

**dr hab. inż. Krzysztof Nyka, prof. PG**

15.08.2023

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki,  
Politechnika Gdańska,  
Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

WPLYNĘŁO  
dn.....2023-09-04.....

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA  
RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

**Development of Phase Reference Distribution Systems of Linear Particle Accelerators with Femtosecond Stability**

Autor rozprawy: **mgr inż. Maciej Urbański**

**1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?**

Zagadnienie badawcze, jakim doktorant zajmuje się w pracy jest poprawnie związane z tytułem rozprawy i dotyczy problemów wytwarzania oraz dystrybucji sygnałów referencyjnych wysokiej częstotliwości (Phase Reference Distribution System – PRDS) do sterowania i synchronizacji aktywnych elementów liniowych akceleratorów cząstek elementarnych, w szczególności elektronów. Podstawowym, choć nie jedynym, zastosowaniem dla wytworzonych w akceleratorach wysokoenergetycznych wiązek elektronów jest generacja bardzo silnych impulsów laserowego promieniowania rentgenowskiego (X-ray). Praca koncentruje się na takich właśnie instalacjach, gdzie akcelerator sprzęgnięty jest z dodatkowymi stopniami konwersji impulsów i pełni funkcję lasera rentgenowskiego. Tematyka pracy jest bardzo aktualna, czego dowodem jest notowany w ostatnich latach dekadach stały rozwój akceleratorów cząstek oraz poszerzanie ich zakresu zastosowań w takich dziedzinach jak fizyka ciała stałego, inżynieria materiałowa czy medycyna. W ujęciu szczegółowym zagadnienia badawczych rozwiązywane w ramach doktoratu są również bardzo aktualne, gdyż związane są z praktycznym wykorzystaniem uzyskanych wyników w aktualnie rozwijanych lub modernizowanych akceleratorach głównie w niemieckim ośrodku badawczym DESY oraz w mniejszym stopniu w szwajcarskim ośrodku ESS. W zasadniczej części pracy autor zajmuje się systemami PRDS do następujących akceleratorów/laserów rentgenowskich: E-XFEL, FLASH i SINBAD ARES. Układy

Autor nie sformułował tezy pracy, a zagadnienie badawcze określił w głównym zarysie za pomocą dwóch celów rozprawy o następującym brzmieniu (po przetłumaczeniu na j. polski):

1. Identyfikacja krytycznych składników rozległych systemów PRDS oraz opracowanie nowych metod pozwalających na synchronizację wielu (rozproszonych) urządzeń z długo- i krótkookresową femtosekundową dokładnością za pomocą sygnałów o bardzo wysokiej częstotliwości.
2. Opracowanie technologii i uniwersalnej metody projektowania nowoczesnych podzespołów PRDS, uwzględniając stabilizację termiczną, hermetyzację, właściwe ekranowanie, naprężenia mechaniczne i poprawę odporności na czynniki środowiskowe takie jak drgania.

Z wcześniej zarysowanego przez autora kontekstu wynika, że zadania związane z powyższymi celami dotyczą rozwiązań dla akceleratorów E-XFEL, FLASH i SINBAD ARES. Autor deklaruje też, że opracowane metody projektowe pozwolą projektantom przyszłych systemów PRDS minimalizować niestabilności fazy i realizować projekty proste a zarazem solidne pod względem parametrów elektrycznych jak i łatwości obsługi serwisowej.

Taka forma określenia zagadnienia badawczego, czyli bez sformułowania tez rozprawy, jest akceptowalna, gdyż pozwala na sprecyzowanie zakresu pracy oraz ocenę, czy postawione zagadnienie badawcze zostało rozwiązane.

## **2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizy źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?**

Analizę stanu wiedzy doktorant przeprowadził poprawnie na podstawie spisu literatury liczącego 104 pozycje. Wstępny przegląd mieści się w krótkim wprowadzeniu i został rozwinięty w obszernym rozdziale 2. (Theoretical background). Dodatkowe odniesienia do istniejących rozwiązań szczegółowych pojawiają się przy okazji prezentowania własnych projektów. Autor wykazał się tu szeroką i dogłębną wiedzą dotyczącą problemów dotyczących stabilizacji fazy i dystrybucji sygnałów referencyjnych w rozległych systemach sterowania analogowego akceleratorów liniowych za pomocą sygnałów o wysokiej częstotliwości.

