

Dr hab. inż. Mirosław Klinkowski, prof. IŁ-PIB  
Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy  
Oddz. we Wrocławiu

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Sosnowskiego  
„Metody analityczne wspomagające projektowanie izolowanych  
łączy wirtualnych w systemach telekomunikacyjnych”  
Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Burakowski**

### **Podstawowe dane o kandydacie**

Mgr inż. Maciej Sosnowski pracuje na stanowisku asystenta w Instytucie Telekomunikacji na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej. Tytuł magistra w dziedzinie telekomunikacji uzyskał na Politechnice Warszawskiej w roku 2012. Przedstawiona do recenzji dokumentacja nie zawiera informacji świadczących o uprzednim ubieganiu się kandydata o nadanie stopnia doktora.

### **1. Cel, zakres i charakter rozprawy**

Recenzowana praca dotyczy sieci telekomunikacyjnych, w szczególności metod analizy systemu kolejkowego z pojedynczym urządzeniem obsługującym i możliwością oczekiwania w kolejce (o skończonej lub nieskończonej długości) zadań na obsługę. Analizowany system kolejkowy modeluje przepływ niezależnych strumieni pakietów w wirtualnym łączy transmisyjnym, w którym zapewniona jest izolacja poszczególnych strumieni ruchu. Taka izolacja jest osiągnięta z wykorzystaniem algorytmu szeregowania pakietów opartym na cyklu (tzw. Mechanizm CB) realizującym multipleksację z podziałem czasu (TDMA). Rozważany system kolejkowy ma istotne znaczenie w kontekście systemów wykorzystujących wirtualizację infrastruktury sieciowej, m.in. w takich obszarach jak sieci Internetu Przyszłości, czy też sieci 5G/6G. Wirtualizacja infrastruktury sieciowej umożliwia ustanawianie wielu niezależnych systemów wirtualnych (logicznych) wykorzystujących tę samą infrastrukturę fizyczną, pozwalając tym samym na efektywniejsze wykorzystanie jej zasobów. W tym kontekście, zasadniczym celem pracy jest propozycja metod analitycznych dla wspomagania procesu projektowania i wymiarowania systemów telekomunikacyjnych wykorzystujących techniki wirtualizacji.

Tematykę rozprawy oceniam jako aktualną i istotną dla sektora technologii informacyjno-komunikacyjnych (ICT). Rozprawa ma charakter zarówno teoretyczny jak i użyteczny. W zakresie rozważań teoretycznych, mgr inż. Maciej Sosnowski zaproponował i opracował dokładne metody analityczne analizy systemu dyskretnego wykorzystującego Mechanizm CB, zarówno bez jak i z uwzględnieniem priorytetów szeregowania pakietów, oraz metody przybliżone dla systemów z czasem ciągłym. Aspekt użyteczny rozprawy jest związany z implementacją proponowanych metod w środowisku Matlab, co pozwoliło na uzyskanie wyników numerycznych, oraz przeprowadzeniem badań i analiz m.in. z wykorzystaniem symulatorów zdarzeniowych zaimplementowanych w środowisku JAVA

i symulujących działanie systemów z czasem ciągłym i dyskretnym. Badania te pozwoliły m.in. na analizę właściwości rozważanych systemów jak i weryfikację dokładności proponowanych metod analitycznych w różnych scenariuszach ruchowych.

## 2. Struktura i zawartości rozprawy

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, które można podzielić na trzy części: wprowadzającą (rozdziały 1 i 2), prezentującą rozważany mechanizm szeregowania pakietów wraz ze sformułowaniem i analizą opracowanych modeli analitycznych oraz opisem ich praktycznego zastosowania (rozdziały 3–5) oraz podsumowującą (rozdział 6). Rozprawa obejmuje następujące zagadnienia.

- Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy, w tym prezentuje główne cele i osiągnięcia pracy, postawione tezy doktoratu, oraz strukturę pracy.
- Rozdział 2 przedstawia zagadnienie wirtualizacji infrastruktury sieciowej, z odniesieniem do przykładów literaturowych zastosowania wirtualizacji w różnych jej obszarach ze szczególnym uwzględnieniem wirtualnych sieci komputerowych. W tym zakresie praca odnosi się też w sposób ogólny do metod tworzenia izolowanych łączy wirtualnych oraz podstawowych mechanizmów szeregowania transmisji danych używanych w sieciach pakietowych z wykorzystaniem zwielokrotniania w dziedzinie czasu (TDM).
- Rozdział 3, stanowiący główną część pracy, definiuje mechanizm szeregowania pakietów oparty na cyklu (tzn. Mechanizm CB), klasyfikuje ten mechanizm w kontekście systemów kolejkowych i innych obszarów zastosowania, przedstawia szczegółowo opracowany model analityczny systemu dyskretnego z wykorzystaniem teorii kolejek, oraz prezentuje przykładowe wyniki działania modelu. Opracowany model pozwala na wyznaczanie rozkładu stanu systemu w poszczególnych szczelinach czasowych, określenie czasu przebywania pakietu w systemie jak i obliczenie prawdopodobieństwa straty pakietu. Dodatkowo, rozdział ten obejmuje badania systemu z czasem ciągłym, dla którego opracowano przybliżony model czasu oczekiwania pakietu na obsłudze.
- Rozdział 4 stanowi rozszerzenie Mechanizmu CB i modeli zaprezentowanych w Rozdziale 3 przy uwzględnieniu scenariusza z priorytetowym szeregowaniem pakietów i możliwością istnienia okresu ochronnego dla obsługi wyłącznie pakietów o najwyższym priorytecie (tzw. Mechanizm CB+P(+GT)). Przedstawiono metodę wyznaczania rozkładu stanu systemu dyskretnego, zaproponowano metodę obliczania przybliżonego średniego czasu oczekiwania przy założeniu czasu ciągłego, oraz dokonano analizy porównawczej rozważanych systemów w oparciu o badania symulacyjne.
- Rozdział 5 odnosi się do rzeczywistego systemu IIP, opracowanego i zaimplementowanego w ramach Projektu Inżynieria Internetu Przyszłości, jako przykładu systemu, w którym zaimplementowano i wykorzystano Mechanizm CB do wirtualizacji zasobów łączy transmisyjnych.
- Rozdział 6 podsumowuje rozprawę.

Dodatkowo, w załączniku przedstawiono opis opracowanych narzędzi symulacyjnych i analitycznych.

Struktura pracy jest prawidłowa. Praca została napisana w języku polskim na bardzo dobrym poziomie nie stanowiącym trudności w zrozumieniu jej treści oraz prezentowanych rozwiązań. Na szczególne wyróżnienie zasługuje wysoka jakość opisu rozważanych zagadnień i proponowanych modeli, staranne opracowanie rysunków i wykresów, oraz szczegółowa i spójna prezentacja wyników przeprowadzonych badań, co w mojej ocenie stanowi mocną stronę rozprawy.

### 3. Poprawność i oryginalność postawionej tezy

W rozprawie zdefiniowano cztery tezy, które dotyczą kolejno:

1. Dokładności metody analitycznej opracowanej dla systemu wykorzystującego Mechanizm CB, w tym obliczanych w tej metodzie rozkładów prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej stan systemu, czasu przebywania pakietu w systemie oraz prawdopodobieństwa straty pakietu.
2. Dokładności opracowanej metody analitycznej pozwalającej na obliczanie rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej stanu systemu wykorzystującego Mechanizm CB+P.
3. Skuteczności proponowanego Mechanizmu CB+P w istotnym zmniejszeniu średniego czasu oczekiwania pakietu na obsługę, przy jedynie nieznacznym wpływie na pozostałe pakiety.
4. Dokładności modelowania sposobu tworzenia łączy wirtualnych w rzeczywistym systemie IIP w oparciu o analizowany Mechanizm CB.

W mojej ocenie postawione tezy pracy są oryginalne i zostały sformułowane poprawnie. Mgr inż. Maciej Sosnowski na podstawie przeglądu literaturowego i własnej wiedzy prawidłowo określił zakres swojej pracy, koncentrując się na istotnych aspektach związanych z problemem modelowania systemów kolejkowych, w tym konkretnie systemu wykorzystującego Mechanizm CB (oraz jego modyfikacje) umożliwiającego wirtualizację zasobów transmisyjnych z izolacją strumieni pakietów w łączach fizycznych. Teza została wykazana w rozprawie poprzez:

1. Opracowanie modeli analitycznych, w oparciu o analizę systemów kolejkowych, pozwalających na dokładne wyznaczenie rozkładu stanu systemów z czasem dyskretnym realizujących Mechanizm CB oraz Mechanizm CB+P w poszczególnych szczelinach czasowych.
2. Opracowanie metod dokładnego wyznaczenia czasu przebywania pakietu w systemie oraz prawdopodobieństwa straty pakietu dla systemu dyskretnego implementującego Mechanizm CB.
3. Opracowanie analitycznych metod obliczania przybliżonego czasu oczekiwania pakietu na obsługę w systemach z czasem ciągłym realizujących Mechanizm CB oraz Mechanizm CB+P.
4. Implementację metod i przeprowadzenie badań numerycznych wraz z analizą i porównaniem ich efektywności z wynikami symulacji w różnych scenariuszach ruchowych.
5. Prezentację ogólnej architektury Systemu IIP, w tym wskazanie na zastosowanie Mechanizmu CB do wirtualizacji zasobów transmisyjnych w łączach fizycznych wykorzystywanych w tym systemie.

Mgr inż. Maciej Sosnowski rozwiązał postawiony problem naukowy stosując prawidłowe metody badawcze, w tym m.in. wykorzystując teorię systemów kolejkowych i łańcuchów Markowa, które są właściwym narzędziem dla analizy rozważanych w rozprawie systemów. Dla wykazania tezy pracy Doktorant posłużył się środowiskiem Matlab, w którym zaimplementował proponowane modele analityczne. Następnie, dla opracowanych scenariuszy badawczych, przeprowadził badania numeryczne oraz symulacje komputerowe. Metodologia przeprowadzonych badań została dokładnie opisana, natomiast wyniki zawarte w pracy są opatrzone odpowiednią analizą i dyskusją.

Moim zdaniem rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a postawione cele zostały w pracy osiągnięte.

#### **4. Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora w zakresie dyscypliny naukowej**

Doktorant dokonał dokładnego przeglądu bibliograficznego związanego z tematem rozprawy, w szczególności: (a) w rozdziale 2 w zakresie zagadnienia wirtualizacji infrastruktury sieciowej, (b) w rozdziale 2.1 w kontekście metod i mechanizmów tworzenia izolowanych łączy wirtualnych, oraz (c) w rozdziale 3 w odniesieniu do umiejscowienia analizowanego systemu kolejkowego w rodzinie systemów z wakacjami, w tym obszarów praktycznych zastosowań takich systemów i proponowanych w literaturze metod ich analizy. Lista odniesień do literatury przedmiotu przedstawiona w rozprawie zawiera 118 pozycji, w tym 19 prac, których mgr inż. Maciej Sosnowski jest współautorem.

W mojej ocenie przedstawiona rozprawa doktorska świadczy o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata związanej z dyscypliną informatyka techniczna i telekomunikacja, w tym o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Odniesienia w tekście do źródeł są odpowiednie i świadczą o dobrej znajomości współczesnej literatury dotyczącej tematu rozprawy. Jednocześnie, proponowane przez Doktoranta rozwiązania dla postawionego problemu badawczego wskazują na zaawansowaną wiedzę o charakterze szczegółowym i praktycznym dotyczącą modelowania i analizy systemów kolejkowych.

#### **5. Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową**

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Sosnowskiego związana jest z istotną i aktualną problematyką wirtualizacji infrastruktury sieciowej w sieciach telekomunikacyjnych, w takich obszarach zastosowań jak sieci Internetu Przyszłości, czy też sieci 5G i 6G. Dla potrzeb projektowania tego typu sieci niezbędne są odpowiednie modele analityczne umożliwiające wymiarowania zasobów sieciowych gwarantujących realizacji usług na określonym poziomie. Przy wirtualizacji zasobów transmisyjnych, istotna jest izolacja poszczególnych usług korzystających z tych zasobów, co możliwe jest dzięki zastosowaniu rozważanego w rozprawie Mechanizmu CB sterującego dostępem do fizycznego łącza transmisyjnego. W tym kontekście, w rozprawie zaproponowano i opracowano dokładne i przybliżone metody analityczne wspomagające proces projektowania i wymiarowania systemów wykorzystujących Mechanizm CB.

