

**Prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski**

Politechnika Poznańska

Wydział Informatyki

Instytut Automatyki i Sterowania

Zakład Układów Elektronicznych

i Przetwarzania Sygnałów

## **OCENA**

rozprawy doktorskiej pt.: „*Reconstruction of signals sampled at sub-Nyquist rate using event-based sampling*”

Pana **mgra inż. Dominika Rzepki**

### **1 Ocena doboru tematu i zakresu przeprowadzonych badań**

Tematem ocenianej rozprawy jest analiza, uporządkowanie i przyczynki do ulepszenia metod rekonstruowania sygnałów o ograniczonym paśmie (w tym sygnałów pasmowych) z sekwencji ich próbek uzyskanych w procesach nierównomiernego próbkowania, zwłaszcza w procesach sterowanych samymi przebiegami próbkowanych sygnałów. Doktorant rozważał zwłaszcza procesy próbkowania o średnich szybkościach poniżej szybkości Nyquista. Analizowane procesy próbkowania Doktorant określił w wersji polskojęzycznej streszczenia rozprawy jako „próbkowanie wyzwalane zdarzeniami” (PWZ), co jest bezpośrednim tłumaczeniem znanego angielskiego określenia „event-triggered sampling” (ETS), które było używane w całym tekście, napisanym w języku angielskim.

Mimo iż rozważne w rozprawie zagadnienia próbkowania są badane od dawna i należą do dobrze rozpoznanych zagadnień naukowych, to tematykę rozprawy zwłaszcza w obszarze próbkowania wyzwalanego zdarzeniami oceniam wysoko. Szczególnie istotne jest skoncentrowanie się na badaniu aspektów związanych z próbkowaniem nierównomiernym zwłaszcza sygnałów losowych, gdyż jest to w pełni aktualny problem naukowy a ponadto zagadnienie o dużym znaczeniu aplikacyjnym.

Zakres przeprowadzonych i przedstawionych w ocenianej rozprawie doktorskiej badań jest jednak, moim zdaniem, nadmiernie szeroki, co z jednej strony stanowiło nazbyt, moim zdaniem, ambitne wyzwanie dla Doktoranta, z którym sobie wszakże bardzo dobrze poradził, a z drugiej — spowodowało zbyt duże zagęszczenie tekstu rozprawy szczegółami, które, siłą rzeczy, zostały przedstawione jedynie skrótowo.

### **2 Ocena celu badań i sformułowanej tezy naukowej**

Doktorant uzasadnił istotność, a także swoją motywację do podjęcia przeprowadzonych badań w rozdziale 1 pt. „Introduction”. Nie sformułował jednak w sposób jawny celu/celów badawczych, choć celowość przeprowadzonych badań nie budzi wątpliwości.

Tekst rozprawy nie zawiera też w sposób jawny sformułowanej tezy naukowej. Można jednak przyjąć, że jej opis stanowi ostatni akapit rozdziału pt. „Introduction”, który w skrócie można przetłumaczyć następująco:

„Pomysły przestudiowane w przedłożonej rozprawie doktorskiej pozwalają na opracowanie bardziej efektywnych, wyzwalanych zdarzeniami systemów próbkowania i algorytmów rekonstrukcji sygnałów ...”

Uważam zatem, że Pan mgr inż. Dominik Rzepka podjął się opracowania ciekawego i ważnego zadania polegającego na ulepszeniu metod próbkowania wyzwalanego przebiegami sygnałów a następnie ich rekonstrukcji i przedstawił nowoczesne oraz przyszłościowe rozwiązania tego problemu. Zatem zarówno cele badań jak i tezę naukową (które, mimo braku ich jawnego sformułowania, można wywieść z tekstu) oceniam bardzo pozytywnie.

### **3 Ocena tekstu rozprawy i sposobu przedstawienia wyników**

Jak już wspomniałem, recenzowana rozprawa została napisana w języku angielskim. Jej tekst zawiera 141 stron i oprócz umieszczonych na samym początku podziękowań (w języku angielskim i w języku polskim), streszczenia (w języku angielskim i w języku polskim) oraz spisu treści, składa się z 6-ciu rozdziałów, stanowiących główną część pracy, w tym z wprowadzenia (rozdział 1) oraz z uwag końcowych (rozdział 6), a także ze spisu rysunków i bibliografii. Istotną wadą zmatematyzowanego tekstu rozprawy jest brak, bardzo w takim przypadku przydatnych: wykazu zastosowanych oznaczeń oraz wykazu skrótów.