## **3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?**

Rozprawa ma charakter projektowo-doświadczalny, co bezpośrednio wynika z przyjętego zagadnienia badawczego, jednak tam gdzie to było konieczne, została uzupełniona analizą teoretyczną oraz wnikliwą analizą zjawisk fizycznych. Doktorant nie przedstawia wyników symulacji numerycznych, jednak można założyć, że korzystał z narzędzi CAD do symulacji i projektowania układów mikrofalowych zawierających elementy o stałych rozłożonych oraz do tworzenia modeli 3D części mechanicznych takich jak obudowy urządzeń o specjalnych wymaganiach dotyczących stabilności częstotliwości i fazy. Weryfikację poprawności opracowanych projektów autor opierał na pomiarach, do których przygotowywał niekiedy autorskie układy pomocnicze, np. zestaw pomiarowy do badania dryftu fazy komercyjnego detektora fazy AD8302.

Do rozwiązania postawionego zagadnienia badawczego doktorant przyjął poprawne założenia opierając się na realistycznych wymaganiach pochodzących z ośrodków DESY i ESS dotyczących parametrów urządzeń w systemach PRDS. Cele rozprawy doktorant osiągnął implementując zaproponowane rozwiązania i metody w zaprojektowanych i zrealizowanych układach komponentów systemów PRDS dla DESY i ESS w taki sposób, że prototypy przedstawionych urządzeń pozytywnie zweryfikowano pod kątem wymaganych parametrów elektrycznych, mechanicznych, termicznych i funkcjonalnych. Mimo niepodważalnej wysokiej jakości opracowanych projektów (zostaną one wyszczególnione w następnej części niniejszej recenzji), doktorant nie zaprezentował zapowiedzianych w celach rozprawy nowych metod projektowych w formie nadającej im walor uniwersalnych procedur. Opisy tych metod zostały wplecione w omówienie procedur projektowych konkretnych urządzeń i dopiero uważny czytelnik może próbować je samemu uogólnić i zaadaptować do własnych potrzeb.

Doktorant nie ustrzegł się błędu rzeczowego, który, co należy podkreślić, nie doprowadził do podjęcia błędnych decyzji projektowych i ostatecznie nie zaważył na jakości uzyskanych rozwiązań. Chodzi o

interpretację pomiarów współczynnika odbicia przewodu współosiowego w rozdziale 7.1 na rys. 94. Doktorant myli się twierdząc, że okresowe zaburzenia dopasowania są spowodowane przez periodyczną zmianę średnicy ekranu. Zakładając, że pomiary wykonano poprawnie, czyli przy zamknięciu drugiego końca linii obciążeniem dopasowanym, o czym autor nie pisze, takie same fluktuacje wystąpiłyby nawet dla jednorodnego przewodu, który nie jest idealnie dopasowany, a jego długość wielokrotnie przewyższa długość fali. Fluktuacje te występują w związku z tym, że przy zmianie częstotliwości długość elektryczna kabla zmienia się gwałtownie i stanowi na przemian parzyste i nieparzyste wielokrotności ćwierci długości fali, przy których impedancja wejściowa osiąga skrajne wartości. Na podstawie odległości między sąsiednimi minimami można wręcz obliczyć fizyczną długość mierzonego kabla, którą w tym przypadku szacuje się na 3.8 m przy założeniu wypełnienia materiałem o przenikalności równej 2.

