

Łódź, 14 stycznia 2022 r.

Prof. Andrzej Bartoszewicz
Członek korespondent PAN
Instytut Automatyki
Politechniki Łódzkiej

Recenzja rozprawy doktorskiej

magistra inżyniera Sławomira Grzyba

pod tytułem „Packet flow control in computer networks with use of single and bi-objective optimization for congestion avoidance in time-varying communication channel” opracowana dla Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

promotor rozprawy dr hab. inż. Przemysław Orłowski, prof. ZUT

Recenzowana praca dotyczy ważnych, zarówno z praktycznego jak i naukowego punktu widzenia, zagadnień sterowania przepływem pakietów w sieciach transmisji danych. Celem pracy jest zaproponowanie niestacjonarnego dyskretnego liniowego modelu dynamiki kanału transmisyjnego oraz zastosowanie tego modelu do eliminacji lub ograniczenia przeciążeń, a tym samym do poprawy jakości sterowania przepływem pakietów danych. Aby osiągnąć ten cel Doktorant opanował teoretyczne podstawy analizowanych w pracy zagadnień, przeprowadził przegląd praktycznie stosowanych metod unikania przeciążeń w sieciach komputerowych, opracował własny model dynamiki kanału transmisyjnego, dokonał jedno- i wielokryterialnej optymalizacji zaproponowanych metod sterowania, przeprowadził szereg badań symulacyjnych i dokonał analizy uzyskanych rezultatów. Wybór takiej metody badawczej należy uznać za właściwy i w pełni uzasadniony. Bez wątplenia można również stwierdzić, że problem, którym zajął się Doktorant, a tym bardziej sposób jego rozwiązania oraz zastosowane do tego celu narzędzia i metody świadczą o tym, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Sławomira Grzyba nie tylko z powodzeniem mieści się w zakresie dyscypliny *automatyka elektronika i elektrotechnika* (głównie w subdyscyplinie obejmującej automatykę), ale należy do jednego z ważnych i aktualnych nurtów badań w zakresie automatyki i jej zastosowań.

Praca składa się z przydatnego dla czytelnika wykazu skrótów, wprowadzenia, pięciu logicznie wyodrębnionych rozdziałów, podsumowania, wykazu literatury oraz spisu rysunków i spisu tabel. Warto odnotować, że w wykazie literatury wśród cytowanych w pracy źródeł

dziewięć publikacji stanowią opracowania Doktoranta. Własne prace, na które powołuje się Doktorant zostały opublikowane w czasopismach *Modelling, Measurement and Control A, Pomiary Automatyka Kontrola, Przegląd Elektrotechniczny* oraz na kilku międzynarodowych konferencjach. Wszystkie te prace są wyłącznym osiągnięciem Doktoranta oraz jego Promotora – żadna z nich nie ma innych współautorów poza tymi dwoma osobami. Wszystkie cytowane prace są względnie nowe i dobrze powiązane z tematem rozprawy, chociaż ich liczba (69) jest stosunkowo niewielka jak na analizowane zagadnienie. Warto także dodać, że kilka lat temu miałem okazję słuchać referatu Doktoranta na konferencji *Methods and Models in Automation and Robotics* i już wtedy mogłem dostrzec znajomość tematyki sterowania przepływem pakietów w sieciach transmisji danych wykazywaną przez Doktoranta w trakcie dość ożywionej dyskusji nad przedstawionym przez niego referatem.

Pierwszy rozdział pracy stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Autor zwięźle omawia w nim zasadę działania sieci informatycznych, tzn. podział komunikacji na warstwy, różne rodzaje protokołów komunikacyjnych oraz to jak działanie sieci ewoluowało w czasie. Z punktu widzenia automatyki można powiedzieć, że rozdział ten pokazuje jak mechanizm sprzężenia zwrotnego był i jest w praktyce używany do sterowania przepływem danych w sieciach komputerowych. Uważam, że zawartość tego rozdziału stanowi właściwe wprowadzenie do pracy doktorskiej w dyscyplinie *automatyka elektronika i elektrotechnika (automatyka i robotyka)* poświęconej sterowaniu takim obiektem, jak sieć komputerowa.