We wprowadzeniu, o czym już pisałem, Doktorant uzasadnił istotność podjętych badań i określił ich przedmiot. W rozdziale drugim i trzecim opisał ogólną teorię próbkowania sygnałów pasmowych.

Główną część rozprawy, w której Pan mgr inż. Dominik Rzepka przedstawił oryginalne wyniki swoich badań i eksperymentów numerycznych, stanowią rozdziały: 4-ty, poświęcony rekonstrukcji sygnałów przy użyciu „informacji ukrytej” oraz 5-ty na temat rekonstrukcji sygnałów niestacjonarnych o zmiennej szerokości pasma.

Kompozycja rozprawy nie jest, moim zdaniem, właściwa. Doktorant rozpoczyna rozdział 3 od próby ogólnego opisu i skrupulatnego usystematyzowania zagadnień próbkowania i rekonstrukcji sygnałów, lecz nie jest to próba w całości udana, a poza tym myśl przewodnia ginie w gąszczu szczegółów. Dopiero punkt 5.1, będący wstępem do rozdziału 5, jest właściwym wprowadzeniem do rozprawy, w którym omówiono przykłady rozważanych sygnałów i ich praktyczne znaczenie. Ten tekst powinien być umieszczony znacznie wcześniej. Podobnie część tekstu punktu 4.1, rozpoczynającego rozdział 4, powinna znaleźć się na początku rozprawy.

Rozważania matematyczne są na ogół przedstawione z wymaganą starannością (z pewnymi wyjątkami, które omówiłem w punkcie pt.: „Wybrane uwagi szczegółowe”), chociaż wspomniany brak wykazu zastosowanych oznaczeń oraz wykazu skrótów znacznie utrudnił czytanie tekstu i śledzenie myśli Doktoranta.

Język rozprawy jest zrozumiały i raczej poprawny, choć zawiera męczące czytelnika wady, zwłaszcza polegające na nieprawidłowym użyciu przedimków. Zrozumienie zasad użycia przedimków w języku angielskim jest proste i nie powinno być problemem dla osoby o tak dużych zdolnościach matematycznych jak Doktorant. Jego kłopoty w tym względzie są więc dla

mnie całkowicie niezrozumiałe. Dziwi mnie zwłaszcza używanie przedimków nieokreślonych „a” i „an” przed rzeczownikami w liczbie mnogiej. Przecież wystarczy pamiętać, że przedimki te są uproszczoną wersją przedimków „ein”, „eine” w językach germańskich i oznaczają to samo (przynależność obiektu do kategorii), czyli „jeden”, „jedna”, „jedno” z spośród w języku polskim.

Reasumując, tekst rozprawy (poza drobnymi niedociągnięciami, które nie zmniejszają ogólnego pozytywnego wrażenia) a także sposób przedstawienia wyników zasługują na ocenę pozytywną.

## 4 Ocena uzyskanych wyników

Zamieszczone w rozprawie wyniki prac, w których upatruję istotny wkład jej Autora, to:

- skuteczne zastosowanie funkcji Slepiana zerowego rzędu do przybliżonej i szybkiej rekonstrukcji sygnałów pasmowych, algorytm Doktoranta charakteryzuje się zredukowaną złożonością obliczeniową nawet do liniowej
- opracowanie iteracyjnych metod rekonstrukcji sygnałów z wykorzystaniem tzw. „informacji ukrytej” za pomocą rzutowania na zbiory wypukłe — Doktorant zaproponował i rozważył cztery strategie zestawione w tabeli 4.1 na str. 52
- opracowanie skutecznych metod szacowania średniej szerokości pasma sygnałów niestacjonarnych o zmiennym paśmie na podstawie statystyki przekraczania przez sygnał określonych wartości, przy wykorzystaniu nierówności Czebyszewa i Gaussa
- zaproponowanie metody estymacji szerokości zmiennego w czasie pasma sygnału i zastosowanie jej do ulepszenia procedury rekonstrukcji sygnału przy wykorzystaniu tzw. „informacji ukrytej”.

Oceniając te wyniki uważam, że są one oryginalne i bardzo ważne dla dalszego rozwoju metod próbkowania i rekonstrukcji sygnałów. Doktorant wykazał się pomysłowością i bardzo dobrą znajomością rozpatrywanej problematyki, a także dużymi zdolnościami matematycznymi, pracowitością, systematycznością i konsekwencją w osiągnięciu zaprezentowanych wyników badań.