**4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literatury światowej?**

Oryginalność rozprawy dotyczy przede wszystkim tych zagadnień i wyników badań, które zostały opublikowane przez autora w liczących się czasopismach lub przedstawione na konferencjach, gdzie referaty przechodzą wnikliwą recenzję. W zakresie tematyki rozprawy doktorant jest współautorem 10 publikacji, z czego 7 jest artykułami na konferencjach międzynarodowych (5 na konferencji MIKON), jeden stanowi artykuł w czasopiśmie indeksowanym w bazie Web of Science (posiada impact factor IF), a jeden to artykuł znajdujący się w recenzji. W połowie z tych publikacji doktorant zajmuje pierwsze miejsce na liście współautorów, co świadczy o jego istotnym samodzielnym wkładzie. Należy pamiętać, że badania prowadzące do rozprawy doktorskiej z zasady prowadzone są pod kierunkiem promotora, nie rzadko też promotora pomocniczego, którzy w naturalny sposób wnoszą swój współautorski wkład do osiągnięć prezentowanych w rozprawie. Powyższe osiągnięcia publikacyjne, mimo iż nie są imponujące pod względem ilości artykułów z IF, świadczą o tym, że w rozprawie przedstawiono wystarczająco oryginalny i samodzielny dorobek autora. O oryginalności przedstawionych rozwiązań świadczy również fakt, że powstawały one w ramach trzech recenzowanych, zakończonych i rozliczonych projektów międzynarodowych we współpracy z DESY oraz jednego projektu wewnętrznego PW IDUB.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- opracowanie projektu automatycznego odbiornika do interferometrycznej kompensacji fazy długich łączy kablowych w PRDS E-XFEL, umożliwiającego kompensację dryftu długookresowego z 10 ps do 50 fs (200 razy),
- opracowanie projektu, realizacja i przetestowanie modułów ultra niskoszumnego dzielnika wysokiej częstotliwości, którego 50 egzemplarzy działa w sposób ciągły w systemach E-XFEL,
- wiodący udział w tworzeniu kompletnego systemu PRDS dla zmodernizowanego akceleratora FLASH2020+, w tym projekt oscylatora głównego o parametrach szumowych przewyższających najwyższej klasy generator laboratoryjny R&S SMB100A, projekt modułu dystrybucji sygnału referencyjnego oparty na hermetycznych i stabilizowanych termicznie dzielnikach mocy z wbudowanymi układami diagnostyki, projekty uniwersalnych dzielników częstotliwości; uzyskano parametry niespotykane w dostępnych komercyjnie układach,
- opracowanie metody projektowej ultra wrażliwych generatorów w.cz. umożliwiających uzyskiwanie ponadprzeciętnych charakterystyk szumu fazowego, którą zaimplementowano z powodzeniem w module konwersji częstotliwości dla FLASH2020+

- opracowanie systemu PRDS dla SINBAD, w tym zaproponowanie struktury PRDS opartej na pętłach interferometrycznych oraz projekt i realizacja prototypów odbiornika i nadajnika w tym systemie.

O wysokich kompetencjach doktoranta i szerokim zakresie prac świadczy też to, że z doktoratem związane są dwie prace dyplomowe magisterskie i jeden projekt dyplomowy inżynierski.

#### **5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?**

Praca jest napisana w języku angielskim, którym autor posługuje się sprawnie. Mimo zdarzających się niedociągnięć gramatycznych, interpunkcyjnych i stylistycznych oraz sporadycznych polonizmów, pracę czyta się łatwo i jest ona zrozumiała. Rozprawa ma logiczną strukturę i jest poprawnie zredagowana, mimo pewnych uchybień opisanych poniżej. Praca zawiera dodatek z projektami, których doktorant był współautorem. Świadczy on o bardzo dużej aktywności doktoranta, ale nie ma wpływu na ocenę pracy. Autor pisze językiem zwięzłym i jasno prezentuje poszczególne cele i zadania oraz sposób ich rozwiązywania i wyniki. Prezentowane opisy urządzeń oraz wyniki poparte są licznymi wykresami charakterystyk, schematami projektowanych struktur oraz ich fotografiami. Niektóre ilustracje nie są jednak najlepiej dobrane lub nie są do końca czytelne. Z powodu konieczności zachowania poufności dotyczącej rozwiązań opracowywanych w ramach projektów z DESY, część z nich przedstawiona jest dość pobieżnie. Przykładowe zastrzeżenia dotyczące tekstu, ilustracji, redakcji i struktury podano poniżej.

- Niedopowiedzenia, niejasności lub niekonsekwencje dotyczące niektórych pojęć – zdarzają się pojęcia lub symbole, które nie zostały uprzednio jasno zdefiniowane, czego przykładem jest pojęcie „jitter” omawiane w rozdziale 2.5.2 oraz DIV108 na rys. 74 lub symbol VPHS na str. 136.
- Brakujące lub błędne odwołania do literatury (Fig. 31) i obiektów (na str. 86 powinno być Table 4 zamiast Section 4.1.1).
- Niefortunna nazwa rozdziału 7.1.1 (Cabling system), w którym prezentowany system okablowania nie jest autorstwa doktoranta, a bazując na projekcie okablowania innego autorstwa, zaproponował on sam układ łącza interferometrycznego.
- Rysunek 95 nie wnosi nic istotnego i zasadniczo jest zbyteczny, a rysunek 96 jest niejasny i wymaga dokładniejszego opisu.
- Rozdział 4.2 prezentuje interferometr dla E-XFEL, który doktorant opracował w ramach swojej pracy magisterskiej, nie powinien się więc znaleźć głównej części rozprawy, gdyż nie stanowi dorobku doktorskiego.
- Na rysunku 99 trudno jest przypisać krzywe do pozycji w legendzie.