Rozdział drugi przedstawia przyjęty przez Doktoranta model sieci komunikacyjnej. Doktorant założył, że dane są przesyłane od źródła do węzła docelowego poprzez węzły pośredniczące. W jednym z tych węzłów występuje zator, co oznacza, że nie jest on w stanie przesłać dalej wszystkich danych. Dane te są gromadzone w buforze pamięci tego węzła i oczekują na możliwość transmisji. Doktorant przyjął, że ograniczenie szybkości transmisji węzła, w którym powstaje zator zmienia się w czasie. Takie podejście może odzwierciedlać na przykład przesyłanie danych o wyższym priorytecie, lub zmienną jakością transmisji w sieciach bezprzewodowych. Ponadto Doktorant założył, że w każdym z węzłów pośredniczących może dojść do blokady transmisji, co powoduje, że dane są chwilowo gromadzone również w tych węzłach. W węźle, w którym dochodzi do zatoru umieszczony jest regulator, który na podstawie ilości danych zgromadzonych w buforze generuje sygnał sterujący. Sygnał ten jest przesyłany z powrotem do źródła danych i określa prędkość transmisji. Zgodnie z przyjętymi założeniami, model można zapisać w postaci równań stanu, ze zmiennymi elementami macierzy stanu (zmiennosc tych elementów odzwierciedla możliwość występowania „blokady”

transmisji w różnych węzłach pośredniczących). Ilość przesłanych danych powinna być tak dobrana, aby nie dopuścić do przepełnienia bufora – powodowałoby to konieczność odrzucenia i późniejszej retransmisji pakietów danych – ani do całkowitego opróżnienia bufora, co uniemożliwiłoby pełne wykorzystanie przepustowości dostępnego łącza. Przyjęty przez Doktoranta model uważam za wartościowy i istotny element pracy, ponieważ z jednej strony model jest prosty, intuicyjny i łatwy od interpretacji, a z drugiej dobrze oddaje istotę zjawisk występujących w sieci. Dzięki temu zaproponowany model dobrze nadaje się do analizy procesu transmisji danych i umożliwia projektowanie strategii sterowania przepływem pakietów w sieci.

Rozdział trzeci przedstawia regulatory zaproponowane przez Autora rozprawy. W pierwszym regulatorze zadana ilość danych w buforze węzła jest równa połowie jego pojemności, a za pomocą algorytmu rojowego dobierane jest wzmocnienie regulatora. Minimalizowany jest wskaźnik jakości, który zależy od kwadratu uchybu. Aby dodatkowo penalizować pełne opróżnienie lub przepełnienie bufora, wskaźnik jakości jest dla takich sytuacji – w każdym kroku w którym utrzymuje się przepełnienie/opróżnienie – dodatkowo powiększany o stałą wartość. Ponadto, wprowadzany jest margines błędu, tzn. jeśli uchyb nie przekracza określonego progu, to wskaźnik jakości w ogóle nie jest powiększany. Doktorant przedstawił rezultaty symulacji z różnymi wartościami wymienionego progu. Różnice pomiędzy poszczególnymi rezultatami są niewielkie. W kolejnym rozwiązaniu zadany poziom wypełnienia bufora, zamiast sztywnego przypisania połowy pojemności pamięci jest drugim, oprócz wzmocnienia, parametrem podlegającym optymalizacji. Ponieważ dla obu pierwszych regulatorów w rozprawie nie przedstawiono wartości otrzymanych współczynników wzmocnienia regulatora, proszę o ich podanie w trakcie publicznej obrony pracy. Kolejny zaproponowany regulator jest już nieliniowy. W porównaniu do poprzednich można go określić jako regulator, którego wzmocnienie zależy od wartości uchybu. Zadana ilość danych w buforze, tak jak w pierwszej strategii jest wybrana jako połowa jego pojemności. Czwarta strategia jest taka sama jak trzecia oprócz tego, że zadany poziom zapełnienia bufora jest jednym z optymalizowanych parametrów. W piątej strategii zadana ilość danych w buforze, która do tej pory była stałą wartością (nawet w tych przypadkach, w których była optymalizowana), została liniowo powiązana z dostępnym pasmem. Optymalizowane są: wzmocnienie regulatora oraz współczynnik wiążący zadaną ilość pakietów w buforze z dostępnym pasmem. Doktorant nazwał to rozwiązanie, moim zdaniem nieco na wyrost, regulatorem adaptacyjnym. W kolejnej, szóstej strategii związek między zadanym poziomem