## 5 Wybrane uwagi szczegółowe

Poniżej zebrałem niektóre uwagi szczegółowe, które nasunęły mi się podczas czytania tekstu rozprawy:

- str. IX (wiersz 3<sup>g</sup>): sformułowanie „We propose ...” w pracy, która ma jednego autora, jest nie na miejscu
- str. IX (wiersz 10<sub>d</sub>): Doktorant zamiennie używa dwóch wariantów zapisu nazwiska Czebyszew w języku angielskim, a mianowicie: „Chebyshev”, wynikającego z przybliżenia brzmienia tego nazwiska w języku rosyjskim i „Chebyshev” (np. na str. 3), wynikającego z zasad poprawnej transkrypcji. W publikacjach w językach angielskim, niemieckim, francuskim i innych można znaleźć jeszcze wiele innych wariantów zapisu tego nazwiska.

W jednej pracy należy jednak zdecydować się konsekwentnie na jeden wariant. Moim zdaniem za właściwy w języku angielskim jest obecnie uważany jedynie zapis „Chebyshev”

- str. XI (wiersz 3<sup>g</sup>): moim zdaniem prawidłowym tłumaczeniem na język polski określenia „Nyquist rate” jest „szybkość Nyquista” a nie „częstość Nyquista”
- str. XI (wiersz 12<sub>d</sub>): zamiast „zalezy” powinno być „zależy”
- str. XI (wiersz 10<sub>d</sub>): zamiast „Gauss” powinno być „Gaussa”
- str. XI (wiersz 5<sub>d</sub>): zamiast „częstość” powinno być „częstości”
- str. 1 (wiersz 14<sub>d</sub>): zamiast „of signal” powinno być „of the signal”
- str. 2: na tej stronie występuje szereg błędnych zapisów typu „the Chapter ...” np. „In the Chapter 4 ...” i jeden prawidłowy „from Chapter 4”
- str. 2 (wiersz 7<sub>d</sub>): zamiast „shows” powinno być „show”
- str. 2 (wiersz 5<sub>d</sub>): zamiast „in last, summarizing Chapter 6” powinno być „in the last, summarizing Chapter 6”
- str. 8 (wiersze 17, 18<sub>d</sub>): w zdaniu jest kilka błędów gramatycznych
- str. 8 (wiersz 4<sub>d</sub>): zamiast „another examples” powinno być „other examples”
- str. 9 (wiersz 16<sup>g</sup>): wielkość czcionki powołania na pozycję literatury [Miśkowicz, 2006] jest za mała
- str. 10 (wiersz 4<sup>g</sup>) i dalsze: „exemplary” oznacza „przykładowy”, „wzorcowy”, zaś „przykładowy” to np. „illustrative”
- str. 11 (wiersz 14<sup>g</sup>): Autor oznacza „Nyquist rate” jako  $f_s$  (nawiasem mówiąc poprawniej byłoby  $f_s$ , bo indeks s nie jest zmienną a pierwszą literą wyrazu „sampling”) i wprowadza pojęcie „Nyquist frequency” w rozumieniu największej częstotliwości w widmie sygnału, co z kolei oznacza jako  $f_{NYQ}$  (znowu poprawniej byłoby  $f_{NYQ}$ ). Do tego miejsca wszystko wydaje się poprawne, ale niestety podany jest też wzór

$$f_{NYQ} = \frac{\Omega}{\pi}$$

bez zdefiniowania wielkości  $\Omega$ . Na stronie 20 okazuje się, że częstotliwości widma sygnału spełniają zależność

$$\omega \in [-\Omega, \Omega] \text{ rad/s}.$$

Zatem poprawny wzór to

$$f_{NYQ} = \frac{\Omega}{2\pi}.$$

- str. 19: rysunek 3.1 ilustrujący zawieranie się rozważanych podprzestrzeni przestrzeni Hilberta  $\mathcal{H}$  jest błędny, ponieważ sugeruje, że niektóre podprzestrzenie są rozłączne, a przecież wszystkie podprzestrzenie jednej przestrzeni mają wspólny wektor zerowy

- str. 20: tabela 3.2 jest niepoprawna, ponieważ w matematyce nie definiuje się niepotrzebnych pojęć i nie stosuje niepotrzebnych operacji, a takimi są: pojęcie liczby sprzężonej  $\bar{x}$  do liczby rzeczywistej  $x$  i operacja sprzężenia w podanych definicjach iloczynów skalarnych (poza pierwszym wierszem tej tabeli)
- str. 21 (wiersz 7<sup>g</sup>): w pracach dotyczących przetwarzania sygnałów dobrym obyczajem jest stosowanie znormalizowanej funkcji próbkowania (sinus cardinalis)

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

a nie wersji nieznormalizowanej

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x},$$

którą używa Doktorant

- str. 22: wektor  $\mathbf{x}$  w zależności (3.15) na podstawie drugiego wiersza tabeli 3.2 ma postać