#### **6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?**

Biorąc pod uwagę aktualność tematu rozprawy, bardzo wysokie wymagania stawiane opracowywanym rozwiązaniom, często niespotykane w układach dostępnych komercyjnie, oraz zawarte w pracy liczne oryginalne rozwiązania o dużym znaczeniu praktycznym i poparte weryfikacją eksperymentalną, należy wysoko ocenić przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych. Bardzo duże znaczenie w tej ocenie ma również fakt, że opracowane rozwiązania stosowane są w



nowoczesnych instalacjach akceleratorów liniowych w Europie i mogą stanowić swoistą referencję dla innych rozwiązań tego typu.

## 7. Słabe strony rozprawy

Mimo wysokiej oceny zaprezentowanych rozwiązań, niektóre elementy rozprawy budzą zastrzeżenia lub wywołują niedosyt, co wyszczególniono poniżej.

- Praca zawiera niedociągnięcia dotyczące struktury, tekstu oraz redakcji, co szczegółowo omówiono w części 5. recenzji.
- Zapowiadane w celach rozprawy metody projektowe nie doczekały się jasnego przedstawienia w postaci uogólnionych i uniwersalnych procedur projektowych, co omówiono w części 3. recenzji.
- Błąd rzeczowy dotyczący interpretacji wyników pomiaru współczynnika odbicia przewodu współosiowego, co szczegółowo omówiono w części 3. recenzji.
- Kryterium wyboru projektów do przedstawienia w dodatku nie wydaje się konsekwentnie stosowane, gdyż w głównej części pracy zdarzają się rozwiązania opracowywane wspólnie z innymi autorami.
- Obszerna część teoretyczna dobrze świadczy o kompetencjach doktorantów, jednak sprawia wrażenie nieco oderwanej od rozwiązań projektowych prezentowanych w dalszych rozdziałach pracy poprzez to, że modele teoretyczne w niewielkim zakresie wspierają proces projektowy oraz weryfikację uzyskanych wyników. Przykładem niech będzie przedstawiona na str. 106 wartość „total time jitter (...) calculated at 10.7 fs”. Doktorant nie przedstawił obliczeń parametru „time jitter” na podstawie pomierzonej charakterystyki szumów fazowych, a prawdopodobnie tylko odczytał tę wartość z wbudowanej w analizatorze widma R&S FSWP funkcji wykreślenia i analizy szumów fazowych.
- Przedstawiona w rozdziale 7.2 analiza dokładności detektora fazy AD8302 na częstotliwości 3 GHz nie wydaje się uzasadniona w sytuacji, gdy producent specyfikuje jego użycie do 2.7 GHz, a użytkownik oczekuje bardzo wysokich parametrów. Niemniej, doktorant zaprezentował w ten sposób, że potrafi samodzielnie przeprowadzić weryfikację dokładności komercyjnych układów do detekcji fazy.
- Do analizy dokładności detektora fazy AD8302 bardziej odpowiednie byłyby charakterystyki błędów fazy niż przedstawione na rys. 99 przebiegi napięcia wyjściowego.

## 8. Ocena końcowa rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa porusza aktualny i ważny problem badawczy i techniczny. Zapropozowane rozwiązania są oryginalne, poprawne i rzetelne przedstawione. Mimo pewnych niedociągnięć, autor osiągnął zamierzone cele. Doktorant zaprezentował należytą wiedzę teoretyczną, a przede wszystkim wysokie kompetencje praktyczne w zakresie projektowania, realizacji i pomiarów układów dystrybucji sygnałów sterujących w.c.z o bardzo ostrych wymaganiach dotyczących stabilności fazy w tak zaawansowanych i nowoczesnych systemach jak liniowe akceleratory cząstek. Doświadczalny charakter pracy i jej obszerny zakres składają się na dużą przydatność dla nauk technicznych. Reasumując, przedłożona do recenzji rozprawa mgr. inż. Macieja Urbańskiego spełnia wymagania ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuje o jej dopuszczenie do dalszego procedowania, w tym publicznej obrony.

