

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Przemysław Ignaciuk

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- doktor nauk technicznych – Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki (EEIA), stopień uzyskany w październiku 2008 r. z wyróżnieniem dla rozprawy zatytułowanej:
„Congestion control in connection-oriented data transmission networks” („Sterowanie przepływem danych w połączeniowych sieciach teleinformatycznych”);
- magister inżynier – Politechnika Łódzka, Wydział EEIA, dyplom uzyskany z wyróżnieniem w czerwcu 2005 r., tytuł pracy:
„ABR service flow control in ATM networks” („Sterowanie przepływem danych w sieciach ATM pracujących w trybie ABR”).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

- X.2011–teraz: adiunkt, Instytut Informatyki, Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej (FTIMS), Politechnika Łódzka,
- X.2008–IX.2011: adiunkt, Instytut Automatyki, Wydział EEIA, Politechnika Łódzka,
- I.2006–IX.2008: programista i architekt systemów informatycznych, Ericpol Telecom,
- III.2005–XII.2005: analityk procesu bilingowego, Telekomunikacja Polska S.A.

4. Wskazanie osiągnięcia

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, ze zm.) chciałbym wskazać jednotematyczny cykl publikacji pod wspólnym tytułem:

„Odporne algorytmy zarządzania zasobami w sieciach teleinformatycznych i logistycznych”.

Cykl publikacji

Przedstawiony do oceny jednotematyczny cykl publikacji obejmuje 10 prac, w tym:

- 1 monografię naukową o zasięgu światowym,
- 9 artykułów w czasopismach wymienionych w wykazie *Journal Citation Reports* (JCR).

Dla pism umieszczonych na liście JCR podano ich *impact factor* (IF) oraz pięcioletni IF (5yearIF) z roku ukazania się publikacji, a także liczbę punktów zgodnie z wykazem Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) z 17 września 2012 r. W przypadku prac opublikowanych w roku 2012 i 2013 podano najbardziej aktualne wartości IF oraz 5yearIF. Ponadto wszystkie wymienione publikacje opatrzone komentarzem określającym szacunkowy, procentowy udział poszczególnych autorów w uzyskaniu i prezentacji rezultatu naukowego. Nakreślono również wkład habilitanta w powstanie pracy. Szczegółowy opis dokonań autorów przedstawiono w oświadczeniach załączonych w postaci oddzielnego dokumentu.

Sumaryczny IF publikacji przedstawionych w ramach cyklu wynosi 13,538, sumaryczny 5yearIF 17,007, a sumaryczna liczba punktów według aktualnej listy MNiSW 320 (195,833 ważona równomiernie względem liczby autorów).

[1]	<p>P. Ignaciuk (70%), A. Bartoszewicz (30%): Discrete-time linear-quadratic (LQ) optimal and nonlinear flow control in multi-source connection-oriented communication networks. European Transactions on Telecommunications, Vol. 20, No. 7, 2009, str. 679–688.</p> <p>JCR, 20 pkt., IF / 5yearIF: 0,453 / 0,613</p> <p>P. Ignaciuk: szczegółowe sformułowanie problemu optymalizacji i jego rozwiązanie (w tym analityczne rozwiązanie równania Riccatiego), wspólne sformułowanie twierdzeń opisujących właściwości układu i przeprowadzenie szczegółowych obliczeń niezbędnych do udowodnienia tych twierdzeń, zbudowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy i przeprowadzenie badań numerycznych, dokonanie części przeglądu literatury i redakcja tekstu artykułu.</p>
[2]	<p>A. Bartoszewicz (50%), T. Molik (25%), P. Ignaciuk (25%): Discrete time congestion controllers for multi-source connection-oriented communication networks. International Journal of Control, Vol. 82, No. 7, 2009, str. 1237–1252.</p> <p>JCR, 25 pkt., IF / 5yearIF: 1,124 / 1,377</p> <p>P. Ignaciuk: rozszerzenie funkcjonalności symulatora ns2 o moduły umożliwiające badanie zjawisk w połączeniowych sieciach teleinformatycznych, zbudowanie modelu symulacyjnego i przeprowadzenie badań numerycznych, rozszerzenie przeglądu literatury.</p>
[3]	<p>P. Ignaciuk (80%), A. Bartoszewicz (20%): Discrete-time sliding-mode congestion control in multisource communication networks with time-varying delay. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 19, No. 4, 2011, str. 852–867.</p> <p>JCR, 35 pkt., IF / 5yearIF: 1,766 / 2,309</p> <p>P. Ignaciuk: opracowanie modelu sieci ze zmiennym opóźnieniem, zaprojektowanie algorytmu zarządzania przepływem danych oraz sformułowanie i udowodnienie jego właściwości, zbudowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy i</p>

