

WPŁYNEŁO

2023 -12- 02

dn.....

Kraków, 27.11.2023

dr hab. inż. Kamil Staszek, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. S. Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
Al. A. Mickiewicza 30, 30-059, Kraków

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pana mgr inż. Dominika Sikory, pt.

„Precise Phase Drift Stabilization in RF Phase Reference Distribution Systems of Particle Accelerators”

opracowana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Politechniki Warszawskiej z dnia 24.10.2023

1. Wstęp

Pan Dominik Sikora otrzymał tytuł magistra inżyniera w dniu 10.02.2010 r. na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej. Od czasu studiów nieprzerwanie związany jest z Politechniką Warszawską. W 2019 roku zatrudniony został na stanowisku asystenta badawczego w Instytucie Systemów Elektronicznych PW. W latach 2008-2018 współpracował z ośrodkiem badawczym DESY (*Deutsches Elektronen-Synchrotron* – Niemiecki Synchrotron Elektronowy) w Hamburgu (Niemcy) przy projektach budowy systemów w.cz. dla akceleratorów FLASH (*Freie-Elektronen Laser in Hamburg* – laser na swobodnych elektronach) i E-XFEL (*European X-ray Free Elektron Laser* – rentgenowski laser na swobodnych elektronach). W tym czasie odbył tam ponad 60 wizyt, trwających średnio po 2 tygodnie. W latach 2016-2023 pan Dominik współpracował z ośrodkiem badawczym ESS (*European Spallation Source* – Europejskie Źródło Spalacyjne) w Lund (Szwecja) przy projekcie budowy systemu synchronizacji akceleratora ESS. Odbył tam blisko 20 wizyt, trwających średnio 1 tydzień. Od roku 2019 współpracuje z ośrodkiem badawczym NCBJ w Świerku przy projekcie budowy systemu synchronizacji akceleratora PolFEL. Jak dotąd Doktorant nie ubiegał się o nadanie stopnia doktora.

W przedłożonej rozprawie doktorskiej, której promotorem jest pan dr hab. inż. Krzysztof Czuba, prof. PW, Doktorant podejmuje zagadnienie stabilizacji długoterminowych dryftów fazy sygnałów wysokiej częstotliwości stosowanych jako referencja w akceleratorach cząstek. Nowoczesne akceleratory są złożonymi systemami, w których sygnały wysokiej częstotliwości przesyłane są do wielu urządzeń na odległości rzędu setek metrów i większe. Jednocześnie wymagana jest stabilizacja czasu propagacji na poziomie piko- i femtosekund. Ze względu na wpływ czynników zewnętrznych, takich jak chociażby zmienność temperatury w trakcie eksperymentu, wymagane jest stosowanie aktywnych systemów kompensujących zmiany przesunięć fazowych w ww. przewodach. Jak podaje Autor, wybór metody kompensacji jest kompromisem pomiędzy jakością, ponoszonymi kosztami i niezawodnością. Nie istnieje zatem rozwiązanie uniwersalne, a poszczególne systemy muszą być skrojone na miarę konkretnego akceleratora. Biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój nauk wykorzystujących akceleratory cząstek, takich jak fizyka wysokich energii, materiałoznawstwo,

biochemia, farmakologia, czy też medycyna, zagadnienie, któremu poświęcona jest rozprawa jest aktualne i istotne z naukowego punktu widzenia.

W szczególności recenzowana rozprawa przedstawia prace związane z opracowaniem oraz wdrożeniem dwóch systemów dystrybucji sygnałów referencyjnych dla liniowych akceleratorów. Pierwszy z nich to *European-XFEL* znajdujący się w centrum badawczym DESY w Hamburgu w Niemczech. Drugi znajduje się w ESS w Lund w Szwecji. W przedłożonej rozprawie, mającej charakter wyraźnie eksperymentalny, Doktorant przedstawia analizę wymagań stawianych systemowi stabilizacji oraz ograniczeń wynikających z budowy akceleratora, a następnie proponuje dwa rozwiązania układowe. W dalszej części zostały one zrealizowane i zweryfikowane w warunkach laboratoryjnych z użyciem komory klimatycznej, a jeden z nich został zainstalowany w docelowym akceleratorze.

2. Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim. Składa się ona z sześciu zasadniczych rozdziałów, które poprzedzone są streszczeniem w języku angielskim oraz polskim, a także wykazem skrótów stosowanych w rozprawie. W końcowej części Autor zamieścił wykaz swoich publikacji z wyszczególnieniem tych, związanych bezpośrednio z tematem rozprawy oraz bibliografię liczącą 125 pozycji, z której umiejętnie korzysta. Całość rozprawy stanowi 80 stron. Ogólna struktura jest dobrze przemyślana i w umiejętny sposób wprowadza czytelnika w podjęte zagadnienia badawcze. Jednocześnie Autor stosuje język zwięzły i zrozumiały, poparty właściwymi schematami, wykresami, czy też fotografiami, które ułatwiają odbiór treści. Ponadto, strona edytorska pracy na ogół jest wysokiej jakości. Przykładowo stosowana w schematach kolorystyka połączeń komponentów odzwierciedla propagację sygnałów wysokiej częstotliwości, dzięki znacznie łatwiej jest zaznajomić się z funkcjonalnością opracowanych rozwiązań.

Recenzowana rozprawa rozpoczyna się wprowadzeniem (rozdz. 1. *Introduction*), w którym Autor nakreśla kontekst poprzez krótki opis liniowych akceleratorów cząstek oraz tłumaczy potrzebę stosowania aktywnych systemów dystrybucji sygnałów synchronizacyjnych (*PRDS – Phase Reference Distribution Systems*). W tym miejscu Autor odnosi się również do systemów optycznych, jednak wskazuje, iż stosowanie systemów z wykorzystaniem przewodów koncentrycznych jest bardziej uzasadnione. W dalszej części Doktorant formułuje dwa cele badawcze recenzowanej rozprawy:

1. Opracowanie metod aktywnej kompensacji na potrzeby akceleratorów cząstek, które zmniejszą dryft fazy sygnału wysokiej częstotliwości w przewodach koncentrycznych o przynajmniej jeden rząd wielkości,
2. Opracowanie metod automatycznej regulacji i monitorowania systemów ww. kompensacji, które nie wymagają operatora i umożliwiają pełny podgląd aktualnego stanu systemu.

Rozdział zakończony jest krótkim opisem struktury rozprawy.

Drugi rozdział (*Theoretical background*), o długości zaledwie pięciu stron, przedstawia czytelnikowi podstawy teoretyczne niezbędne do zrozumienia dalszej, badawczej i zasadniczej części rozprawy. Jest tu zdefiniowana krótko- i długo-terminowa stabilność. W tej części Autor odwołuje się również do standardów pomiarów niestabilności długoterminowych, jak np. wariancja Allana. Niemniej jednak w dalszej części rozprawy Doktorant nie stosuje tej miary, a jako miarę uzyskanych rezultatów stosuje różnice między maksymalną i minimalną odchyłką mierzonej fazy sygnału. Pod koniec rozdziału omówione zostały przyczyny niestabilności fazy sygnałów przesyłanych w kablach koncentrycznych.

W rozdziale trzecim (*Phase reference distribution methods*) Autor przedstawia zwięzły przegląd rozwiązań obecnie stosowanych w akceleratorach. Wprowadza tu podział na trzy zasadnicze

