Rys. 13 pokazany jest uproszczony schemat blokowy łączy znajdującego się pomiędzy źródłem sygnałów referencyjnych, a linią główną PRL (długość około 40 metrów). Ze względu na znaczące dryfty fazy w przewodzie koncentrycznym tego łączy prowadzę projekt systemu z dwiema pętlami fazowymi pracującymi niezależnie na częstotliwościach 352 MHz i 704 MHz, które równolegle kompensują dryfty fazy dwóch sygnałów w tym samym przewodzie koncentrycznym. W jesieni roku 2018 zbudowaliśmy prototyp układu, a wstępne wyniki badań parametrów, uzyskane jeszcze przed optymalizacją, spełniają wymagania projektu ESS.



Rys. 13. Schemat blokowy systemu łączącego źródło sygnału odniesienia z główną linią referencyjną akceleratora ESS.

Należy także nadmienić, że od [stycznia 2019 roku rozpoczęła się budowa Polskiego Lasera na Swobodnych Elektronach](#) w Narodowym Centrum Badań Jądrowych (NCBJ) w Świerku. Jest realizowana w ramach projektu i konsorcjum PolFEL, którego liderem jest NCBJ, a Politechnika Warszawska jest jednym z konsorcjantów. Jestem kierownikiem projektu systemów generatora wzorcowego oraz synchronizacji akceleratora PolFEL.

Rozwijana w ramach moich badań tematyka precyzyjnej synchronizacji fazy dla dużych obiektów staje się coraz ważniejszą tematyką także w dziedzinach spoza obszaru projektów fizyki wielkich energii. Prowadziłem już rozmowy z konstruktorami rozległych anten dla systemów radarowych, w których występują podobne problemy. Ponadto najnowocześniejsze systemy telekomunikacyjne takie jak 5G także wymagają coraz bardziej zaawansowanych metod synchronizacji fazy na dużych odległościach. Dlatego moje obecne i planowane publikacje z pewnością znajdą spore zainteresowanie wśród konstruktorów tego typu systemów.

c.3) Konstruowanie, badania oraz optymalizacja generatorów sygnałów wzorcowych o femtosekundowej stałości fazy.

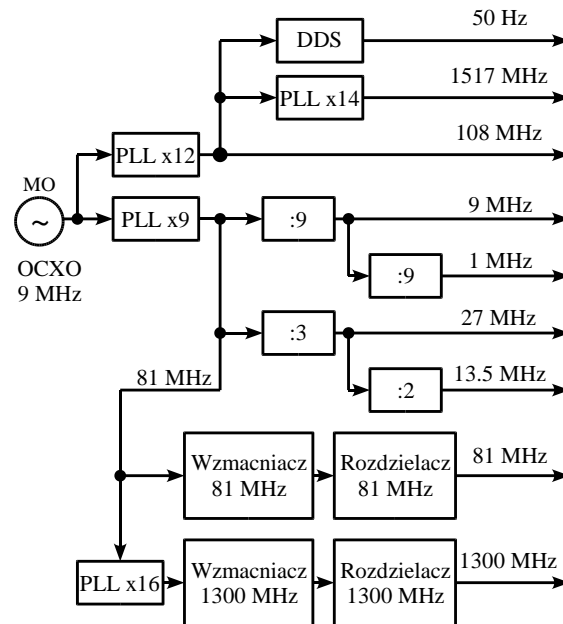
Konstruowanie oraz badania generatorów wzorcowych to tematyka ściśle związana z systemami synchronizacji, jednak na tyle różniącą się problematyką, rozwiązaniami technicznymi oraz metodyką badań, że zdecydowałem się opisać to jako osobną gałąź mojego osiągnięcia. O ile głównym problemem systemów synchronizacji jest rozprowadzenie

sygnałów na znaczne odległości z zachowaniem odpowiednio wysokiej stałości długoterminowej fazy sygnałów względem ich źródła, o tyle budowa generatorów wzorcowych polega na osiągnięciu ultra czystych widmowo sygnałów o bardzo dużej stałości krótkoterminowej fazy, ale także bardzo wysokiej długoterminowej stałości częstotliwości. Generator wzorcowy jest specjalistycznym syntezerem częstotliwości o bardzo niskich poziomach szumów fazowych. O ile problematyka generacji i syntezy częstotliwości jest bardzo dobrze znana i rozwijana od wielu dziesięcioleci, to jednak w większości przypadków głównym celem prac jest osiągnięcie minimalnych możliwych poziomów szumów fazowych w wyspecyfikowanych zakresach częstotliwości lub też odpowiednio krótkich czasów przełączania częstotliwości sygnałów [10]. Znacznie rzadziej (do niedawna praktycznie wcale) zwracano uwagę na błąd fazy, zarówno długo, jak i krótkoterminowy, a także na minimalizację niestałości fazy pomiędzy wyjściami systemu generującego sygnały o różnych częstotliwościach. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą nie istnieją (poza tymi opracowanymi w DESY) publikacje zgłębiające problematykę wytwarzania sygnałów w.cz. o bardzo wysokiej (femtosekundowej) precyzji synchronizacji fazy na różnych częstotliwościach.

Dodatkowo od generatorów wzorcowych dla akceleratorów cząstek elementarnych wymaga się bardzo wysokiej niezawodności (definiowanej przez procentowy poziom dostępności sygnałów o określonym przedziale czasu) oraz możliwości ciągłego i zdalnego diagnozowania stanu pracy w trybie *on-line*. W związku z tym syntezy sygnałów wzorcowych są obudowane dużą liczbą układów i urządzeń diagnostycznych i powinno się je nazywać systemami generatorów wzorcowych.

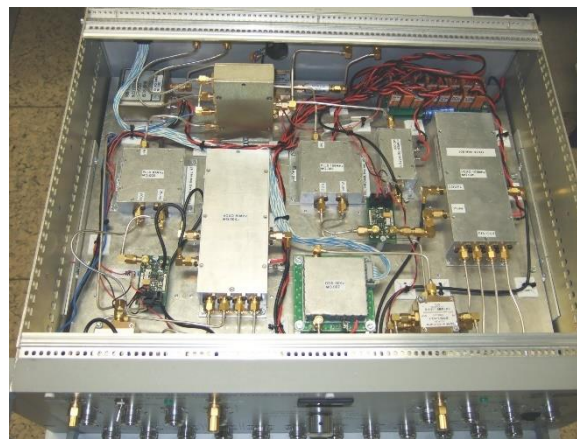
Problematyką budowy systemów generatorów wzorcowych zająłem się pracując nad systemem synchronizacji akceleratora FLASH, który był też polem doświadczalnym dla akceleratora TESLA (potem E-XFEL). Koncepcję i wstępne prace nad budową generatora wzorcowego opisałem w rozprawie doktorskiej [KC15] obronionej w roku 2007. [Byłem kierownikiem projektu budowy tego generatora trwającego do roku 2009, ale jeszcze do roku 2013 prowadziłem badania oraz poprawianie parametrów niektórych podsystemów.](#) Zbudowany system generatora wzorcowego do tej pory pracuje w akceleratorze FLASH w Hamburgu. W roku 2018 zostałem poproszony przez DESY o kierowanie dalszą rozbudową tego systemu, która została wymuszona przez modyfikację akceleratora FLASH. W latach 2019 i 2020 będę prowadził dalsze prace rozwojowe dla tego systemu.

[Moim wkładem do projektu systemu generatora wzorcowego akceleratora FLASH było m.in. opracowanie głównych założeń i architektury systemu, budowa urządzeń oraz przeprowadzenie badań parametrów. Główne założenia i wyniki osiągnięcia opisałem w publikacji \[A8\].](#) Uproszczony schemat blokowy systemu generacji sygnałów wzorcowych pokazany jest na Rys. 14. Wszystkie bloki systemu zostały wyposażone w układy diagnostyczne oraz interfejsy cyfrowe. Ze względu na wymaganą bardzo wysoką czystość widmową sygnałów dołożyłem wszelkich starań do filtracji, ekranowania oraz optymalizacji połączeń w celu minimalizacji zakłóceń występujących w systemie. W efekcie podstawowy system (jeden kanał) generacji sygnałów został zbudowany w pięciu kasetach 19". Dodatkowo cały system był zasilany z podtrzymywanego bateryjnie zasilacza o niskich szumach napięciowych.



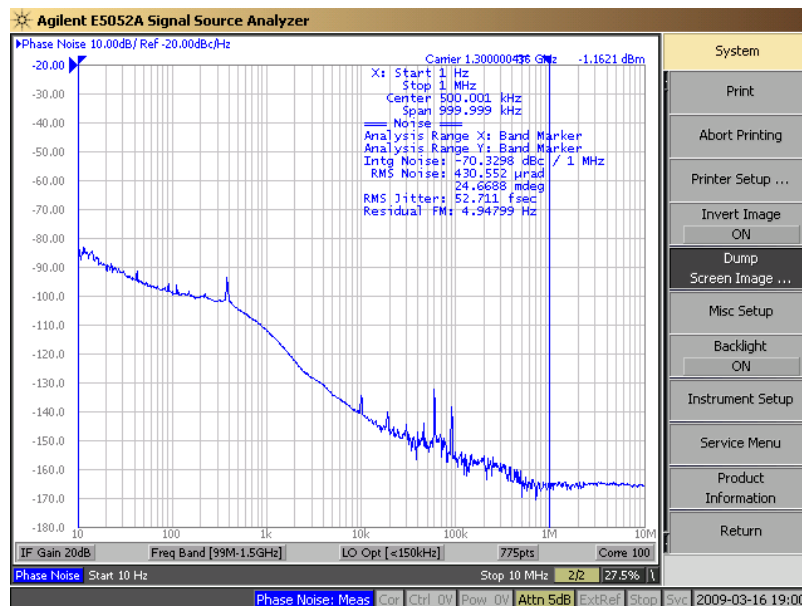
Rys. 14. Uproszczony schemat blokowy systemu generatora wzorcowego akceleratora FLASH.

Opracowałem koncepcję i schematy wszystkich modułów generatora. Projektowałem, badałem i optymalizowałem pętle fazowe oraz inne elementy toru generacji sygnałów. Niejednokrotnie wymagało to bezpośredniej pracy z firmami wykorzystującym najnowsze technologie generacji sygnałów. Dla przykładu zamówiłem oraz badałem stabilizowane generatory kwarcowe o najlepszych parametrach (stałość długoterminowa, szumy fazowe) jakie były dostępne na świecie. Wykonałem projekt mechaniczny wszystkich modułów z uwzględnieniem redukcji zakłóceń oraz optymalizacji pętli masy. Przykładowe zdjęcie jednego ze zbudowanych modułów 19" pokazane jest na Rys. 15.



Rys. 15. Zdjęcie wnętrza jednego z modułów generatora wzorcowego akceleratora FLASH.

W wyniku prac uzyskałem sygnały o unikatowej w tym czasie czystości widmowej. Na Rys. 16 pokazane są wyniki pomiaru szumów fazowych syntezy sygnału o częstotliwości 1300 MHz. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą uzyskany jitter fazy na poziomie 52 femtosekund był najlepszym tego typu wynikiem opublikowanym do roku 2009.



Rys. 16. Szumy fazowe sygnału 1300 MHz uzyskane w generatorze wzorcowym akceleratora FLASH.

Oprócz budowy i optymalizacji niskoszumnych generatorów prowadziłem także badania stałości długoterminowej fazy (dryftów fazy) elementów systemu. Badałem m. in. dzielniki częstotliwości, wzmacniacze mocy, elementy pasywne takie jak dzielniki mocy i sprzęgacze kierunkowe. Zgromadziłem pokaźną bazę danych na temat wrażliwości takich elementów na czynniki środowiskowe. Niestety, ze względu na brak wszystkich niezbędnych danych o budowie wewnętrznej tych podzespołów (tajemnice przemysłowe producentów), nie było możliwe przygotowanie publikacji jednoznacznie pokazującej dryfty fazy wprowadzane przez dany rodzaj podzespołów. Zgromadzone dane były i są wykorzystywane do budowy kolejnych elementów i systemów sterowania oraz synchronizacji.

Warto też zauważyć, że generator wzorcowy akceleratora FLASH był zgodnie z moją najlepszą wiedzą pierwszym tego typu systemem z zaawansowanymi układami diagnostyki on-line. Opracowałem cały system akwizycji danych oraz serwery zbierające informacje o stanie systemu oraz automatycznie wykrywające błędy włącznie z powiadamianiem operatorów akceleratora o awariach. System ten działa do dzisiaj w akceleratorze FLASH w Hamburgu.

Ze względu na wymaganą możliwie krótką przerwę w działaniu zbudowałem system w postaci dwóch równolegle pracujących kopii (kanałów), z czego jedna jest wykorzystywana do synchronizacji akceleratora, a druga jest zapasowa i umożliwia szybkie przełączenie sygnałów w przypadku awarii tej pierwszej kopii.