zapełnienia bufora a dostępnym pasmem stał się zależnością nieliniową. Nieliniowość, podobnie jak we wcześniejszym przypadku, polega na wprowadzeniu zmiennego współczynnika proporcjonalności, którego zmienność jest sparametryzowana i optymalizowana. Ostatnia w tym rozdziale, siódma strategia jest połączeniem strategii szóstej i trzeciej, tzn. zarówno wzmocnienie nieliniowo zależy od aktualnego uchybu jak i zadany poziom zapełnienia bufora zależy od dostępnego pasma. Mimo tego, że ten regulator ma najwięcej „stopni swobody” parametryzacji, można dyskutować czy rzeczywiście działa on najlepiej ze wszystkich. Na rysunku 3.23 widać, że sygnał sterujący przełącza się pomiędzy ekstremalnymi wartościami, co może powodować nierównomierne obciążenie sieci. Aby tego uniknąć do wskaźnika jakości można dodać albo wyraz zawierający np. kwadrat sygnału sterującego albo moduł różnicy sygnału sterującego w dwóch kolejnych chwilach. W kolejnym podrozdziale Doktorant porównuje działanie wszystkich opracowanych regulatorów i stwierdza, że ostatnia, najbardziej skomplikowana strategia jest najlepsza. Z pewnością jest ona najlepsza w sensie minimalizacji wybranego wskaźnika jakości, ale proszę aby w trakcie publicznej obrony Doktorant odniósł się do kwestii praktycznej aplikacji tej strategii.

W kolejnym punkcie rozdziału trzeciego Autor rozprawy przedstawił rozwinięcie wybranych trzech strategii, polegające na dodaniu sterowania w torze głównym. Takie podejście nazywane jest też sprzężeniem w przód (ang. feedforward) i oznacza, że część sygnału sterującego wyznaczana jest bezpośrednio na podstawie wartości zadanej, a nie na podstawie uchybu. Następnie, Doktorant przedstawił rezultaty symulacji wykonanych przy różnych pojemnościach bufora danych i dostrzegł, że niekoniecznie im większy bufor tym lepiej, ponieważ w większym buforze przechowywana jest większa ilość danych, co oznacza że będą dłużej czekać na możliwość transmisji. Jest to dobrze znana właściwość, którą symulacje zawarte w rozprawie w pełni potwierdzają.

W czwartym rozdziale rozprawy Autor przedstawił zadanie optymalizacji z dwoma kryteriami jakości: pierwszym z nich jest ilość danych w buforze, zaś drugim niewykorzystane pasmo. Minimalizacja każdego z tych kryteriów jest zadaniem przeciwnym do minimalizacji drugiego z nich. Wybór parametrów został dokonany na podstawie analizy frontu Pareto. Wyniki symulacji nie różnią się znacząco od przedstawionych w poprzednim rozdziale. Następnie Doktorant zaproponował uwzględnienie we wszystkich dotychczasowych algorytmach sterowania, ilości danych które zostały już wysłane, ale jeszcze nie dotarły do bufora węzła stanowiącego wąskie gardło łącza (wszystkie wcześniej omawiane regulatory brały pod uwagę tylko aktualną ilość danych w buforze). Uwzględnienie tych danych (tzw.