kategorii systemów, tj. pasywne, półaktywne oraz aktywne. Omówione przykłady są ilustrowane schematami blokowymi. Niestety w niektórych przypadkach, jak np. na rys. 7 schemat jest dość szczegółowy, co przy skali wydruku ogranicza jego czytelność. Zdaniem recenzenta zastanawiający w tym rozdziale jest też opis SNS (*Spallation Neutron Source*) w sekcji 3.2.2, gdzie Autor pisze o linii posiadającej 424,7 m długości z dziesięcioma sprzęgaczami kierunkowymi oraz o linii o długości 286,8 m, która posiada 123 strojone sprzęgacze kierunkowe. Nie jest jasne czy sprzęgacze te rozumiane są jako obwody wejściowe systemów stabilizacji fazy czy też mają inne znaczenie, gdyż w opisie poprzednich rozwiązań Autor odnosił się wprost do „systemów” (np. w sekcji 3.2.1), a nie do poszczególnych komponentów składowych, sugerując ich konkretne funkcje lub wpływ.

Rozdział czwarty wraz z piątym stanowią zasadniczy trzon rozprawy, w których Doktorant przedstawia autorskie systemy aktywnej kompensacji dryftu fazy w systemach dystrybucji. Rozdział czwarty (*Interferometric compensation method for European XFEL*) poświęcony jest interferometrycznej kompensacji opracowanej na potrzeby akceleratora European XFEL. Jest to rozwinięcie metody przedstawionej w sekcji 3.3.1 i w referencji [72]. Wkład naukowy Autora można podsumować jako wzbogacenie architektury systemu o możliwości kalibracyjne, w tym odłączanie sygnału odbitego od końca linii, czy sposób poprawy izolacji między sygnałem bezpośrednim (FWD) a odbitym (RFL), a także samą procedurę kalibracji pokazaną schematycznie na rys. 23. Przedstawiona została analiza współczynnika kompensacji w zależności od położenia sprzęgacza kierunkowego przy jego ograniczonej kierunkowości (dla rys. 20 przyjęto 10 dB kierunkowości). Zdaniem recenzenta analizę tę można by przedstawić w nieco bardziej obszernej formie, z uwzględnieniem kilku wartości kierunkowości, dopasowania impedancyjnego i ew. innych parametrów, mając na uwadze wartości rzeczywistych układów stosowanych w systemie. W analizie najprawdopodobniej pominięto również wielokrotne odbicia sygnałów. Zdaniem recenzenta nie jest jasne czy rozpatrywany był wpływ odbić wynikających z nieidealnego dopasowania impedancyjnego w odniesieniu np. do strat wtrąceniowych przewodów. Takie rozważania mogłyby zwiększyć wartość naukową treści przedstawionej w rozdziale. W dalszej części Autor przedstawia szczegóły dotyczące wykonania poszczególnych modułów systemu. Opisuje także laboratoryjne stanowisko pomiarowe i wyniki pomiarów dryftu fazy w trakcie 80-godzinnej pracy systemu z przewodem koncentrycznym umieszczonym w komorze klimatycznej. Uzyskane wyniki w bezpośredni sposób potwierdzają skuteczność opracowanej metody, gdyż dryft fazy zmniejszony został 200-krotnie.

W rozdziale piątym (*Active compensation method for European Spallation Source*) Doktorant przedstawia system opracowany na potrzeby ESS, w którym ze względu na ograniczenia wynikające z aspektów radiacyjnych część aktywna systemu kompensacji musi być zredukowana. Podobnie jak w rozdziale poprzednim Autor zwięźle przedstawia koncepcję układu pomiarowego wraz ze schematami, następnie opisuje sposób wykonania podzespołów systemu i prezentuje wyniki pomiarów z użyciem komory klimatycznej, w której znajduje się przewód koncentryczny. Nie jest jednak jasne, dlaczego w sekcji 5.3 poświęconej opisowi systemu przedstawiony został system (rys. 33) różniący się od dwóch systemów poddanych weryfikacji eksperymentalnej, które widnieją na rysunkach 36 i 39. W rozdziale zatem przedstawione są trzy rozwiązania, z czego zweryfikowane zostały dwa. Należy tu podkreślić, iż na drodze eksperymentalnej wykazano, że oba systemy działają poprawnie, niemniej jednak taki opis jest nieco mylący. W końcowej części rozdziału opisano wdrożenie systemu w akceleratorze ESS. System ten wyposażony został w interfejs graficzny, za pomocą którego obserwować można aktualny jego stan i sposób pracy. Jednak przedstawiony na rys. 43 schemat systemu (jako zrzut ekranu przedstawiający okno dedykowanej aplikacji) odnosi się do pierwszej wersji systemu, które nie podlegała weryfikacji eksperymentalnej.