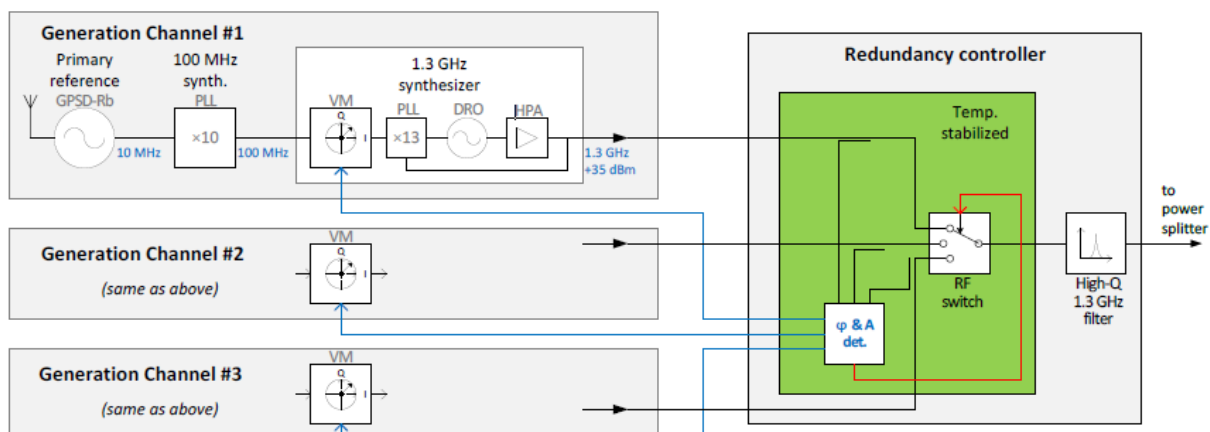
Cały system został zbudowany w postaci 14 kaset 19" oraz panelowego przełącznika i mieści się w trzech szafach rakowych. Zdjęcie systemu pokazane jest na Rys. 17.



Rys. 17. System generatora wzorcowego akceleratora FLASH.

Drugim z budowanych przeze mnie systemów tego typu i zarazem moim ważnym osiągnięciem jest system generatora wzorcowego akceleratora European-XFEL. Od roku 2008 jestem kierownikiem projektu tego systemu. System został zbudowany i uruchomiony w wersji podstawowej w roku 2017. Od tego czasu akcelerator E-XFEL z powodzeniem pracuje z tym systemem. W czasie pisania tego autoreferatu wciąż kieruję projektem ostatniej części (kontrola redundancji) systemu, której uruchomienie w akceleratorze jest planowane wiosną/latem roku 2019.

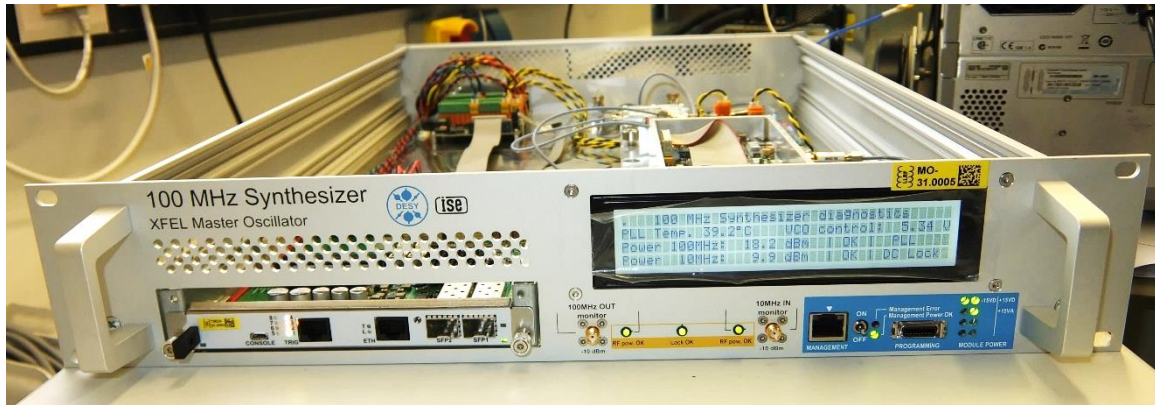
Główne założenia projektu generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL zostały opisane w publikacji [A9]. Uproszczony schemat blokowy systemu pokazano na Rys. 18. System składa się z trzech niezależnych kanałów generacyjnych sygnału 1300 MHz oraz tzw. kontrolera redundancji, który odpowiada za precyzyjną synchronizację fazową sygnałów z poszczególnych kanałów, ciągle monitorowanie oraz przełączanie kanałów do wyjścia systemu w przypadku awarii.



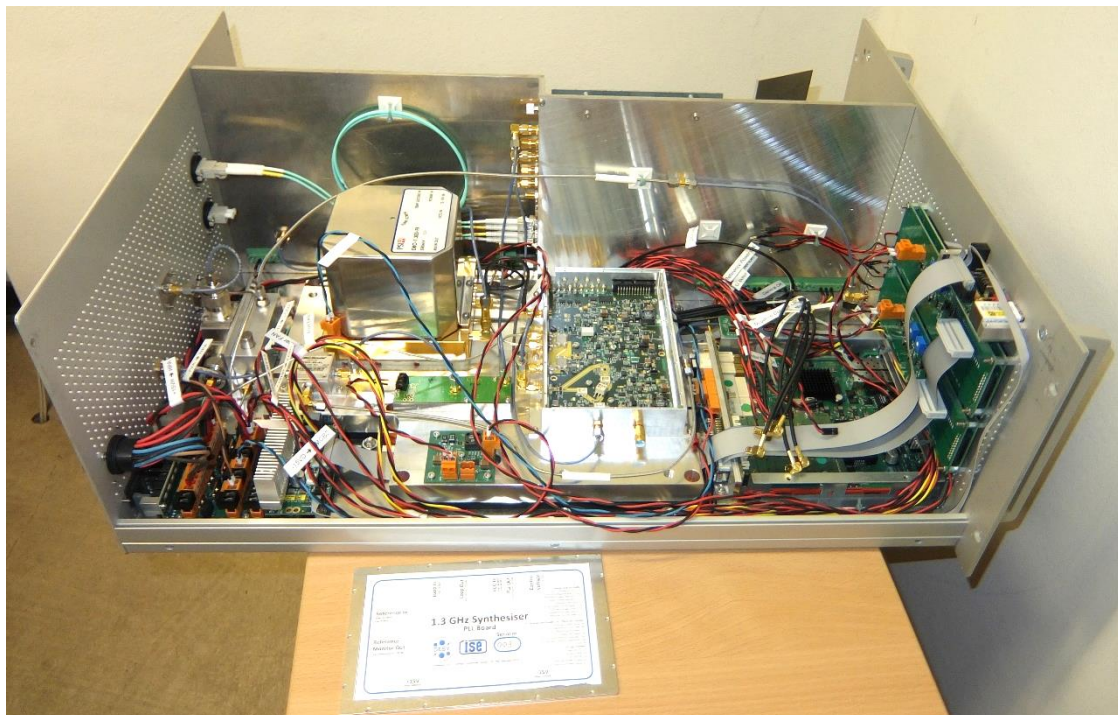
Rys. 18. Schemat blokowy systemu generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL.

Jednym z najtrudniejszych do spełnienia wymagań było zapewnienie ciągłości sygnału 1300 MHz w przypadku awarii. W tym celu przed wyjściem kontrolera redundancji znajduje się filtr o dużej dobroci, który służy jako magazyn energii i może utrzymać sygnał przez około 300 ns ze spadkiem poziomu mocy nie przekraczającym wartości 3 dB. W ciągu tych 300 ns kontroler redundancji musi wykryć awarię i przełączyć sygnał o częstotliwości 1300 MHz i mocy około 20 W. Udało się spełnić te wymagania i zademonstrować działanie urządzenia w praktyce. Ze względu na wymaganą bardzo wysoką niezawodność elementy kontrolera redundancji przechodzą długotrwałe testy i zostaną zainstalowane w akceleratorze wiosną roku 2019.

Konstrukcja pozostałych elementów generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL także była olbrzymim wyzwaniem naukowym i inżynierskim. Przez prawie dziewięć lat pracy wraz z zespołem zbudowałem trzy identyczne tory generacji sygnałów, w skład których wchodziły generatory synchronizowane sygnałami z GPS, syntezy częstotliwości 100 MHz oraz 1300 MHz. Na Rys. 19 i Rys. 20 pokazane są zbudowane syntezy. Trzy kopie tych syntezerów wraz z pozostałymi elementami kanałów generacji zostały w roku 2017 zainstalowane w systemie akceleratora. Jeden z zainstalowanych kanałów pokazano na Rys. 21.



Rys. 19. Syntezator sygnału 100 MHz dla generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL.

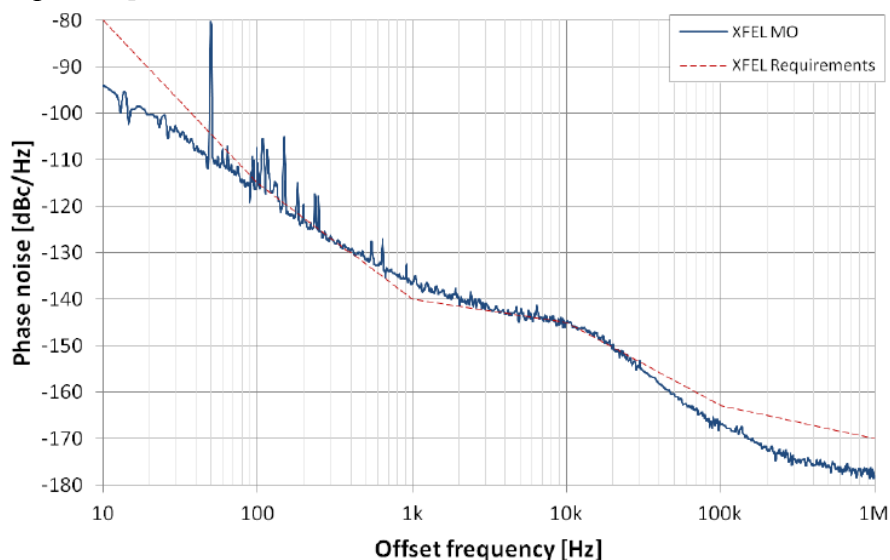


Rys. 20. Konstrukcja wewnętrzna syntezera sygnału 1300 MHz dla generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL.



Rys. 21. Jeden z trzech kanałów systemu generatora wzorcowego zainstalowany w akceleratorze E-XFEL.

Na Rys. 22 pokazane są szumy fazowe sygnału 1300 MHz zmierzone na wyjściu jednego z kanałów generacji po instalacji w akceleratorze. Podobne wyniki uzyskaliśmy z pomiarów na wyjściach pozostałych kanałów generacji. Zmierzone poziomy szumów fazowych oraz jitter fazy o wartości 19,4 fs są, zgodnie z moją najlepszą wiedzą, najlepszymi tego typu parametrami sygnałów uzyskanymi dotychczas na świecie. Konstrukcję i badania głównego syntezyera sygnału 1300 MHz przedstawiłem w publikacji [A10], a wyniki pomiarów sygnału z wyjścia systemu po instalacji w akceleratorze zaprezentowałem na konferencji LLRF Workshop 2017 [KC70].



Rys. 22. Widmo szumów fazowych sygnału 1300 MHz zmierzone na wyjściu kanału generacji zainstalowanego w systemie akceleratora E-XFEL.

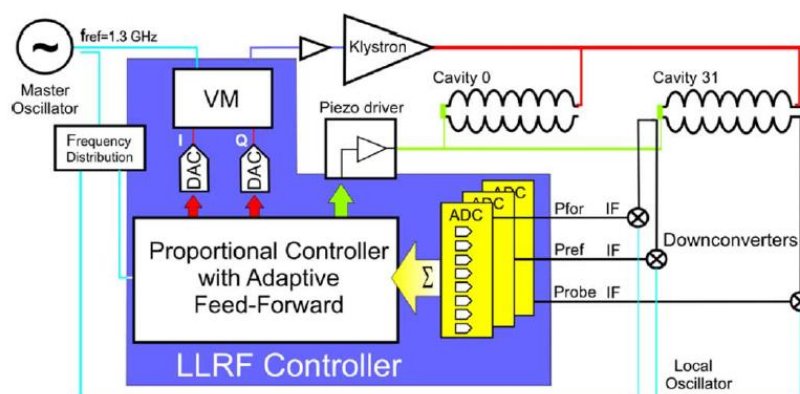
Mój wkład do budowy systemu generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL to przede wszystkim kierowanie projektem, ale też zebranie i analiza wymagań użytkowników, koncepcja trójkanałowego generatora wzorcowego, wiele szczegółów technicznych budowy

toru generacyjnego (np. wybór rozwiązań układów generacyjnych, badania oraz optymalizacja pętli fazowych), recenzja i optymalizacja prac innych członków zespołu projektowego (m.in. systemu diagnostycznego i monitorowania, wzmacniaczy mocy, generatora synchronizowanego z GPS), przygotowanie planów instalacji i okablowania systemu, udział w budowie i uruchamianiu poszczególnych podsystemów, a także instalacja i pomiary parametrów sygnałów w akceleratorze E-XFEL.

c.4) Badania i rozwój zespołów systemów sterowania LLRF dla akceleratorów cząstek elementarnych.