danych „w drodze”) pozwala na poprawę jakości sterowania. Jednak, jak wynika z rysunku 4.13 dla niektórych kombinacji wzmacnień układ nie uwzględniający danych „w drodze” działa lepiej. Doktorant słusznie zauważył ten fakt, chociaż nie wyjaśnił jego przyczyny. W tym miejscu warto dostrzec, że zaproponowane przez Doktoranta uwzględnienie danych „w drodze”, z punktu widzenia automatyki stanowi realizację koncepcji popularnego w naszej dyscyplinie predyktora Smitha. Wszystkie rezultaty omówione do tej pory otrzymane zostały dla układu o opóźnieniu 30 okresów dyskretyzacji oraz konkretnego, pojedynczego przebiegu dostępnego pasma (zarówno optymalizacja jak i symulacje). W kolejnej części rozprawy Autor rozważał ten sam układ, ale ze stałym dostępnym pasmem, wybranym na poziomie 80% poprzedniego maksimum. Rozsądnie, dla oszczędności miejsca, przedstawił wyłącznie wartości wskaźników jakości, nie pokazując już poszczególnych przebiegów w funkcji czasu.

W rozdziale piątym Doktorant przeanalizował opracowane wcześniej algorytmy sterowania. Wyznaczone optymalne wartości parametrów zastosował do układów o innych profilach dostępnego pasma. Pozwoliło to sprawdzić, wrażliwość optymalnych wartości parametrów regulatora na warunki panujące w sieci. Część z zaproponowanych algorytmów wykorzystywała informację o aktualnie dostępnym paśmie $d(k)$ do wygenerowania odpowiedniego sterowania $u(k)$. Jednak wiąże się to z istotnym problemem, polegającym na tym, że dostępne pasmo nie jest w danej chwili znane (regulator może określić wartość $d(k)$ dopiero w chwili $k + 1$), przez co tych algorytmów nie można zastosować w praktyce. Dlatego w następnej kolejności Doktorant zastosował estymację dostępnego pasma, na podstawie ilości danych które opuściły bufor. Przedstawił również rezultaty, w których na skokowo zmienne dostępne pasmo nałożone są oscylacje o wysokiej częstotliwości. Rozważał także sytuację, w której macierze stanu A (odzwierciedlające wystąpienie braku możliwości transmisji w różnych fragmentach sieci) zmieniają się z różną częstotliwością. W ostatnim teście Autor rozprawy rozbudował zmienność macierzy stanu A o dodatkowe 4 możliwości (w sumie do 8) odzwierciedlające brak transmisji w innych punktach sieci.

Rozprawę zamyka krótkie streszczenie pracy. Przechodząc do oceny rozprawy należy stwierdzić, że dotyczy ona istotnych, aktualnych i dość trudnych problemów z zakresu sterowania przepływem pakietów w sieciach transmisji danych. Ma ona właściwy układ i jest poprawna pod względem formalnym. Pisząc ją Autor wykazał się znajomością wybranych zagadnień sieci komputerowych oraz numerycznych metod optymalizacji, umiejętnością matematycznego modelowania procesów dynamicznych i dobrymi zdolnościami prowadzenia badań symulacyjnych. Badania opisane w rozprawie są logicznie zaplanowane, dobrze

przeprowadzone i dość obszernie chociaż niezbyt starannie opisane. Oceniając pracę należy także podkreślić, że zawiera ona istotne osiągnięcia Doktoranta i dobrze świadczy o jego erudycji w zakresie sterowania przepływem pakietów w sieciach teleinformatycznych.