Rozdział szósty (*Summary*) stanowi podsumowanie całości rozprawy, w której Autor stwierdza osiągnięcie obu założonych celów rozprawy. Dalej znajduje się spis publikacji Autora oraz bibliografia rozprawy.

3. Główne osiągnięcia

Głównym osiągnięciem Doktoranta jest niewątpliwie opracowanie dwóch systemów kompensacji dryftu fazy sygnałów w przewodach koncentrycznych. Uzyskany na drodze weryfikacji eksperymentalnej współczynnik stabilizacji wynosi, zależnie od systemu, od 20 do 200, co należy uznać za wyniki bardzo dobre. O istocie podjętego i zrealizowanego z powodzeniem zagadnienia świadczy publikacja Doktoranta w prestiżowym czasopiśmie *Nature Photonics* (5-letni współczynnik wpływu 38,2; 231 cytowań wg *Web of Science*), w której podano: "*Commissioning of the RF system was given highest priority in the early phase of the linac operation*" (Uruchomienie systemu RF [stabilizacji dryftu fazy] obdarzono najwyższym priorytetem w początkowej fazie pracy akceleratora). Stwierdzenie to pokazuje jak istotnego zagadnienia podjął się Doktorant. Uczestniczenie młodego naukowca w tak dużych konsorcjach badawczych jest niewątpliwie jego dużym osiągnięciem. Wprawdzie ww. publikacja dotyczy szerszej perspektywy uruchomienia całego akceleratora, a Doktorant jest jednym z jej 483 współautorów, niemniej jednak znaczenie systemu stabilizacji fazy, którego jest autorem jest w niej wyraźnie zaznaczony. Podobnie, jako główne osiągnięcie należy zdaniem recenzenta opracowanie i wdrożenie systemu stabilizacji fazy na potrzeby Europejskiego Źródła Spalacji ESS. Wdrożenie autorskiego systemu w tak dużym i nowoczesnym ośrodku stanowi chyba najlepszy dowód skuteczności i przydatności jego działania.

Do głównych osiągnięć należy zaliczyć również dorobek naukowy Doktoranta, na który składają się 34 publikacje. Na dzień pisania niniejszej recenzji 10 pozycji jest widocznych w bazie *Web of Science*. Wg tejże bazy współczynnik Hirscha wynosi 4, a całkowita liczba cytowań to 276. Wśród nich znajduje się publikacja w prestiżowym czasopiśmie *IEEE Transactions on Nuclear Science* (5-letni współczynnik wpływu 1,9; 4 cytowania) oraz w *Acta Physica Polonica A* (5-letni współczynnik wpływu 0,7; 21 cytowań). Ze względu na wieloautorski charakter publikacje takie jak ta w *Nature Photonics* bywają wykluczone z listy podlegającej ocenie dorobku pojedynczego naukowca. Wówczas indeks H wynosi 3, a całkowita liczba cytowań to 45. Nawet te wyniki należy uznać za co najmniej dobre i adekwatne do stopnia kariery naukowej Doktoranta.