Trzecią część moich osiągnięć naukowych stanowią wyniki prac nad systemami sterowania polem elektromagnetycznym służącym do przyspieszania cząstek elementarnych w akceleratorach. Systemy sterowania polem, zwane w języku angielskim „*Low-Level Radio Frequency Control*”, w skrócie „*LLRF Control*” [11], są obecnie jednymi z najbardziej zaawansowanych technicznie systemów czasu rzeczywistego. Systemy te są rozwijane od kilkudziesięciu lat i muszą spełniać coraz bardziej zaawansowane wymagania współcześnie budowanych akceleratorów cząstek elementarnych. W tym czasie rozwinęła się prężnie działająca naukowo społeczność projektantów i badaczy systemów LLRF. Świadczy o tym znaczna liczba publikacji ukazująca się co roku w czasopiśmie i na konferencjach, a także organizacja dedykowanych konferencji takich jak „IEEE Real Time Conference” (w roku 2018 odbyła się już po raz dwudziesty pierwszy) oraz seria ośmiu spotkań „LLRF Workshop” (<http://llrf.net/>).

Uproszczony schemat blokowy systemu LLRF pokazano na Rys. 23. Głównym celem działania systemu jest sterowanie amplitudą oraz falą pola E-M przyspieszającego cząstki elementarne (np. elektrony lub protony) we wnękach rezonansowych (*cavity*). Sygnały z wnęk rezonansowych są przetwarzane na postać cyfrową, a następnie poddawane zaawansowanym algorytmom cyfrowego przetwarzania sygnałów, po czym przetwarzane są ponownie na postać analogową. Pętla sprzężenia zwrotnego jest zamykana poprzez układ modulatora wektorowego (VM na Rys. 23), który reguluje amplitudę i fazę na wejściu wzmacniacza mocy (np. Klystron) sterującego wnękami rezonansowymi.

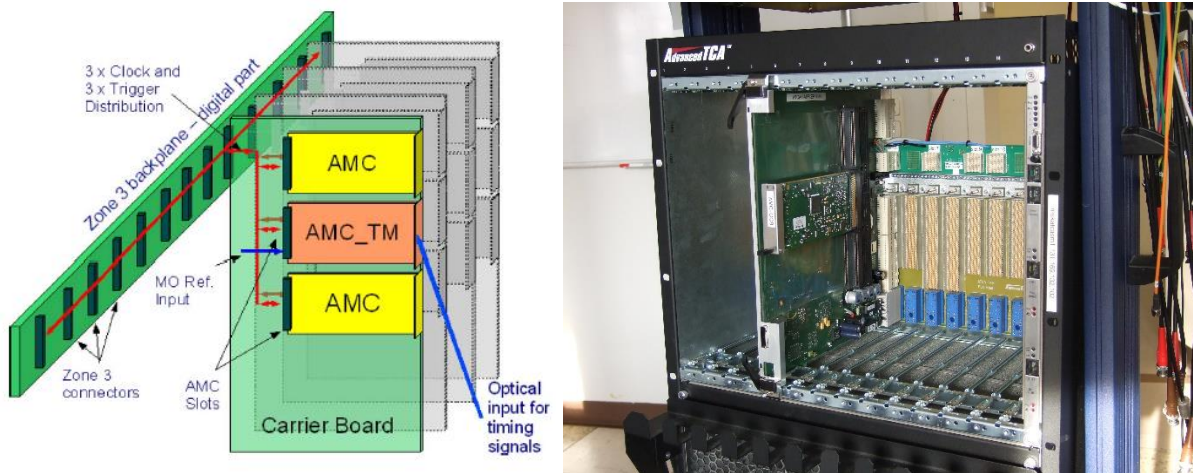


Rys. 23. Uproszczony schemat blokowy systemu sterowania polem przyspieszającym cząstki elementarne w akceleratorze.

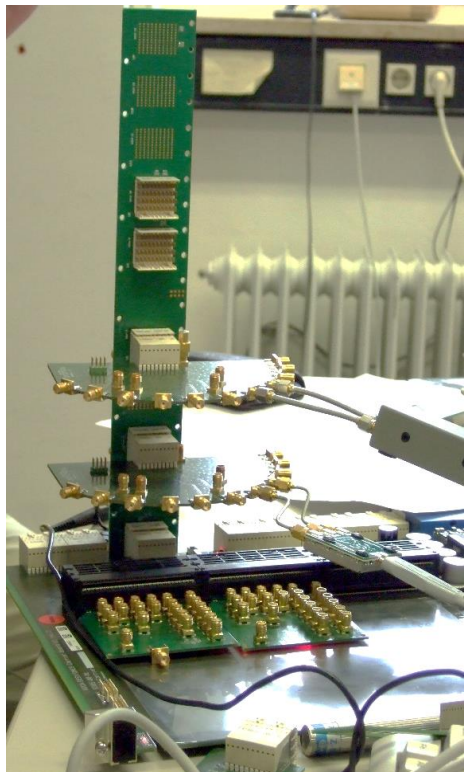
W akceleratorze E-XFEL wymagana jest precyzja regulacji amplitudy ($\Delta A/A$) z dokładnością 10^{-5} oraz fazy z dokładnością rzędu $0,001^\circ$, przy częstotliwości pracy wnęki rezonansowej wynoszącej 1300 MHz, gradientach pola przekraczających wartości 30 MV/m i prędkościach cząstek zbliżonych do prędkości światła w próżni. Dodatkowo kontroler LLRF musi zapewnić te parametry dla 32 wnęk rezonansowych jednocześnie i w czasie

rzeczywistym. To wszystko świadczy o skali wyzwania dla konstruktorów takich systemów, a także o tym, że te systemy wymuszają tworzenie unikatowych rozwiązań często przewyższających o rzędy wielkości precyzję działania komercyjnie dostępnych rozwiązań.

Od roku 2008 brałem udział w pracach nad projektowaniem systemu LLRF dla akceleratora E-XFEL wykonanym w zmodyfikowanej technologii telekomunikacyjnej AdvancedTCA (ATCA, *Advanced Telecommunications Computing Architecture*). W latach 2009-2013 byłem kierownikiem zadania w europejskim projekcie 7 programu ramowego *European Coordination for Accelerator Research and Development* (EuCARD), w ramach którego opracowałem nowatorskie rozwiązania do rozprowadzania sygnałów analogowych w zaawansowanych kasetach telekomunikacyjnych (ATCA). Na Rys. 24 pokazana jest koncepcja oraz realizacja praktyczna rozprowadzania sygnałów synchronizacyjnych w kasecie ATCA, a na Rys. 25 testy płyty zbiorczej „Zone 3 Backplane” przed montażem w kasecie ATCA.



Rys. 24. Koncepcja rozprowadzania sygnałów w.cz. oraz zegarowych w kasecie ATCA (lewa strona) oraz zdjęcie kasety z zaimplementowanym rozwiązaniem w postaci płyty Zone 3 Backplane (prawa strona).



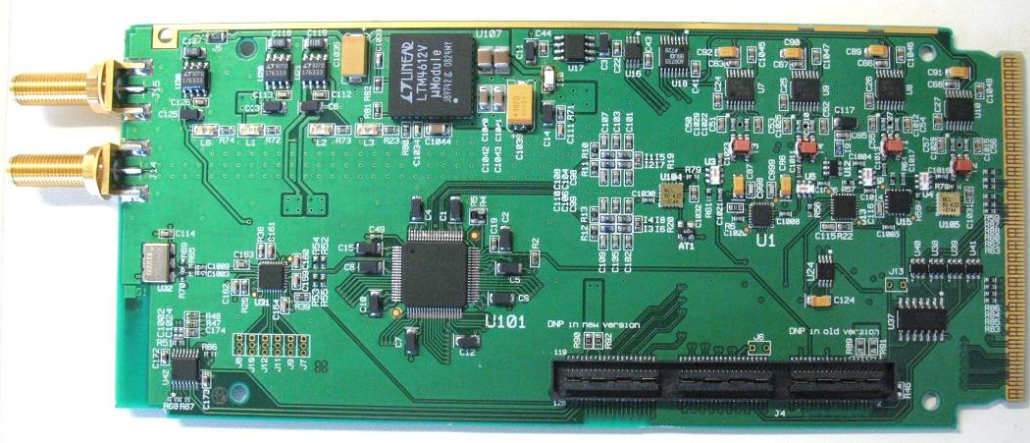
Rys. 25. Testy płyty "ATCA Zone 3 Backplane" przed zamontowaniem w kasecie.

Oprócz ogólnej koncepcji synchronizacji wewnętrznej systemu LLRF zbudowanego w standardzie ATCA zaprojektowałem moduły nadawczo-odbiorcze służące do generacji sygnałów synchronizujących dla systemu (Rys. 26). Szczegóły budowy karty opublikowałem w [KC23].



Rys. 26. Zaprojektowany moduł "AMC Timing Receiver" służący do generacji sygnałów zegarowych dla kaset ATCA.

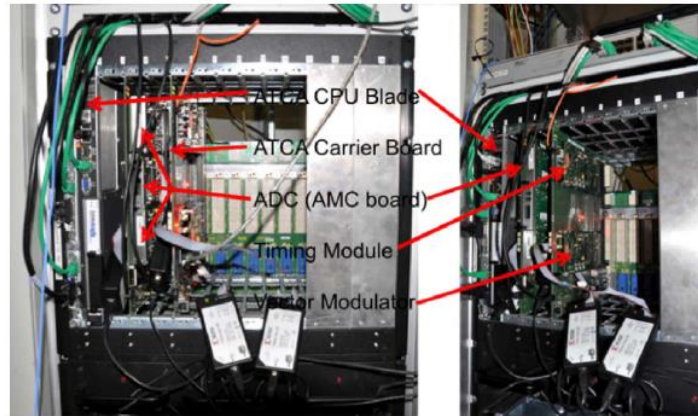
W ramach prac nad systemem ATCA LLRF zaprojektowałem kartę modulatora wektorowego sygnałów (Rys. 27). Szczegóły budowy karty opublikowałem w [KC31].



Rys. 27. Zaprojektowany moduł "AMC Vector Modulator" służący do zmiany parametrów sygnału sterującego nadprzewodzącymi wnękami rezonansowymi akceleratora.

W ramach projektu współfinansowanego TESLA-XFEL, którego byłem kierownikiem po stronie Politechniki Warszawskiej, wziąłem udział w budowie i uruchomieniu prototypowego systemu sterowania LLRF wykonanego w technologii ATCA. Był to pierwszy tego typu system uruchomiony w technologii ATCA i był to przełomowy krok w rozwoju technologii LLRF. Zdjęcie uruchomionego systemu z widocznymi moimi płytami „Zone 3 Backplane”, „AMC Timing” oraz „AMC Vector Modulator” pokazane jest na Rys. 28.

Mój wkład w rozwój systemu był bardzo znaczący, gdyż obejmował niemal cały tor w.cz. i synchronizację tego niezwykle złożonego systemu. Wyniki prac nad systemem LLRF wykonanym na platformie ATCA zostały opublikowane w [A11].

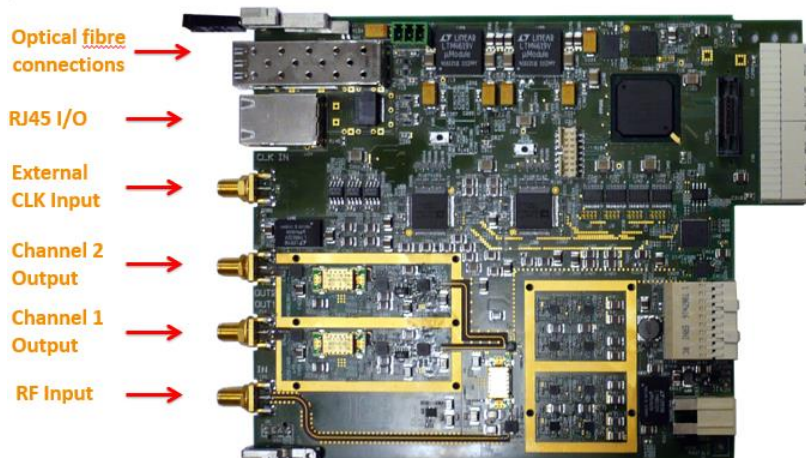


Rys. 28. Zdjęcie prototypowego systemu LLRF zbudowanego na platformie ATCA wraz z moimi rozwiązaniami.