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \vdots \\ x_n \\ \vdots \end{bmatrix}.$$

Zależność (3.15) należałoby więc uzupełnić o ostatni, wyjaśniający człon

$$= \begin{bmatrix} \vdots \\ x_{-1} \\ x_0 \\ x_1 \\ \vdots \end{bmatrix}.$$

- str. 22 (wiersz 15<sub>d</sub> i dalsze): Doktorant stosuje niepoprawne określenie „sampling frequency” („częstotliwość próbkowania”) zamiast poprawnego „sampling rate” („szybkość próbkowania”), choć jednocześnie, wykazując na szczęście brak konsekwencji, używa poprawnego określenia „Nyquist rate” („szybkość Nyquista”)<sup>1</sup>
- str. 23 (wiersze 1 i 14<sub>d</sub>): Autor w jednym miejscu pracy tym samym symbolem  $\alpha$  oznacza liczby wzajemnie odwrotne, co jest niedopuszczalne

---

<sup>1</sup>Jestem przeciwnikiem stosowania nazwy „częstotliwość próbkowania” i mierzenia jej w hercach (Hz). Jest to niepoprawne i prowadzi do nieporozumień. Należy bowiem rozróżniać pojęcia: „częstotliwość” jako właściwość sygnału i „szybkość” jako właściwość procesu wykonywanego nad sygnałem (w omawianym przypadku procesu próbkowania) i powstałego strumienia danych. Dlatego należy wyłącznie stosować określenie „szybkość próbkowania” i należy ją mierzyć w próbkach na sekundę (S/s), podobnie jak szybkość binarnego strumienia danych mierzy się w bitach na sekundę (b/s), a nie w hercach. Dzięki temu można jednoznacznie rozróżniać powszechnie stosowane pojęcia: „częstotliwość Nyquista” i „szybkość Nyquista”, co na szczęście Doktorant robi. Przez częstotliwość Nyquista rozumie się maksymalną częstotliwość widma sygnału dolnopasmowego, który można próbować z określoną szybkością, a przez szybkość Nyquista — minimalną szybkość, z którą można próbować sygnał dolnopasmowy o określonej maksymalnej częstotliwości widma. Skutkiem stosowania niepoprawnego terminu „częstotliwość próbkowania” jest niejednoznaczność pojęcia „częstotliwość Nyquista”.

- str. 25 (wiersze 3 i 4<sup>g</sup>): oznaczenie gwiazdką (czyli przez  $\mathcal{S}^*$ ) transpozycji operatora  $\mathcal{S}$  jest decyzją kontrowersyjną i mylącą
- str. 25 (wiersz 12<sub>d</sub>): zbitka sąsiadujących oznaczeń (symbolu  $\Omega$  i bezpośrednio za nim odnośnika <sup>3</sup>), tworzących w efekcie zapis  $\Omega^3$  jest bardzo niekorzystna i myląca
- str. 26: oznaczenia  $\mathbf{S}^{-1}$ , występującego w podpisie rysunku 3.5, nie ma na rysunku
- str. 26 (wiersz 10<sup>g</sup>): uwaga „... in (3.24) no inversion is required ...” jest niesłuszna, ponieważ odwrócenie jest konieczne, ale ze względu na ortogonalność bazy polega ono jedynie na transpozycji operatora (dzięki czemu najpierw w wierszach a następnie w kolumnach są te same funkcje składowe) i na normalizacji współczynnikiem  $\Omega/\pi$
- str. 28 (wiersz 5<sup>g</sup>) i podobnie w wielu innych: zamiast „a sets” powinno być „sets”
- str. 29 (wiersz 1<sup>g</sup>): stwierdzenie, że liczba stopni swobody jest równa  $N = 2M + 1$  nie jest ścisłe. Liczba stopni swobody jest oczywiście równa  $N$ , ale tylko gdy  $N$  jest liczbą nieparzystą sygnał jest utworzony ze składowej stałej i harmonicznych o dwóch stopniach swobody, a więc  $N = 2M + 1$ , czyli  $M = (N - 1)/2$ . Jeśli jednak  $N$  jest liczbą parzystą, to po odjęciu składowej stałej pozostaje nieparzysta liczba stopni swobody, w sygnale istnieje harmoniczna o maksymalnej częstotliwości (częstotliwości Nyquista) i jest ona związana tylko z jednym stopniem swobody. Jeśli w tym przypadku chcemy sygnał  $x(t)$  zapisać za pomocą wzoru (3.35), to jeden wyraz szeregu Fouriera trzeba sztucznie podzielić na dwa  $f_{-M}$  i  $f_M$  np. po połowie. W tym przypadku liczba harmonicznych to  $M = ((N - 1) + 1)/2$ , czyli liczba stopni swobody jest równa  $N = 2M$
- str. 29 (wiersz 13<sub>d</sub>): zamiast „a operator” powinno być „an operator”
- str. 37 (wiersz 3<sub>d</sub>): sformułowanie „In case of solving a system of linear equations  $\mathbf{S}\mathbf{c} = \mathbf{x}$  the condition number of a matrix  $\mathbf{S}$  is given by ...” jest nieprawidłowe, bo definicji wskaźnika uwarunkowania macierzy nie uzależnia się od przypadku rozwiązywania równania macierzowego a jedynie wykorzystuje się do badania wrażliwości rozwiązań tego równania
- str. 38 (wiersz 13<sub>d</sub>): zamiast „Due to minimum ...” powinno być „Due to the minimum ...”
- str. 38 (wiersz 10<sub>d</sub>): co oznacza sformułowanie „... signal on is ...”?
- str. 42 (wiersz 5<sub>d</sub>): dlaczego Autor z zaskoczenia korzysta ze znormalizowanej funkcji