Zaprezentowany przez Doktoranta przegląd literaturowy wskazuje na aktualność i istotność problematyki wirtualizacji sieci teleinformatycznych, a jednocześnie pokazuje, że zagadnienie modelowania łączy wirtualnych działających w oparciu o Mechanizm CB nie było tematem głębszych badań w literaturze światowej. Wcześniejsze prace dotyczące podobnych systemów kolejkowych (tak zwanych systemów obsługi z wakacjami) związane były głównie z analizą zachowania samochodów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną oraz cykli produkcyjnych. Mimo pewnych analogii, analizowany w pracy system obsługi pakietów w łączach wirtualnych różni się istotnie od wymienionych systemów z wakacjami co nie pozwala na zastosowanie wcześniej opracowanych rozwiązań.

Stąd też, w mojej ocenie opracowane przez Doktoranta metody analityczne pozwalające na określenie stanu i zachowania systemu wykorzystującego Mechanizm CB oraz Mechanizm CB+P(+GT) do wirtualizacji zasobów transmisyjnych w łączu jest nowatorskie i wzbogacające aktualny stan wiedzy reprezentowany przez literaturę światową w obszarze sieci telekomunikacyjnych.

## 6. Znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej

Wśród najważniejszych oryginalnych osiągnięć rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Sosnowskiego można wymienić:

1. Opracowanie, implementację i analizę metody dokładnej wyznaczania rozkładu stanu systemu dla systemów z czasem dyskretnym implementujących Mechanizm CB oraz Mechanizm CB+P w łączach wirtualnych w sieciach telekomunikacyjnych.
2. Opracowanie, implementację i analizę metod dokładnych wyznaczania rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej losowej opisującej czas przebywania pakietu w systemie oraz prawdopodobieństwa straty pakietu dla systemu z czasem dyskretnym implementującym Mechanizm CB.
3. Opracowanie, implementację i analizę przybliżonej metody szacowania średniego czasu oczekiwania pakietu dla systemu z czasem ciągłym implementującym Mechanizm CB.
4. Opracowanie, implementację i analizę przybliżonej metody szacowania średniego czasu oczekiwania pakietu dla systemu z czasem ciągłym implementującym Mechanizm CB+P przy założeniu dwóch strumieni pakietów i nieskończonej kolejce.
5. Analizę porównawczą parametrów obsługi strumieni pakietów w systemach wykorzystujących Mechanizm CB, Mechanizm CB+P, Mechanizm CB+P+GT oraz Mechanizm WRR (weighted round robin).

Należy podkreślić, że opracowane koncepcje oraz uzyskane wyniki mają znaczenie praktyczne. Doktorant zdefiniował i następnie rozwiązał realny i aktualny problem badawczy związany z modelowaniem łącz wirtualnych w sieciach telekomunikacyjnych z izolacją obsługiwanych strumieni pakietów uzyskiwaną za pomocą Mechanizmu CB. Rozważany Mechanizm CB jest stosowany m.in. w rzeczywistym Systemie IIP, natomiast proponowane w rozprawie metody znajdują zastosowanie przy analizie i wymiarowaniu łącz transmisyjnych w tym systemie.

## 7. Główne wady rozprawy, słabe stron wraz z krytycznymi uwagami szczegółowymi

### Uwagi ogólne

1. Teza 4 rozprawy (sformułowana w rozdziale 1.3) stwierdza iż „Analizowany Mechanizm CB w sposób dokładny modeluje sposób tworzenia łącz wirtualnych na łączach wyjściowych z urządzenia umożliwiającego wirtualizację, który został zastosowany w Systemie IIP”. Biorąc po uwagę, że tak faktycznie jest, o czym świadczy krótki opis architektury Systemu IIP przedstawiony w rozdziale 5, ta teza nie wymaga istotnego wykazania/dowodu i z punktu widzenia wkładu rozprawy mogłaby zostać pominięta.
2. Podczas klasyfikowania rozważanego Mechanizmu CB w Rozdziale 3.1, wskazano, że mechanizm ten był analizowany w pracy [82]. Jeżeli tak, to należałoby w tym miejscu wskazać z czego wynika konieczność opracowania nowego modelu i jakie są główne różnice (zalety) pomiędzy proponowanym w rozprawie rozwiązaniem a przedstawionym w [82].
3. Ważnym elementem pracy, któremu poświęcony jest rozdział 5, jest wskazanie na zastosowanie Mechanizmu CB w rzeczywistym Systemie IIP, w tym na możliwość wykorzystania proponowanych w rozprawie metod przy analizie i projektowaniu łącz wirtualnych w tym systemie. Jednocześnie, przedstawione w rozprawie wyniki badań odnoszą

się jedynie do badań numerycznych uzyskanych w środowisku Matlab oraz symulacji komputerowych. Uwzględnienie w pracy wyników badań eksperymentalnych zrealizowanych w Systemie IIP po zastosowaniu opracowanych metod (np. w procesie wymiarowania łączny) pozwoliłoby na weryfikację skuteczności tych metod w praktycznym zastosowaniu.