Systemy LLRF bazujące na platformie ATCA są nadal rozwijane i np. w ośrodku Stanford w USA budowany jest system sterowania akceleratora SLAC oparty na tej technologii. Jednak w roku 2011 w DESY podjęto decyzję o zmianie platformy sprzętowej dla systemu LLRF z ATCA na siostrzaną (ale o nieco mniejszej mocy obliczeniowej i zmniejszonych rozmiarach fizycznych) MTCA.4. Powodem było stwierdzenie, że dla akceleratora E-XFEL korzystne będzie wykorzystanie mniejszej (i tańszej) platformy. W związku z tą decyzją urządzenia zaprojektowane w technologii ATCA musiały zostać zaadaptowane do formatu MTCA.4 i dalej rozwijane w tej technologii.

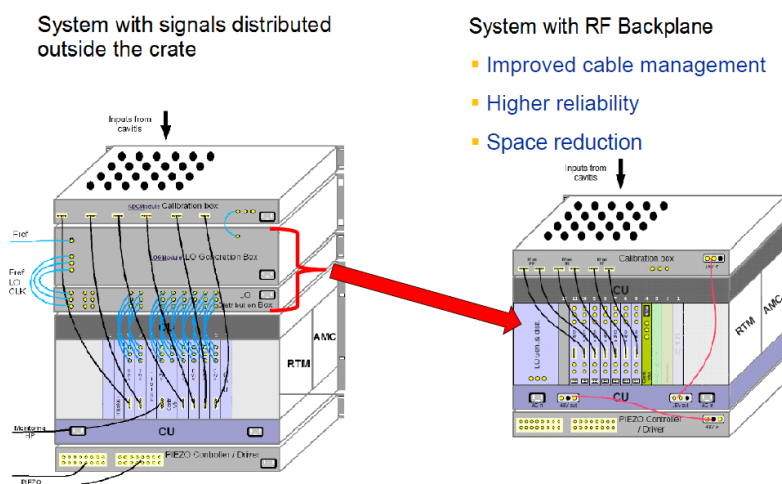
W latach 2011 – 2016 brałem intensywny udział w budowie modułów precyzyjnej przemiany częstotliwości, modulatorów wektorowych, układów generacji ultra-precyzyjnych sygnałów heterodyny i zegarowych, a także integracji całego systemu LLRF w nowej platformie.

Jednym z moich ważniejszych osiągnięć w tej dziedzinie jest opracowanie karty modulatora wektorowego w formacie RTM (*Rear Transition Module*) standardu MTCA.4 (Rys. 29). Była to pierwsza na świecie karta modulatora wektorowego zbudowana w tym standardzie. Do chwili obecnej wyprodukowano kilkaset egzemplarzy tej karty w kilku wersjach i są one używane w wielu akceleratorach na całym świecie, takich jak FLASH i E-XFEL w Hamburgu oraz European Spallation Source w Szwecji. Osiągnięcie to zostało opisane w publikacjach [A12] i [A13]. Moim wkładem do osiągnięcia jest opracowanie koncepcji budowy części analogowej i w.c., weryfikacja i optymalizacja projektu obwodów drukowanych włącznie z integralnością sygnałową połączeń, a także przeprowadzenie pomiarów i interpretacja wyników.



Rys. 29. Zdjęcie modulatora wektorowego zaprojektowanego w standardzie RTM MTCA.4.

Poza projektowaniem modulatora wektorowego znacząco przyczyniłem się do rozszerzenia możliwości standardu MTCA.4. Jestem pomysłodawcą i głównym wykonawcą projektu integracji dodatkowej płyty zbiorczej (tzw. *backplane*) o nazwie *RTM Backplane*, która umożliwia rozprowadzanie sygnałów analogowych oraz znaczne rozszerzenie możliwości standardu MTCA.4. Rozwiązanie polega na integracji zaawansowanej płyty zbiorczej w kasecie MTCA.4 równoległe do standardowej „cyfrowej” płyty zbiorczej (*AMC Backplane*). Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania możliwe było wykorzystanie wolnych przestrzeni w kasecie standardu, umożliwienie integracji urządzeń, które wcześniej musiały być montowane na zewnątrz kasety (np. generatory sygnałów heterodyny), eliminacja wielu zewnętrznych połączeń kablowych w.c.z. (eliminacja błędów ludzkich przy łączeniu), zmniejszenie podatności systemu na zakłócenia elektromagnetyczne, zwiększenie liczby modułów, które można zainstalować w kasecie, a także bardziej kompaktowy i efektywny cenowo system. Na Rys. 30 pokazano przykład porównania konstrukcji systemu LLRF wykonanego na bazie standardu MTCA.4 bez płyty oraz z płytą *RTM Backplane*. Korzyści z zastosowania mojego rozwiązania są widoczne bardzo wyraźnie i zaowocowały przyjęciem rozwiązania przez społeczność konstruktorów systemów LLRF.



Rys. 30. Porównanie konstrukcji systemu LLRF bez (po lewej) oraz z zastosowaniem płyty zbiorczej *RTM Backplane* (po prawej stronie).

Rozwiązanie okazało się na tyle nowatorskie, że wspólnie z pracownikami ośrodka DESY opatentowaliśmy je w Europie (nr patentu EP 2672793 B1) [A16] oraz w USA (nr patentu US9374915 B2) [A17]. Niestety, ze względu na wysokie koszty takich patentów oraz trudności ich sfinansowania przez Politechnikę Warszawską, pomimo mojego zdecydowanie większościowego udziału merytorycznego w wynalazku, ośrodek DESY sfinansował 70% kosztów zgłoszenia patentowego i ostatecznie przypało mi 30% wkładu w to osiągnięcie.

W ramach prac nad rozwiązaniem *RTM Backplane* opracowałem kilka wersji płyty. Bardzo intensywnie współpracowałem z firmami produkującymi kasety MTCA.4 w celu wypracowania rozwiązania gotowego do produkcji przemysłowej. Uzyskałem prototypowe wersje kasety oraz opracowałem szereg rozwiązań niezbędnych do testowania jakości sygnałów w.c.z. rozprowadzanych wewnątrz kasety. Wykonałem także szereg badań, poczynając od funkcjonalnych, a kończąc na pomiarach szumów fazowych sygnałów w.c.z., w kasecie wypełnionej elektroniką cyfrową. Na Rys. 31 pokazana jest pierwsza wersja kasety MTCA.4 z moim rozwiązaniem. Rezultaty pierwszych badań przeprowadzonych w latach 2011-2012 zostały opublikowane w [A14].



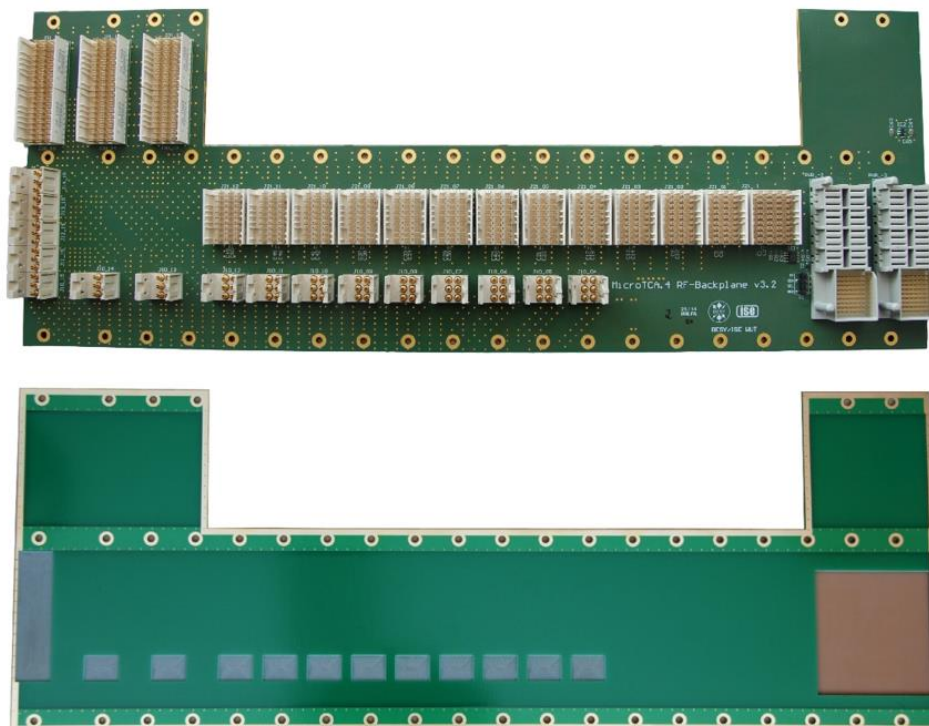
Rys. 31. Zdjęcie pierwszej wersji płyty RTM Backplane zamontowanej w kasecie MTCA.4.

Publikacje i prezentacje na konferencjach spotkały się z bardzo dużym zainteresowaniem środowiska LLRF. W związku z tym kontynuowałem działania nad rozwojem standardu. Zaproponowałem płyty typu eRTM (enhanced RTM), które umożliwiły integrację układów i podzespołów o znacznie większych gabarytach niż dozwolone wcześniej w standardzie MTCA.4 i po raz kolejny zwiększały możliwości tego standardu. Na Rys. 32 znajduje się zdjęcie pierwszej na świecie płyty typu eRTM, która służyła do testowania dystrybucji precyzyjnych sygnałów zegarowych i w.cz. przez płytę RTM Backplane. Moim wkładem w to osiągnięcie jest główna koncepcja oraz optymalizacja i testowanie projektu tej płyty.

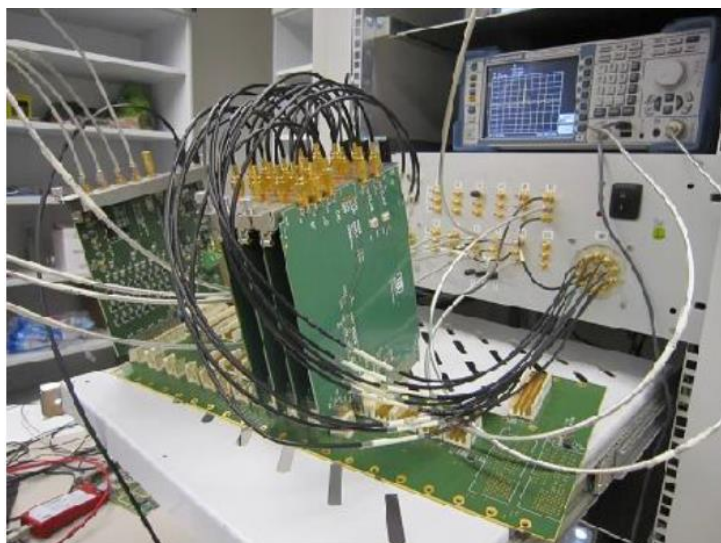


Rys. 32. Pierwsza płyta typu eRTM. Układ do testowania transmisji sygnałów zegarowych oraz w.cz. przez płytę RTM Backplane.

W latach 2012-2014 opracowałem ostateczną, produkcyjną wersję płyty RTM Backplane (Rys. 33). Brałem także udział w przygotowaniu rozwiązań do automatycznego testowania wyprodukowanych płyt po produkcji seryjnej pokazanej na Rys. 34. Ostatecznie rozwiązanie RTM Backplane zostało zaakceptowane przez środowisko i jest wykorzystywane m.in. w akceleratorach E-XFEL w DESY, w ośrodku CERN w Szwajcarii oraz w KEK w Japonii. Zgodnie z moją obecną wiedzą kilka innych ośrodków rozważa wykorzystanie tego rozwiązania, a także pojawiają się jego modyfikacje (np. w zmniejszonych i uproszczonych kasetach MTCA.4).



Rys. 33. Wersja produkcyjna płyty RTM Backplane (u góry) wraz z płytą ekranującą (u dołu).