$$\text{sinc } t = \frac{\sin(\pi t)}{\pi t}$$

i jeszcze normalizuje częstotliwość, przyjmując  $\Omega = \pi$ ?

- str. 50 (wiersz 7<sub>d</sub>): zamiast „a deeper” powinno być „deeper”
- str. 51 (wiersz 5<sub>d</sub>): zamiast „as an equality constraints” powinno być „as equality constraints”
- str. 51 (wiersz 2<sub>d</sub>): zamiast „a four strategies” powinno być „four strategies”

- str. 55 (wiersz 4<sub>d</sub>): zamiast „a several” powinno być „several”
- str. 55 (wiersze 1–3<sub>d</sub>): zdanie ma wady gramatyczne
- str. 56 (wiersz 1<sup>s</sup> i dalsze): mimo, iż określenie „band-pass signal” jest wzięte z literatury, to ze względu na jego niedorzeczność (sygnał jako taki nie może być pasmowo-przepustowy) proponowałbym na przyszłość lansowanie nazwy „band-pass formed signal” lub „band-pass filtered signal”
- str. 61 (wiersz 4<sub>d</sub>): stosowana definicja funkcji sinc była już podana na str. 21
- str. 65 (wiersz 5<sub>d</sub>): zamiast „sine” powinno być „sinc”
- str. 74 (wiersz 2<sup>s</sup>): wyraz „recovery” jest dwa razy powtórzony
- str. 77 (wiersz 1<sub>d</sub>): zamiast „in the Chapter 5” powinno być „in Chapter 5”
- str. 104 (wiersz 1<sub>d</sub>): w kilku miejscach pracy pojawia się określenie „time instant”. To jest określenie nadmiarowe, bo każda chwila to „chwila czasowa”
- str. 104 i 105: w podpisach rysunków 5.16 i 5.17 zamiast  $\int_0^T \Omega(t) - \hat{\Omega}(t) dt$  powinno być  $\int_0^T (\Omega(t) - \hat{\Omega}(t)) dt$
- str. 116: podobna uwaga do powyższej dotyczy mianownika wzoru (5.116)
- str. 118 (wiersz 1<sub>d</sub>): zamiast „in details” powinno być „in detail”
- str. 122 (wiersz 3<sup>s</sup>): zamiast „a guidelines” powinno być „guidelines”
- str. 122 (wiersz 15<sub>d</sub>): zamiast „a future studies” powinno być „future studies”.

## 6 Konkluzja

Podsumowując powyższą charakterystykę recenzowanej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Pan mgr inż. Dominik Rzepka zamieścił w niej bardzo wartościowe, oryginalne wyniki prac przeprowadzonych przez Niego pod kierunkiem Promotora rozprawy Pana dra hab. inż. Marka Miśkowicza oraz Promotora pomocniczego Pana dra inż. Dariusza Kościelnika. Oceniam, że Doktorant osiągnął zakładane cele badawcze i wykazał prawdziwość stawianej tezy naukowej. Wymienione przeze mnie w poprzednim punkcie szczegółowe uwagi krytyczne mają znaczenie drugorzędne i nie zmniejszają wartości osiągniętych i przedstawionych w rozprawie wyników.

Na zakończenie stwierdzam, że przedłożona praca spełnia wymagania stawiane przez stosowne przepisy rozprawom doktorskim. Uważam zatem, że Doktorant powinien być dopuszczony do dalszych etapów procedury doktorskiej i do publicznej obrony.