4. Przy prezentacji wyników numerycznych uzyskanych przy pomocy metod analitycznych dokładnych (m.in. w rozdziałach 3.2.1.1, 3.2.2.3, oraz 3.2.3.1) wspomniano, że „wyniki te zostały porównane z wynikami symulacyjnymi”. Jednocześnie na prezentowanych wykresach brak jest jednoznacznej informacji o tym, które wyniki odpowiadają wynikom symulacji. Czy to oznacza, że prezentacja wyników symulacji dla metod dokładnych została pominięta? Jeżeli tak, to wskazane jest wyjaśnienie powodu braku tych wyników.
5. Wyniki badań zaprezentowane w rozdziale 3.2 odnoszą się do systemu o specyficznych parametrach ( $T_A = 5$  i  $T_N = 10$ ). Podobnie, w rozdziale 4.1, wyniki badań numerycznych dotyczą konkretnego systemu o parametrach  $T_1 = 10$  i  $T_2 = 20$ . W pracy trudno jest znaleźć wyjaśnienie z czego wynika skupienie się na jednym systemie o takich właśnie parametrach oraz dlaczego nie przeprowadzono podobnej analizy dla systemów o innych parametrach.
6. W pracy nie odniesiono się do potrzeby i planowanych kierunków przyszłych badań związanych z tematem rozprawy. Dla przykładu, czy wskazana jest kontynuacja badań dot. metod dokładnych wyznaczania czasu przebywania pakietu w systemie oraz prawdopodobieństwa jego straty w przypadku Mechanizmu CB+P? Czy warto rozwijać metody przybliżone dla analizowanych wersji Mechanizmu CB, np. zakładając nieograniczoną liczbę strumieni lub ograniczony rozmiar kolejki w przypadku Mechanizmu CB+P? etc. Taka dyskusja wskazałaby, czy temat został wyczerpany, czy też istnieją nie uwzględnione w rozprawie zagadnienia, które są istotne i wymagają dalszych badań.

### **Uwagi drobne**

1. Zawartość rozdziału 5, ograniczona do niecałej strony opisu architektury Systemu IIP oraz dwóch rysunków, jest niewielka i mogłaby stanowić podrozdział część wprowadzającej (w rozdziale 2) lub poświęconej Mechanizmowi CB (w rozdziale 3).
2. W pracy można znaleźć drobne literówki (np. „czasu” -> „czas” na str. 11, „..” -> „.” w rozdziale 4.2.1), nieprecyzyjne sformułowania (np. na początku sekcji 3.1, trudno jest wywnioskować z kontekstu do czego odnosi się stwierdzenie „z punktu widzenia każdego z nich”) oraz pojawiają się drobne błędy w odniesieniu do numerów rozdziałów (np. w podsumowaniu rozdziału 4, zamiast „W rozdziale 4.2” powinno być „W rozdziale 4.1” i zamiast „W rozdziale 4.2.2” powinno być „W rozdziale 4.2.1”). Także, miejscami nie ma spójności w stosowanej notacji (dla przykładu,  $T_V$  zostaje zastąpione przez  $T_N$  bez stosowanego wyjaśnienia) oraz w tekście trudno jest się doszukać wcześniejszej definicji niektórych symboli (np.  $T_A$  i  $T_N$ ).

## 8. Konkluzja

Mgr inż. Maciej Sosnowski zaprezentował oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego, wykazując jednocześnie umiejętność samodzielnej realizacji badań naukowych, w tym wykorzystania właściwych metod badawczych oraz poprawnej analizy uzyskanych wyników. Wymienione powyżej sugestie i uwagi krytyczne nie zmieniają mojej pozytywnej opinii dotyczącej osiągnięć pracy, w tym wykazania postawionych tez badawczych.

Stąd też, w świetle przeprowadzonej analizy i oceny rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Sosnowskiego, stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca doktorska spełnia ustawowe kryteria wymagane dla uzyskania stopnia naukowego doktora, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Mirosław Klimowicz