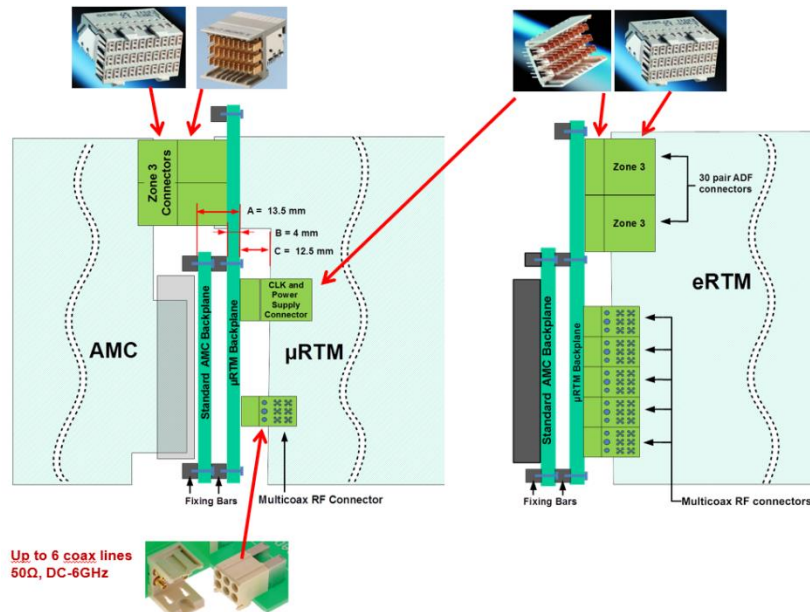
Rys. 34. Stanowisko do automatycznego testowania płyt RTM Backplane.

Rozwiązanie okazało się unikatowe i bardzo interesujące dla szerokiej społeczności, dlatego zostałem członkiem międzynarodowej organizacji PCI Industrial Computer Manufacturers Group (PICMG, <https://www.picmg.org/>), która znana jest m.in. z tego, że opracowała standardy takie jak PCI Express, ale także standardy telekomunikacyjne AdvancedTCA, MicroTCA i AMC. W latach 2014 - 2016 czynnie uczestniczyłem w pracach grupy roboczej: Physics Hardware Architectures, która prowadzi prace rozwojowe nad nowymi standardami na potrzeby eksperymentów fizyki wysokich energii.

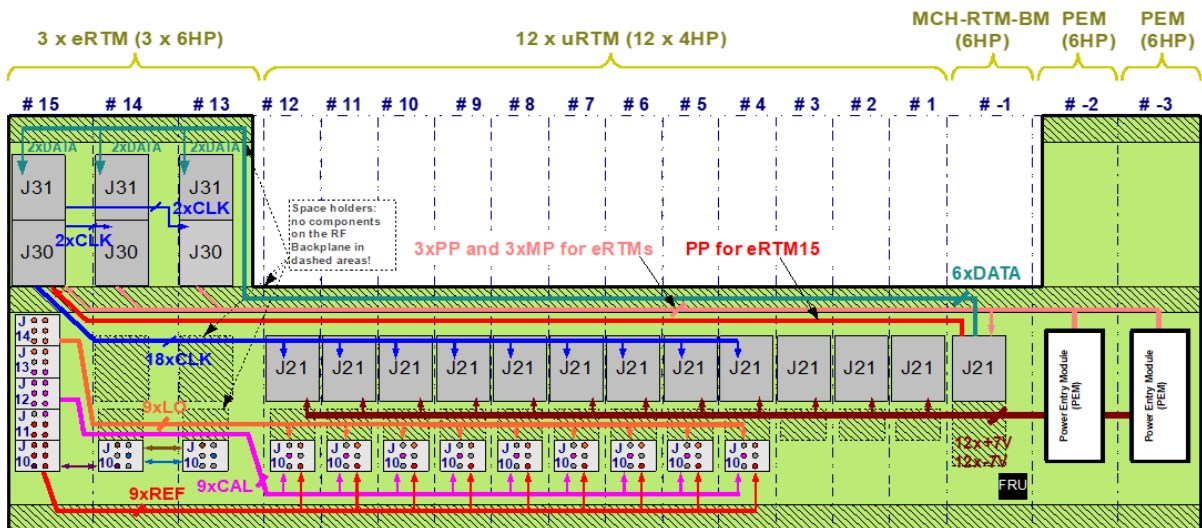
Niestety ze względu na koszty członkostwa w tej organizacji uczestniczyłem w niej z ramienia DESY, a nie Politechniki Warszawskiej. Zgodnie z polityką PICMG w opublikowanych standardach nie umieszcza się nazwisk ich twórców, a jedynie nazwy instytucji i firm, które delegowały pracowników do tych przygotowania standardów. Jeśli zaistnieje taka potrzeba, możliwe jest uzyskanie potwierdzenia mojego udziału w pracach komisji PICMG. Można też znaleźć moje nazwisko na listach osób uczestniczących w

tworzeniu standardu, prezentowanych na konferencjach międzynarodowych. Przykładowo na stronie 34 prezentacji kierownika grupy roboczej PICMG [12] Skrótowe informacje o moim wkładzie do standardu pokazane są na stronach 16-19 tej prezentacji.

W ramach cotygodniowych spotkań komisji przedstawiłem inżynierom z firm z Azji, Europy i USA szczegóły mojego rozwiązania, a także zbierałem uwagi i optymalizowałem je na potrzeby standardu. W tym czasie wykonałem kilkadziesiąt rysunków, które umieszczono w opublikowanym dokumencie. Przykłady pokazałem na Rys. 35 i Rys. 36. Wynikiem prac komisji jest wprowadzenie mojego rozwiązania RTM Backplane do aktualizacji standardu opublikowanej w dokumencie PICMG „Enhancements for MTCA.4” [1]. To jeszcze bardziej ugruntowało moje osiągnięcie w środowisku eksperymentów fizyki wielkich energii.



Rys. 35. Schemat integracji mechanicznej złączy płyty RTM Backplane opracowany na potrzeby standardu PICMG [1].



Rys. 36. Konceptyjny schemat połączeń płyty RTM Backplane opracowany na potrzeby standardu PICMG [1].

Poza rozwojem elementów standardu MTCA.4 mam także znaczący udział w rozwój i badania samych systemów sterowania LLRF akceleratorów. W ramach współpracy z ośrodkiem DESY opracowałem kilkadziesiąt układów będących na styku techniki cyfrowej i analogowej, a także rozwiązania elektroniki w.cz. będące elementami systemów LLRF. Przykładem może być mój udział w projekcie stanowiska do testowania struktur rezonatorów

typu TESLA, które opisano w publikacji [KC19] lub też projektowanie i optymalizacja karty przetworników służącej do bezpośredniego próbkowania sygnałów o częstotliwościach do 1,3 GHz, opisane w publikacjach [KC24] i [KC59].

Duży wkład miałem także do rozwoju generatorów sygnałów heterodyny dla systemów LLRF opisany m.in. w publikacji [KC30]. Wielokrotnie brałem także udział w przygotowaniu, instalacjach, uruchamianiu i badaniach całych systemów LLRF akceleratorów FLASH i E-XFEL. Przykładem mogą być opisy zawarte w publikacjach [KC38] [KC42] [KC44] [KC50] i [KC68]. Ze względu na olbrzymią złożoność systemów i całościowy nakład pracy, a także na bardzo liczną grupę autorów danego osiągnięcia, w ośrodku DESY przyjęto, że wyniki prac nad systemami LLRF będą publikowane w postaci dość częstych (2 w roku) komunikatów konferencyjnych. Z tego powodu zdecydowałem się nie wykazywać tego jako integralnej części mojego osiągnięcia.

Wyjątkiem są prace nad nowatorskim rozwiązaniem systemu LLRF pracującego w trybie ciągłym (w przeciwieństwie do typowych, impulsowych trybów pracy), które prowadziłem w niewielkim zespole naukowców. Wyniki prac zostały opisane w publikacji [A15]. **Moim wkładem w to osiągnięcie jest przygotowanie części w.cz. systemu do badań, opracowanie rozwiązań do generacji sygnałów odniesienia, a także badania szumów fazowych sygnałów w systemie.** Prace przygotowawcze do tego osiągnięcia były opisane w publikacjach [KC41] i [KC46].

C5. Podsumowanie i uwagi do osiągnięcia naukowego

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że wymienione trzy aspekty badawcze moich prac składające się na osiągnięcie naukowe, tj.: badania i projektowanie systemów synchronizacji femtosekundowej urządzeń w.cz. (wraz z badaniami i minimalizacją dryftów fazy), konstruowanie, badania oraz optymalizacja generatorów sygnałów wzorcowych o femtosekundowej stałości fazy oraz badania i rozwój podzespołów systemów sterowania LLRF dla akceleratorów cząstek elementarnych, są wynikiem mojej konsekwentnej i długotrwałej pracy. Ze względu na stopień złożoności oraz zakres problematyki badawczej i inżynierskiej tych projektów ich samodzielne wykonanie nie jest możliwe i wymaga dużej sprawności w łączeniu badań z zaawansowanymi pracami konstrukcyjnymi. Realizacja takich projektów wymaga także umiejętnego zarządzania zespołem badawczym. Bardzo pomogły mi w tym podyplomowe studia z zarządzania projektami, które ukończyłem w Szkole Głównej Handlowej w roku 2010.

Zespołowy charakter moich badań i projektów praktycznie wyklucza publikacje autorskie lub o niewielkiej liczbie współautorów. W dodatku przez około 10 lat pracowałem nad akceleratorem E-XFEL, którego budowa przechodziła kilka etapów zmian i wymagała od projektantów bardzo wytężonej pracy, żeby zdążyć na czas z konstrukcją systemów. Pisanie publikacji w tym czasie było bardzo utrudnione i dopiero po roku 2017 miałem możliwość podsumowania wyników prac i przygotowania publikacji. Tylko w roku 2018 zgłosiłem pięć artykułów do wysoko punktowanego czasopisma i czekam na ich recenzje.

Podsumowując w skrócie, najważniejsze składniki mojego osiągnięcia to:

- rozwój metodyki projektowania systemów synchronizacji femtosekundowej liniowych akceleratorów cząstek elementarnych [A1];
- budowa systemu synchronizacji akceleratora FLASH (kierowałem projektem w latach 2004-2009), który do dzisiaj działa w akceleratorze w Hamburgu;
- budowa systemu synchronizacji akceleratora E-XFEL [A2], [A3] o dokładności synchronizacji osiągającej 10 femtosekund; najważniejsze fakty dotyczące tego projektu są następujące:
 - kierowałem projektem w latach 2008-2017;

- budżet projektu to 1,5 mln EUR;
- mój zespół projektowy liczył od 6 do 12 osób w zależności od etapu projektu;
- opracowałem tematykę i byłem promotorem szesnastu prac dyplomowych (8 magisterskich i 4 inżynierskich);
- cztery spośród nich zostały nagrodzone na konkursach IEEE, a dwie uzyskały oceny celujące;
- zaproponowałem tematykę i aktywnie wspomagałem przygotowanie trzech rozpraw doktorskich: jedna została obroniona w roku 2016 [8], dwie są planowane na rok 2019¹;
- opracowałem koncepcję łącza interferometrycznego umożliwiającego aktywną redukcję dryftów fazy sygnałów 1,3 GHz do poziomu 100 fs w systemie o długości około 2 km;
- opracowanie metodyki oraz wykonanie precyzyjnych pomiarów dryftów fazy (opóźnienia grupowego) przewodów koncentrycznych [A4] i innych elementów toru w.cz.;
- opracowanie metodyki oraz zbudowanie pierwszych układów do aktywnej kompensacji własnych dryftów fazy z dokładnością na poziomie dziesiątek femtosekund: wzmacniacz w.cz. [A5] oraz detektor fazy o pełnym zakresie pomiaru 2π [A6];
- budowa systemu synchronizacji akceleratora European Spallation Source (projekt PRL) [A7]; najważniejsze fakty dotyczące tego projektu są następujące:
 - kieruję projektem od roku 2016;
 - planowane zakończenie w roku 2020;
 - budżet projektu wynosi 1,2 mln EUR;
 - zespół projektowy stanowi 12 osób (naukowcy i inżynierowie) + 4 studentów (prace dyplomowe, stan na grudzień 2018);
 - unikatowe rozwiązania techniczne – np. w pełni pasywna linia w.cz. z elementów odpornych na radiację, stabilizacja temperatury 600-metrowej linii z dokładnością do 0,1 °C;
- budowa systemu generatora wzorcowego akceleratora FLASH w Hamburgu [A8]; najważniejsze fakty dotyczące tego projektu są następujące:
 - kierowałem projektem w latach 2004-2011, ale jeszcze do 2013 roku brałem udział w badaniach i optymalizacji parametrów tego systemu;
 - jest to pierwszy tak złożony i precyzyjny (jitter fazy na poziomie 50 femtosekund) generator wzorcowy dla akceleratora;
 - w ramach tego projektu opracowałem tematykę oraz wypromowałem 9 prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich;
- budowa systemu generatora wzorcowego akceleratora E-XFEL w Hamburgu [A9], [A10]; najważniejsze fakty dotyczące tego projektu są następujące:
 - kierowałem projektem w latach 2008-2017 (uruchomienie kanałów generacyjnych), ale jeszcze w 2019 roku planuję instalację modułu kontroli redundancji;
 - jest to pierwszy tak złożony i precyzyjny (jitter fazy na poziomie 10 femtosekund) generator wzorcowy dla akceleratora z systemem automatycznej redundancji;

¹ Rozprawy w przygotowaniu:

- Ewa Janas, "Femtosecond-level Laser Synchronization Based on RF Down-conversion and Balanced Detectors"
- Dominik Sikora, "Elektroniczny system dystrybucji sygnałów odniesienia w.cz. o dużej stałości fazy dla akceleratorów cząstek elementarnych"

- budżet projektu wynosi 1 mln EUR;
- w ramach tego projektu opracowałem tematykę oraz wypromowałem 9 prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich;
- rozwój analogowych podsystemów w.cz i implementacja precyzyjnej synchronizacji w systemie LLRF opartym na platformie ATCA. Wkład do pierwszej na świecie demonstracji i badań parametrów systemu LLRF na tej platformie [A11];
- rozwój analogowych podsystemów w.cz i implementacja precyzyjnej synchronizacji w systemie LLRF opartym na platformie MTCA.4. Budowa pierwszych kart modulatorów wektorowych w tej technologii [A12], [A13];
- opracowanie i realizacja koncepcji płyty zbiorczej RTM Backplane dla standardu MTCA.4 [A14]; rozwiązanie opatentowane w Europie [A16] i USA [A17], przyjęte w standardzie PICMG i wykorzystywane w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie;
- wkład w rozwój elementów systemów sterowania LLRF takich jak układy przemiany częstotliwości czy precyzyjne generatory sygnałów heterodyny;
- wkład do rozwoju systemów sterowania LLRF pracujących z falą ciągłą [A15];
- uzgodnienie merytoryczne zakresu, opracowanie znacznej części rozwiązań w.cz. oraz kierowanie projektami w ramach polskiego wkładu do systemu sterowania LLRF dla Europejskiego Źródła Neutronów (ESS ERIC). Projekt rozpoczął się w roku 2016. Zakończenie jest planowane na rok 2021. Łączny budżet projektu wynosi około 4,9 miliona Euro (~23,3 mln. zł), a udział Politechniki Warszawskiej w tym projekcie wynosi ~8,1 mln. zł.
- kierowanie budową systemów generatora wzorcowego i synchronizacji polskiego akceleratora POLFEL, którego budowa rozpoczęła się w styczniu 2019 roku.

Wyliczone powyżej składniki mojego osiągnięcia wypracowałem przez ponad 10 lat prowadzenia intensywnej współpracy z wiodącymi w świecie zagranicznymi ośrodkami badawczymi, kierowania niejednokrotnie trzema lub czterema projektami lub grantami jednocześnie, aktywnie szkoląc polskich studentów i doktorantów przy tak zaawansowanych projektach. W tym czasie wypromowałem łącznie 47 prac inżynierskich i magisterskich, jestem promotorem pomocniczym trzech prac doktorskich, a także nieoficjalnie wspomagałem opracowanie tematyki i przygotowanie sześciu innych prac doktorskich. Dwanaścioro spośród wypromowanych przeze mnie absolwentów kontynuowało lub kontynuuje prace badawcze realizując doktoraty. Dwóch moich byłych studentów obroniło doktoraty przed rokiem 2018, a troje planuje ukończenie prac w roku 2019.

W czasie realizacji mojego osiągnięcia dysponowałem znacznymi budżetami w realizowanych przeze mnie projektach po stronie niemieckiej, ale też aktywnie pozyskiwałem prace umowne i granty dla Politechniki Warszawskiej. W czasie od doktoratu do przygotowania tego wniosku byłem kierownikiem łącznie 28 projektów współfinansowanych, niewspółfinansowanych oraz umownych o łącznej wartości około 44 milionów zł, z czego około 28 milionów zł stanowią środki przyznane Politechnice Warszawskiej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Oprócz publikacji opisanych w cyklu głównego osiągnięcia wynikiem mojej działalności naukowej było ponad osiemdziesiąt publikacji opublikowanych w większości na międzynarodowych konferencjach. Lista publikacji znajduje się w tekście poniżej i jest ponumerowana w formacie [KCnn].

Znaczącą część mojego dorobku naukowego stanowią badania nad rozwojem niskoszumnych generatorów oraz syntezerów sygnałów mikrofalowych. W roku 2001, w ramach programu Socrates-Erasmus odbyłem jeden semestr studiów na Uniwersytecie Technicznym w Kassel w Niemczech. W trakcie pobytu zaprojektowałem oscylator pracujący na częstotliwości 22 GHz o unikatowej strukturze. Ze względu na dobre parametry sygnału rezultaty pracy zostały opublikowane w pracy [KC1]. Opracowałem też szerokopasmowy syntezer sygnałów pracujący w zakresie częstotliwości od 2 do 18 GHz, który był przedmiotem dwóch publikacji [KC2] [KC4]. W znacznej liczbie publikacji wraz ze współautorami opisywałem kolejne wyniki projektowania oraz badań podsystemów generatorów wzorcowych, które są przedmiotem mojego osiągnięcia naukowego. Publikacje dotyczą koncepcji i konstrukcji systemów generacyjnych [KC13] [KC30], [KC64], [KC70], [KC71] [KC74] [KC81], parametrów sygnałów wytwarzanych przez podzespoły generatorów [KC14] [KC75], [KC80] oraz systemów pomocniczych, takich jak np. system monitorowania parametrów generatora wzorcowego akceleratora FLASH [KC16].

Istotnym osiągnięciem jest nowa metoda projektowania niskoszumnych generatorów stabilizowanych rezonatorem dielektrycznym opisana w publikacji [KC22], która wzbudziła szerokie zainteresowanie na konferencji MIKON 2010 oraz była przedmiotem kilku zapytań od firm produkujących generatory. Metoda została opracowana przez mojego byłego dyplomanta Jana Piekarskiego w ramach jego pracy magisterskiej, a mój wkład w jej powstanie polegał na zaproponowaniu tematu, nadzorowaniu prowadzenia badań oraz częstym recenzowaniu i poprawianiu przebiegu prac.

Kolejną grupę moich osiągnięć udokumentowanych w publikacjach stanowią badania oraz konstrukcje systemów synchronizacji. Prowadziłem badania podzespołów i łączy światłowodowych do przesyłania niskoszumnych sygnałów w.cz. z małymi błędami fazy. Po raz pierwszy na świecie zademonstrowałem dystrybucję sygnałów o częstotliwościach powyżej 1 GHz na odległości rzędu 5 km z błędami fazy w dziedzinie czasu (mówiąc precyzyjnie: opóźnienia grupowego) mniejszymi niż 100 fs [KC6], [KC7] [KC8] [KC11] [KC15]. Prowadziłem badania i rozwój metodyki projektowania systemów synchronizacji piko i femtosekundowej zarówno metodami tradycyjnymi, jak i optycznym [KC3], [KC52], [KC78], spośród których na uwagę zasługuje metoda projektowania opisana w doktoracie [KC15].

Brałem też udział w konstruowaniu i uruchamianiu podzespołów oraz systemów sterowania polem elektromagnetycznym służącym do przyspieszania cząsteczek w akceleratorach cząstek elementarnych. W ramach moich prac tematykę projektowania modułów pełniących takie funkcje jak: przemiana częstotliwości oraz precyzyjna modulacja sygnałów w.cz. [KC31] [KC36] [KC58] [KC71] [KC77]. Badałem i rozwijałem problematykę modułów realizujących przetwarzanie analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe, w tym bezpośrednie przetwarzanie sygnałów o częstotliwościach przekraczających 1 GHz [KC24] [KC59] [KC63]. Do moich osiągnięć należy także zaliczyć prace ogólne nad rozwojem i badaniami całych systemów LLRF włącznie z opracowywaniem kompletnych kontrolerów pola dla akceleratorów [KC10] [KC12] [KC17] [KC18] [KC19] [KC20] [KC25] [KC35] [KC38] [KC40] [KC42] [KC44] [KC47] [KC49] [KC50] [KC51] [KC56] [KC60] [KC61] [KC67] [KC68] [KC76] [KC83].

Jako część osiągnięcia naukowego opisałem badania nad systemami LLRF sterującymi pracą akceleratorów w trybie z falą ciągłą. Ten tryb pracy wciąż jest traktowany jako technologia przyszłości w akceleratorach. Dotychczas podjęto stosunkowo nieliczne próby uruchomienia takich systemów. Poza głównym osiągnięciem uczestniczyłem też w pracach pomocniczych przy rozwoju tego typu systemów. Wyniki m.in. moich badań zostały przedstawione w publikacjach [KC39] [KC41] [KC46] [KC55].

Dużą część mojej aktywności poświęciłem badaniom i rozwojowi technik rozprowadzania w systemach analogowo-cyfrowych niskoszumnych sygnałów analogowych

oraz sygnałów zegarowych o bardzo małych wartościach jitteru. Najważniejsze osiągnięcia to konstrukcje kart syntezerów sygnałów zegarowych [KC23] [KC26], badania parametrów sygnałów w. cz. w kasetach ATCA [KC27] oraz w kasetach MTCA.4 [KC43], a także konstrukcja części analogowej symulatora rezonatorów nadprzewodzących [KC72] [KC79].

Prowadziłem także badania elementów torów przesyłowych sygnałów w.cz. z błędami fazy w zakresie femtosekundowym. Moje publikacje [KC21] [KC66] były jednymi z pierwszych na świecie artykułów poruszających tę tematykę.

Od stycznia roku 2019 jestem kierownikiem budowy systemów generatora wzorcowego oraz synchronizacji w projekcie Polskiego Lasera na Swobodnych Elektronach, który bazuje na akceleratorze cząstek elementarnych i jest budowany w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku pod Warszawą.

5.1 Publikacje przed uzyskaniem stopnia doktora

- [KC1] „K-band Phase Locked Hair-pin Oscillator”, Y. Cheng; **K. Czuba**; G. Kompa, ISCAS 2002 Conf., Scottsdale, Arizona, USA, Proc. pp. IV-381- IV-384 vol.4.
- [KC2] „Multiple Feedback YIG PLL Synthesizer”, K. Antoszkiewicz, **K. Czuba**, W. Wiatr, Microcoll 2003 Conf., Budapest, Hungary, 2003, pp. 273-276.
- [KC3] „Design Considerations for the RF Phase Reference Distribution System for X-ray FEL and TESLA”, **K. Czuba**, H. C. Weddig, IEEE-SPIE WILGA 2003, Proc SPIE vol.5484, pp 148-152.
- [KC4] „A Wide-band Double PLL Frequency Synthesizer”, K. Antoszkiewicz, **K. Czuba**, W. Wiatr, konferencja MIKON 2004, Warszawa, Polska, pp. 325-328.
- [KC5] R. Romaniuk, K. Poźniak, W. Zabołotny, T. Czarski, W. Koprek, T. Jeżyński, W. Giergusiewicz, **K. Czuba**, P. Pucyk, S. Simrock: Architektura i podzespoły foniczne przemysłowych sieci HOST (w: Mat. III Krajowej Konferencji Optoelektronika 2004 - Oferta Nauki dla Przemysłu). 2004. ss. 80-104.
- [KC6] **K. Czuba**, F. Eints, M. Felber, S. Simrock: Fiber-optic Link for the RF Phase Reference Distribution System for the XFEL and TESLA Projects, w: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High Energy Physics Experiments III / Romaniuk Ryszard (red.), vol. z. Vol. 5775, 710 pages, 92 papers, ISBN 0-8194-5756-6, ss. 44-51, DOI:10.1117/12.610573
- [KC7] **K. Czuba**, F. Eints, M. Felber, J. Dobrowolski, S. Simrock, “First generation of optical phase reference distribution system for TESLA”, TESLA report 2005-08, DESY, Hamburg, 2005
- [KC8] **K. Czuba**, J. Dobrowolski, F. Eints, M. Felber, „Pierwsza generacja światłowodowego systemu dystrybucji sygnału odniesienia dla akceleratora TESLA”, Elektronika, nr 7/2005, str. 69 – 70
- [KC9] R. Romaniuk, K. T. Poźniak, T. Czarski, **K. Czuba**, W. Giergusiewicz, G. Kasprowicz, W. Koprek, „Optical network and FPGA/DSP based control system for free electron laser”, Biuletyn Polskiej Akademii Nauk, Seria Techniczna; vol. 53, Nr 2, 2005, s. 123-138
- [KC10] W. Giergusiewicz, W. Jałmużna, K. Poźniak, N. Ignashin, M. Grecki, D. Makowski, T. Jeżyński, K. Perkuszewski, **K. Czuba**, S. Simrock, R. Romaniuk, “ Low latency control board for LLRF system – SIMCON 3.1”, Proceedings of SPIE, Vol. 5948, part two, pp. 59482C-1 – 59482C-8, 30.08 – 01.09.2005, Warsaw, Poland