4. Słabe strony rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska w opinii recenzenta charakteryzuje się bardzo wysoką jakością merytoryczną. Ponadto jej układ jest przejrzysty i logiczny, a sposób zredagowania profesjonalny. Niemniej jednak recenzent dostrzega kilka uchybień, które przedstawione zostały poniżej:

- a) Rozprawa dotyczy stabilizacji dryftu fazy, a elementem wykonawczym w każdym przypadku są przesuwniki fazy. W rozprawie nie podano żadnych konkretnych rozwiązań układowych przesuwników. Biorąc pod uwagę wysokie wymagania stawiane opracowanym systemom, zdaniem recenzenta w pracy powinny znaleźć się informacje na temat przynajmniej podstawowych parametrów stosowanych przesuwników fazy i sposobu ich sterowania.
- b) Wspomniane w punkcie 4.a przesuwniki fazy posiadają skończony zakres przestrajania. W rozprawie Autor nie poruszył kwestii związanych z długofalową pracą systemu w sytuacji, gdy jeden bądź więcej przesuwników fazy znajduje się na skraju zakresu. Czy skokowa zmiana o 360 stopni jest dopuszczalna? W rozprawie wspomniano, iż nagłe zmiany fazy są niepożądane.
- c) W rozdziale 3 przedstawiony jest przegląd systemów pracujących na różnych częstotliwościach. Ponadto, w rozdziałach 4 i 5 opracowane przez Doktoranta systemy działają na jeszcze innych, różniących się częstotliwościach. Natomiast w rozprawie brak jest informacji na jakiej podstawie dokonuje się doboru częstotliwości pracy dla danego akceleratora. Taka

informacja zawarta np. w rozdziale trzecim stanowiła by wartościowe uzupełnienie obecnej treści rozprawy.

- d) W systemie interferometrycznym sumowanie faz sygnału pierwotnego i odbitego prowadzi do okresowych zaników sygnałów wynikającą z rozkładu fali wzdłuż przewodu. Efekt ten jest zależny od strat wtrąceniowych, dopasowania impedancyjnego i przesunięć fazowych poszczególnych komponentów. W rozdziale 4 Autor nie odnosi się do tego rodzaju zjawisk. Czy są one niezauważalne lub pomijalne, np. ze względu na dużą tłumienność, czy też może system poprawy kierunkowości sprzęgaczy eliminuje ten efekt?
- e) Drobne uwagi edytorskie:
- W streszczeniu brak jest rozwinięcia skrótów XFEL oraz ESS. Są one wyjaśnione w wykazie skrótów, jednak streszczenie (abstrakt) bywa traktowane odrębnie.
 - W streszczeniu sformułowanie „(...) synchronizacji fazowej z precyzją rzędu femtosekund” jest niewłaściwe. Femtosekundy stanowią miarę czasu, np. opóźnienia propagacji sygnału, miarą fazy sygnału są stopnie bądź też radiany.
 - W rozprawie słowo „precyzja” jest często stosowane zamiast terminu „dokładność”, o którą zapewne chodzi Autorowi.
 - W sekcji 1.4 wyrażenie „(...) to suppress (...) by at least an order of magnitude” powinno być zastąpione przez “(...) at least one order of magnitude”.
 - Oznaczenia niektórych elementów na schematach w rozprawie nie są jednorodne, np. przesuwniki fazy na schematach przedstawionych na rys. 18 i 33.

W podsumowaniu do powyższych uwag należy dodać, że mają one charakter drugorzędny i nie umniejszają osiągnięć Doktoranta, ani też nie utrudniają odbioru treści pracy.

5. Wniosek końcowy

W świetle powyższych osiągnięć recenzent stwierdza, iż rozprawa doktorska pana mgr inż. Dominika Sikory zatytułowana „*Precise Phase Drift Stabilization in RF Phase Reference Distribution Systems of Particle Accelerators*” jest oryginalną pracą badawczą, w której Doktorant zrealizował zakładane cele badawcze. Zważywszy na fakt, iż została ona zwieńczona wdrożeniem w Europejskim Źródle Spalacyjnym, zdaniem recenzenta należy ona do kategorii D: „spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem”. Jej tematyka bardzo dobrze wpisuje się w zakres dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, w szczególności w zakresie Elektroniki. Spełnia ona wszelkie warunki określone w artykule 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i może zostać dopuszczona do publicznej obrony.



podpis