W trakcie czytania pracy nasunęło mi się także sporo – na ogół dość drobnych – wątpliwości oraz uwag i spostrzeżeń o charakterze porządkowym, dyskusyjnym i polemicznym. Niektóre z nich zamieszczam poniżej:

- Autor rozprawy, na stronie 45 stwierdza, że przyjęty przez niego model może odzwierciedlać sieć przedstawioną na schemacie 2.5. Nie jest jednak jasne w jaki sposób ten model mógłby ją reprezentować, bo składa się on z pojedynczego szeregu kolejnych węzłów (jednego kanału transmisyjnego). Nie ma w rozprawie opisu jak zamodelować prawdziwą strukturę sieci, np. taką jak na rysunku 2.5. W moim przekonaniu model zaproponowany przez Doktoranta dobrze odzwierciedla połączeniowe sieci transmisyjne, a więc takie jak na przykład sieci zgodne z dość starym już standardem Asynchronous Transfer Mode (ATM) pracujące w trybie Available Bit Rate (ABR), czy też nowsze sieci Multiprotocol Label Switching (MPLS). Nie jest to jednak uwaga kluczowa z punktu widzenia dyscypliny *automatyka, elektronika i elektrotechnika*.
- Doktorant podkreśla w rozprawie, że jego model jest bliski rzeczywistości. Jeśli tak jest, to wartości u_{\max} , d_{\max} , y_{\max} we wzorach 2.17 oraz 2.18 powinny mieć odpowiednie jednostki.
- Autor rozprawy zastosował gotowy, znany algorytm optymalizacji (Particle Swarm Optimization, PSO). Powinien więc dokładnie opisać jak z niego korzysta, jak dobrał parametry itp. Jednak, na przykład we wzorze 2.30 nie jest jasne co oznacza $V_{\max,t}$: czy jest to ograniczenie normy wektora prędkości (jeśli tak, to jakiej normy), czy może ograniczenie każdego elementu tego wektora prędkości. Poza tym V_{\max} , V_{\min} oznaczają początkowe i końcowe wartości ograniczenia prędkości (maximum velocity) a nie po prostu początkową i końcową prędkość (initial and final velocity), jak napisano w rozprawie.
- We wzorze 2.10, element $q_{n-1}(k)$ w macierzy A powinien mieć „daszek”
- Nie jest jasne co znaczy funkcja „rem” we wzorze 2.14.
- Wzór 2.24 nie powinien się znaleźć na stronie 50. Nie widać żadnego związku między tym wzorem a poprzedzającym go tekstem.
- We wzorach 2.25 i 2.26 powinno występować N zamiast n

- Nad wzorem 3.2 Doktorant napisał, że wyraża on wzmocnienie układu, podczas gdy faktycznie wzór 3.2 opisuje sygnał sterujący.
- Jeżeli ilość danych w buforze $y(k)$ wyrażona jest w pakietach (co wynika z przyjętej jednostki y_{\max} , bo bezpośrednio tej informacji nie ma podanej w rozprawie) to współczynnik alfa w zależności 3.7 powinien być wyrażony w pakietach do kwadratu (a nie być bezwymiarowy) żeby można było wykonać działania w równaniu 3.5.
- Rozdział 3.5 niepotrzebnie kończy się zdaniem „Now let us develop the strategy.”
- Na dole strony 81 powinno być $m=80\%$, a nie $m=80$.
- Wielokrotnie w rozprawie (na przykład na stronie 18) zamiast faze powinno być phase, na stronach 21 i 95 zamiast principal powinno być principle, na stronie 22 zamiast ware powinno być were, a zamiast ofitially officially. Na stronie 78 zamiast fort powinno być for, na stronie 81 zamiast firth powinno być fifth, na stronach 102 i 111 zamiast Appling powinno być Applying, a na stronie 109 zamiast win powinno być with. Praca zawiera także liczne inne niedociągnięcia gramatyczne oraz niedoskonałości stylistyczne, których szczegółowy wykaz przedstawię Doktorantowi.

Wyżej wymienione uwagi nie mają wpływu na moją pozytywną ocenę całości rozprawy, tym samym nie powodują konieczności zmian ani uzupełnień. Przedstawione wyniki stanowią rozwiązanie istotnego problemu naukowego, a także dobrze świadczą o ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta oraz o jego umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej w dyscyplinie *automatyka, elektronika i elektrotechnika*. Stwierdzam zatem, że przedstawiona przez magistra inżyniera Sławomira Grzyba rozprawa spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z późniejszymi zmianami i wnioskuję o dopuszczenie go do publicznej obrony.