- [KC11] **K. Czuba**, M. Felber, “Improved fiber-optic link for the phase reference distribution system for the TESLA technology based projects”, Proceedings of SPIE, Vol. 5948, part one, pp. 59480B-1 – 59480B-8, 30.08 – 01.09.2005, Warsaw, Poland
- [KC12] W. Koprek, M. Grecki, D. Makowski, P. Pawlik, H. Weddig, M. Hoffman, **K. Czuba**, B. Koseda, W. Cichalewski, K. Poźniak, R. Romaniuk, S. Simrock: Status of LLRF system development for European XFEL, Proceedings of SPIE: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Research and High Energy Physics Experiments, 2006. z. 6347. pp. 634703-1 to 634703-18.
- [KC13] **K. Czuba**, H. Weddig, B. Lorbeer, S. Simrock, E. Salow, N. Fend, “Master oscillator design for the VUV-FEL project”, Konferencja Mikon 2006, Kraków, Polska, pp. 1123-1126
- [KC14] S. Simrock, M. Felber, M. Hoffmann, B. Lorbeer, F. Ludwig, H.C. Weddig, **K. Czuba**, „Performance of the new Master Oscillator and phase reference system at FLASH”, Proceedings of PAC07, Albuquerque, New Mexico, USA, pp. 188 – 190

5.2 Doktorat

- [KC15] **K. Czuba**, „RF Phase Reference Distribution System for TESLA Technology Based Projects”, PhD thesis, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland, 2007

5.3 Publikacje po doktoracie

- [KC16] **K. Czuba**, P. Pucyk, M. Ładno, „Distributed Monitoring System for The Master Oscillator of the FLASH Accelerator”, MIXDES 2008, Poznan, Poland, pp 111 - 114
- [KC17] S. Simrock, M. K. Grecki, T. Jezynski, W. Koprek, **K. Czuba**, G.W. Jablonski, W. Jalmuzna, D. R. Makowski, A. Piotrowski, „Demonstration of an ATCA Based LLRF Control System at FLASH”, PAC09, Vancouver, Canada, May 2009
- [KC18] S. Simrock, L. Butkowski, M. Grecki, T. Jezynski, W. Koprek, G. Jablonski, W. Jalmuzna, D. Makowski, A. Piotrowski, and **K. Czuba**, “Evaluation of an ATCA based LLRF system at FLASH,” in Mixed Design of Integrated Circuits & Systems, 2009. MIXDES '09. MIXDES-16th International Conference, Lodz, pp. 111–114.
- [KC19] J. Głównka, M. Maciaś, **K. Czuba**, K. Poźniak, R. Romaniuk: Stanowisko testowe z miedzianą strukturą typu TESLA (w: Elektronika- konstrukcje, technologie, zastosowania), 2009. z. 8. ss. 176-182.
- [KC20] M.K. Grecki, S. Simrock*, T. Jezynski, W. Koprek, D.R. Makowski, W. Jalmuzna, **K. Czuba**, „Demonstration of an ATCA Based LLRF Control System at FLASH”, ICALEPCS 2009, Kobe, Japan, October 2009, pp. 388 – 390
- [KC21] **K. Czuba**, D. Sikora, “Phase drift versus temperature measurements of coaxial cables”, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference, Vilnius, Lithuania, June 2010, pp. 388
- [KC22] J. Piekarski, **K. Czuba**, “The method of designing ultra-low noise dielectric resonator oscillators”, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2010 18th International Conference, Vilnius, Lithuania, June 2010

- [KC23] **K. Czuba**, M. Ładno, "AMC timing receiver and clock synthesizer module for the LLRF system", Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2010, Proceedings of the 17th International Conference, Wrocław, 2010, pp. 129 - 132
- [KC24] S. Bou Habib, **K. Czuba**, W. Jalmuzna, T. Jezynski, " Design of an eight-channel ADC card for GHz signal conversion", Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2010 Proceedings of the 17th International Conference, Wrocław, 2010, pp. 144 - 147
- [KC25] V. Ayvazyan, **K. Czuba**, Z. Geng, M. Grecki, O. Hensler, M. Hoffmann, M. Hoffmann, T. Jezynski, W. Koprek, F. Ludwig, K. Rehlich, H. Schlarb, C. Schmidt, S. N. Simrock, H.-C. Weddig, "LLRF Control System Upgrade at FLASH", PCaPAC'10, Saskatoon, SK, Canada October 2010 pp. 150 - 152
- [KC26] **K. Czuba**, S. Bou Habib, D. Sikora, „ AMC Timing Receiver and Clock Synthesizer Module for the LLRF System” International Journal of Microelectronics and Computer Science, 2010, vol. 1. , no. 2, ISSN 2080-8755, pp.125-130
- [KC27] **K. Czuba**, Ł. Butkowski, S. Jabłoński, P. Przybylski, D. Sikora, W. Jalmuzna, D. Makowski, T. Jezynski, F. Ludwig, "Performance of Analog Signal Distribution in the ATCA Based LLRF System", Proceedings of 2011 Particle Accelerator Conference, New York, NY, USA MOP293, pp 666-668
- [KC28] P. Barmuta, G. Avolio, D. Schreurs, A. Raffo, G. Crupi, **K. Czuba**, "Temperature Dependent Vector Large-Signal Measurements", [Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits \(INMMIC\), Vienna, 2011](#), pp. 1-4
- [KC29] P. Gessler, M. K. Bock, C. Bohm, M. Bousonville, **K. Czuba**, M. Felber, A. Hidvegi, M. Hoffmann, T. Jezynski, D. R. Makowski, T. Lamb, F. Ludwig, G. Petrosyan, L. Petrosyan, K. Rehlich, S. Schulz, P. Vetrov, M. Zimmer, "Next Generation Electronics Based on uTCA for Beam-Diagnostics at FLASH and XFEL", TUOB03, DIPAC2011, Hamburg, Germany, May 2011, pp. 294 - 296
- [KC30] L. Zembala, **K. Czuba**, Mateusz Żukociński, M. Hoffmann, F. Ludwig, H-C. Weddig, "Low phase noise PLL based LO generation module for femtosecond precision RF field detection", Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2011, Proceedings of the 18th International Conference, Gliwice, 2011, pp. 144 - 147
- [KC31] **K. Czuba**, S. Bou Habib, D. Sikora, "AMC Vector Modulator Card for the LLRF system", Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES), 2011, Proceedings of the 18th International Conference, Gliwice, 2011, pp. 144 - 147
- [KC32] A. Abramowicz, **K. Czuba**: Inter-System Ground Noise Observations in LLRF System at FLASH Accelerator, Int. Conference on Electromagnetic Disturbances, Białystok 2011, pp. 1-5
- [KC33] Abramowicz Adam, **Czuba Krzysztof Marek**: Investigations on Inter-System Ground Noise in LLRF System at FLASH Accelerator, w: Przegląd Elektrotechniczny, Sigma NOT, nr 8, 2012, ss. 72-74
- [KC34] Barmuta, P.; Plonski, P.; Czuba, K.; Avolio, G.; Schreurs, D. „Nonlinear AlGaIn/GaN HEMT model using multiple artificial neural networks”, Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 2012 19th International Conference Proceedings vol. 2, pp. 462-466, Warsaw, Poland, 21-23 May, 2012
- [KC35] Piekarski, J.; Zukocinski, M.; Czuba, K.; Hoffmann, M.; Ludwig, F.; Schlarb, H. „3.9GHz accelerating cavity field detection hardware for the free-electron laser”, Microwave

- Radar and Wireless Communications (MIKON), 2012 19th International Conference Proceedings vol. 1, pp. 197-200, Warsaw, Poland, 21-23 May, 2012
- [KC36] I. Rutkowski, **K. Czuba**, D. Makowski, A. Mielczarek, H. Schlarb, F. Ludwig, „Vector Modulator Card for MTCA-Based LLRF Control System for Linear Accelerators”, IEEE RT2012 Conference Record, PS1-8, Berkeley CA, USA, 11-15 June, 2012
- [KC37] **K. Czuba**, M. Hoffmann, T. Jezynski, F. Ludwig, H. Schlarb, “RF Backplane for MTCA.4 Based LLRF Control System”, IEEE RT2012 Conference Record, PS1-9, Berkeley CA, USA, 11-15 June, 2012
- [KC38] H. Schlarb, F. Ludwig, M. Hoffmann, T. Jezynski, J. Branlard, C. Schmidt, M. Grecki, V. Ayvazyan, S. Pfeiffer, **K. Czuba**, A. Piotrowski, O. Hensler, W. Jalmuzna, D. Makowski, L. Butkoswki, W. Cichalewski, I. Kudla, J. Piekarski, K. Przygoda, I. Rutkowski, D. Sikora, J. Szewinski, W. Wierba, B. Yang, L. Zembala, S. B. Habib, “High-Precision Accelerator RF Control for the European XFEL”, ”, IEEE RT2012 Conference Record, PS4-20, Berkeley CA, USA, 11-15 June, 2012
- [KC39] J. Sekutowicz, V. Ayvazyan, M. Ebert, J. Eschke, A. Gössel, D. Kostin, F. Mittag, W. Merz, R. Onken, W. Cichalewski, W. Jałmużna, K. Przygoda, **K. Czuba**, L. Zembala, I. Kudla, J. Szewiński, „CW and LP Operation Test of XFEL-Like Cryomodule”, IPAC12, New Orleans, USA, 21-25May, 2012, pp. 2215 - 2217
- [KC40] J. Branlard et. al. “The European XFEL LLRF System”, in Proc. of IPAC2012, New Orleans, USA, 21-25May, 2012, pp. 55-57
- [KC41] J. Sekutowicz et. al. “Second CW and LP Operation Test of XFEL Prototype Cryomodule”, Proceedings of LINAC12 conference, 2012, ss. 1-3
- [KC42] C. Schmidt et. al. “Recent Developments of the European XFEL LLRF System”, IPAC 2013, Shanghai, China, pp 2941-2943
- [KC43] **Czuba Krzysztof Marek**, Łysiuk Anna, Barmuta Paweł [i in.] “Femtosecond Precision via RF Backplane in MTCA Crates”, MIXDES 2013, Gdynia, Poland, pp. 113-117
- [KC44] J. Branlard et. al. “MTCA.4 LLRF System for the European XFEL”, MIXDES 2013, Gdynia, Poland, pp. 109-112
- [KC45] **Czuba Krzysztof Marek**, Romaniuk Ryszard, Zabolotny Wojciech, al. et.: The International Linear Collider. Technical Design Report. Executive Summary, 46 s., 2013
- [KC46] J. Sekutowicz, et.al, “Feasibility of CW and LP Operation of the XFEL LINAC”, FEL13 NY, USA, pp. 189-192
- [KC47] J. Branlard et. al. “Equipping FLASH with a MTCA.4 Based LLRF Sytem”, SRF2013, THP085, Paris, France, pp. 1120 – 1122
- [KC48] **Czuba Krzysztof Marek**: RF Phase Reference Distribution System for TESLA Technology Based Projects, Editorial Series on Accelerator Science, 2013, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978-83-7814-075-7, 137 s.
- [KC49] U. Mavric, **K. Czuba**, T. Lesniak, L. Frank, H. Schlarb, T. Rohlev, Sandona, “Performance of compact LLRF system using analog RF backplane in MTCA.4 crates”, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC’14 , June 15 - 20, 2014, Dresden, Germany, pp. 2438 – 2440.

- [KC50] J Branlard, G Ayvazyan, V Ayvazyan, U Mavric, S Pfeiffer, H Schlarb et. al. European XFEL RF gun commissioning and LLRF linac installation, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC'14 , June 15 - 20, 2014, Dresden, Germany, pp. 2427 - 2429
- [KC51] C. Schmidt et. al. "Performance of the MTCA.4 based LLRF RF system at FLASH, Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC'14 , June 15 - 20, 2014, Dresden, Germany, pp. 2433 - 2435
- [KC52] E Janas, **K. Czuba**, P Kownacki, D Sikora, MK Czwalinna, M Felber, "Design and Integration of the Optical Reference Module at 1.3 GHz for FLASH and the European XFEL", Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC'14 , June 15 - 20, 2014, Dresden, Germany, pp. 2768 - 2770
- [KC53] **K. Czuba**, T. Jezynski, T. Leśniak, F. Ludwig, U. Mavric, H. Schlarb, "RTM RF Backplane for MicroTCA.4 Crates", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC54] A. Rosner, **K. Czuba**, V. Dirksen, M. Fenner, T. Jezynski, T. Lesniak, K. Schiewe, H. Schlarb, "RF-Backplane Management for the MicroTCA.4 Control System", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC55] Rutkowski Igor, Rybaniec Radosław, **Czuba Krzysztof**, Butkowski, Lukasz, Hoffmann Matthias, Ludwig Frank, Schmidt Christian, Schlarb Holger, "MTCA.4-based digital LLRF control system for CW SRF linacs", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC56] C. Schmidt, V. Ayvazyan, J. Branlard, Ł. Butkowski, O. Hensler, M. Hoffmann, M. Killenberg, F. Ludwig, U. Mavrič, S. Pfeiffer, K. Przygoda, H. Schlarb, W. Cichalewski, D. Makowski, A. Piotrowski, **K. Czuba**, I. Rutkowski, D. Sikora, M. Zukocinski, "Real Time Control of RF Fields Using a MicroTCA.4 Based LLRF System at FLASH", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC57] Jablonski Szymon, Schlarb Holger, Ludwig Frank, **Czuba Krzysztof**, "2pi Low Phase Drift Detector for High Precision Measurements", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC58] U. Mavric, **K. Czuba**, F. Ludwig, M. Hoffmann, J. Piekarski, H. Schlarb, D. Sikora, "Multichannel downconversion for MicroTCA.4 based control systems", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC59] Bou Habib Samer, **Czuba Krzysztof**, Schlarb Holger, "Performance Evaluation of MicroTCA.4 Fast Digitizer for Direct Sampling Applications", Real Time Conference (RT), 2014 19th IEEE-NPSS, Nara, Japan, May 2014.
- [KC60] J Branlard, et. al. "LLRF Commissioning of The European XFEL RF Gun And Its First Linac RF Station", Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC'15 , May 3 - 8, 2015, Richmond, VA. USA, pp. 1377 - 1379
- [KC61] M. Omet, "Operation Experiences With the MicroTCA.4-Based LLRF Control System At FLASH", Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference IPAC'15 , May 3 - 8, 2015, Richmond, VA. USA, pp. 844 - 846
- [KC62] Janas Ewa, **Czuba Krzysztof Marek**, Felber Matthias [i in.] : MTCA.4 Phase Detector for Femtosecond-Precision Laser Synchronization, w: Proceedings of International Free Electron Laser 2015, 2015, ss. 1-4, Daejeon, Korea

- [KC63] M. Grzegorzółka, **K. Czuba**, I. Rutkowski, M. Hoffmann, U. Mavric, H. Schlarb, “MTCA. 4 RTM Module for direct sampling based applications”, 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Kraków, Poland, 9-11 May, 2016
- [KC64] S. Hanasz, **K. Czuba**, B. Gąsowski, H. Weddig, Ł. Zembala, “Low Phase Noise 1.3 GHz Synthesizer”, 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Kraków, Poland, 9-11 May, 2016
- [KC65] Shehzad N., Killenberg Martin, Heuer M. [i in.] : Modular Software for MicroTCA.4 Based Control Applications, w: Proceedings 30th European Conference on Modelling and Simulation ECMS 2016 / Claus T. [i in.] (red.), 2016, Digitaldruck Pirrot GmbH, ISBN 978-0-9932440-2-5, ss. 1-4
- [KC66] Janas Ewa, **Czuba Krzysztof Marek**, Mavric Uros [i in.] : Temperature and Humidity Drift Characterization of Passive RF Components for a Two-Tone Calibration Method, w: Proceedings of IBIC2016, Barcelona, Spain, 2017, The Joint Accelerator Conferences Website (JACoW) , ISBN 978-3-95450-177-9, ss. 194-197
- [KC67] Szewiński Jarosław, Gołębiewski Z., Krawczyk P. [i in.] : Contribution to the ESS LLRF System by Polish Electronic Group, w: Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference / Arduini Gianluigi [i in.] (red.), 2017, Joint Accelerator Conferences Website, ISBN 978-3-95450-182-3, ss. 4026-4027, [DOI:10.18429/JACoW-IPAC2017-THPAB129](https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-THPAB129)
- [KC68] Branlard J., **Czuba Krzysztof Marek**, Jatzak P. [i in.] : Installation and First Commissioning of The LLRF System for the European XFEL, w: Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference / Arduini Gianluigi [i in.] (red.), 2017, Joint Accelerator Conferences Website, ISBN 978-3-95450-182-3, ss. 3638-3641, [DOI:10.8429/JACoW-IPAC2017-THOAA3](https://doi.org/10.8429/JACoW-IPAC2017-THOAA3)
- [KC69] Varghese G., **Czuba Krzysztof Marek**, Dworzański A. [i in.] : ChimeraTK – A Software Tool Kit for Control Applications, w: Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference / Arduini Gianluigi [i in.] (red.), 2017, Joint Accelerator Conferences Website, ISBN 978-3-95450-182-3, ss. 1798-1801, [DOI:10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPIK049](https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPIK049)
- [KC70] B. Gąsowski, **Krzysztof Czuba**, Ł. Zembala, [i in.], ” Status update on the 1.3 GHz Master Oscillator of the European XFEL”, Proceedings of the 8th Low Level Radio Frequency workshop 2017 (LLRF17), 16-19 October, 2017 , Barcelona, Spain:
- [KC71] I. Rutkowski, **K. Czuba**, M.G. Grzegorzolka, LO Board for 704.42 MHz Cavity Simulator for ESS, Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems, ICALEPCS 2017, Barcelona, Spain, October 2017, ss. 1573 – 1586, <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA081>
- [KC72] M.G. Grzegorzolka, **K. Czuba**, I. Rutkowski, Concept of Cavity Simulator for European Spallation Source, Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems, ICALEPCS 2017, Barcelona, Spain, October 2017, ss. 1666 – 1669, <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA123>
- [KC73] M. Killenberg, **K. Czuba**, A. Dworzanski [i in.], “Abstracted Hardware and Middleware Access in Control Applications, Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems, ICALEPCS 2017, Barcelona, Spain, October 2017, ss. 840-845, <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA178>

- [KC74] B. Gaşowski, **K. Czuba**, L. Zembala, H. Schlarb, “Channel Selection Switch for the Redundant 1.3 GHz Master Oscillator of the European XFEL”, Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems (ICALEPCS 2017), Barcelona, Spain, 8-13 October 2017, ss. 1590-1594, <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA090>
- [KC75] S. Hanasz, **K. Czuba**, B. Gasowski, L.Z. Zembala, H. Schlarb, “Optimisation of a Low-Noise 1.3 GHz PLL Frequency Synthesizer for the European XFEL”, Proceedings of the 16th International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems (ICALEPCS 2017), 8-13 October 2017, Barcelona, Spain, ss. 1595-1598, <https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-THPHA092>
- [KC76] Omet M., **Czuba Krzysztof Marek**, Gaşowski Bartosz [*i in.*]: LLRF Commissioning at the European XFEL, w: Proceedings, 18th International Conference on RF Superconductivity (SRF2017) : Lanzhou, China, July 17-21, 2017, 2018, JACoW , ISBN 978-3-95450-191-5, ss. 941-943, [DOI:10.18429/JACoW-SRF2017-FRXBA01](https://doi.org/10.18429/JACoW-SRF2017-FRXBA01)
- [KC77] Urbański Maciej, Jatzak P., Sikora Dominik [*i in.*]: Frequency Divider Module for the European XFEL Phase Reference Signal Distribution System, w: Proc. MIKON 2018, 2018, Fundacja Mikrofal i Radiolokacji MIKON, ISBN 978-83-949421-0-6, ss. 850-852
- [KC78] Urbański Maciej, **Czuba Krzysztof Marek**, Ludwig Frank [*i in.*]: The Concept of the RF Phase Reference Distribution System for SINBAD Accelerator Research Facility, w: Proc. MIKON 2018, 2018, Fundacja Mikrofal i Radiolokacji MIKON, ISBN 978-83-949421-0-6, ss. 515-517
- [KC79] Grzegorzóka Maciej, **Czuba Krzysztof Marek**, Rutkowski Igor: RF Front-end for Cavity Simulator for the European Spallation Source, w: Proc. MIKON 2018, 2018, Fundacja Mikrofal i Radiolokacji MIKON, ISBN 978-83-949421-0-6, ss. 526-527,
- [KC80] Gaşowski Bartosz, Hanasz Stanisław, **Czuba Krzysztof Marek** [*i in.*]: Influence of Step Recovery Diode DC Bias on AM/PM Conversion in Sampling Phase Detectors, w: Proc. MIKON 2018, 2018, Fundacja Mikrofal i Radiolokacji MIKON, ISBN 978-83-949421-0-6, ss. 602-603
- [KC81] Hanasz Stanisław, Gaşowski Bartosz, **Czuba Krzysztof Marek** [*i in.*]: Prototype Variable Resistors and Capacitors for RF and Microwave Phase Lock Loops, w: Proc. MIKON 2018, 2018, Fundacja Mikrofal i Radiolokacji MIKON, ISBN 978-83-949421-0-6, ss. 353-354
- [KC82] Dominik Sikora, **Krzysztof Czuba**, Pawel Jatzak, Maciej Urbanski, Holger Schlarb, Frank Ludwig, Heinrich Pryschelski, Phase Drift Compensating RF Link for Femtosecond Synchronization of E-XFEL, 21st IEEE Real Time Conference, Collonial Williamsburg, USA, 9-15 June 2018, <https://arxiv.org/abs/1806.09197>
- [KC83] R. De Prisco, R. Zeng, **K. Czuba**, T. Leśniak, R. Papis, D. Sikora and M. Żukociński: Influence of the Cavity Field Flatness And Effect of The Phase Reference Line Errors on the Beam Dynamics of The ESS Linac, 61st ICFA ABDW on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB'18), Daejeon, Korea, 17-22 June 2018
- [KC84] Maciej Grzegorzóka, **Krzysztof Czuba**, Mateusz Lipiński, Igor Rutkowski, Cavity Simulator for European Spallation Source, January 2019, IEEE Transactions on Nuclear Science PP(99):1-1, January 2019, DOI: 10.1109/TNS.2019.2890994

6. Literatura

- [1]. PCI Industrial Computer Manufacturers Group, “Enhancements for MicroTCA.4” PICMG, 2016
- [2]. D.W. Allan, H. Daams. “Picosecond time difference measurement system”, Proc. 29th Annual Frequency Control Symposium, Atlantic City, USA, pp. 404-411, 1975.
- [3]. J. Serrano, P. Alvarez, M. Cattin, E. G. Cota, P. M. J. H. Lewis, T. Włostowski et al., [The White Rabbit Project](#) in Proceedings of ICALEPCS TUC004, Kobe, Japan, 2009.
- [4]. [Methods to Increase Reliability and Ensure Determinism in a White Rabbit Network](#) Maciej Lipinski, PhD Thesis, Warsaw University of Technology, 2016
- [5]. 1588-2008 - IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems,
<https://ieeexplore.ieee.org/document/4579760/>
- [6]. C. Sydlo, M. Felber, C. Gerth, T. Kozak, T. Lamb, J.M. Müller, H. Schlarb, F. Zummack [Femtosecond Optical Synchronization System for the European XFEL](#)
- [7]. T. Lamb, Ł. Butkowski, E.P. Felber, M. Felber, M. Fenner, S. Jabłoński, T. Kozak, J.M. Müller, P. Prędko, H. Schlarb, C. Sydlo, M. Titberidze, F. Zummack [Laser-to-RF Synchronization with Femtosecond Precision](#)
- [8]. Sz. Jabłoński, “A fiber-optic system using a continuous-wave laser for providing phase-stable radio-frequency signals to remote locations”, Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Kwiecień 2016
- [9]. J. Frisch, D. G. Brown, E. L. Cisneros, “The RF phase distribution and timing system for the NLC”, 20th International Linac Conference (Linac 2000), Monterey, CA, USA, also SLAC-PUB-8578, Stanford, CA, USA, August 2000
- [10]. Ulrich L. Rohde, “Microwave and wireless synthesizers: theory and design”, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA,
- [11]. S. Simrock, “State of the art in RF control,” in LINAC 2004—Proceedings, Germany, Aug. 2004.
- [12]. Ray Larsen, SLAC, “MicroTCA.4 /4.1 Hardware Standards & Software Guidelines Progress Overview”, TIPP’17Beijing,
<https://indico.ihep.ac.cn/event/6387/session/23/contribution/233/material/slides/0.pdf>
- [13]. Papis Radosław: Układ do kompensacji temperaturowych dryftów fazy i amplitudy wzmacniacza w.cz, praca inżynierska, Politechnika Warszawska, 2017
- [14]. Sapor Kamil: Detektor fazy na częstotliwość 1,3GHZ z automatyczną kompensacją dryftów własnych, praca inżynierska, Politechnika Warszawska, 2017
- [15]. Kołcz Dawid: Moduł stabilizujący fazę sygnałów w systemie synchronizacji akceleratora XFEL, praca inżynierska, Politechnika Warszawska, 2015
- [16]. Jatczak Paweł: Obwody wyjściowe interferometru dla systemu synchronizacji akceleratora cząstek elementarnych akceleratora EUROPEAN-XFEL, praca magisterska, Politechnika Warszawska, 2015
- [17]. Urbański Maciej: Automatycznie strojony odbiornik dla łącza interferometrycznego na częstotliwość 1.3 GHz, praca magisterska, Politechnika Warszawska, 2016