	przeprowadzenie badań numerycznych, dokonanie znaczącej części przeglądu literatury i redakcja tekstu artykułu.
[4]	<p>P. Ignaciuk (80%), A. Bartoszewicz (20%): Congestion control in data transmission networks – sliding mode and other designs. Springer-Verlag, Londyn, 2013 (382 strony). monografia naukowa o zasięgu światowym, 25 pkt.</p> <p>P. Ignaciuk: plan i organizacja monografii, adaptacja i opracowanie wyników publikowanych wcześniej w czasopismach do postaci monografii, przygotowanie schematów blokowych i innych ilustracji, przygotowanie scenariuszy badań symulacyjnych, ich wykonanie i prezentacja wyników. Opracowanie szczegółowych modeli sieci analizowanych w książce. Opracowanie algorytmów ślizgowego zarządzania przepływem danych w sieciach wykorzystujących protokół TCP. Redakcja rozdziałów 1, 2, 4–9 oraz opracowanie materiałów elektronicznych uzupełniających materiał zawarty w monografii (moduły i skrypty ns2 oraz modele Simulinka dostępne poprzez stronę WWW).</p>
[5]	<p>P. Ignaciuk (75%), A. Bartoszewicz (25%): Linear-quadratic optimal control strategy for periodic-review inventory systems. Automatica, Vol. 46, No. 12, 2010, str. 1982–1993.</p> <p>JCR, 40 pkt., IF / 5yearIF: 2,171 / 2,768</p> <p>P. Ignaciuk: szczegółowe sformułowanie problemu optymalizacji i jego rozwiązanie (w tym analityczne rozwiązanie równania Riccatiego), wspólne sformułowanie twierdzeń opisujących właściwości układu i przeprowadzenie szczegółowych obliczeń niezbędnych do udowodnienia tych twierdzeń, zbudowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy i przeprowadzenie badań numerycznych, dokonanie przeglądu literatury i znaczny udział w redakcji artykułu.</p>
[6]	<p>P. Ignaciuk (65%), A. Bartoszewicz (35%): LQ optimal and reaching law based sliding modes for inventory management systems. International Journal of Systems Science, Vol. 43, No. 1, 2012, str. 105–116.</p> <p>JCR, 25 pkt., IF / 5yearIF: 0,991 / 1,257</p> <p>P. Ignaciuk: zaprojektowanie hiperpłaszczyzny ślizgowej zapewniającej optymalizację działania układu w sensie kwadratowego wskaźnika jakości (w tym analityczne rozwiązanie równania Riccatiego), dokonanie szczegółowych wyprowadzeń algorytmów zarządzania zasobami, wspólne sformułowanie twierdzeń opisujących właściwości układu i przeprowadzenie szczegółowych obliczeń niezbędnych do udowodnienia tych twierdzeń, zbudowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy i przeprowadzenie badań numerycznych, dokonanie przeglądu literatury dotyczącej sterowania procesami logistycznymi i redakcja tekstu artykułu.</p>
[7]	<p>P. Ignaciuk: Dead-time compensation in continuous-review perishable inventory systems with multiple supply alternatives. Journal of Process Control, Vol. 22, No. 5, 2012, str. 915–924.</p> <p>JCR, 35 pkt., IF / 5yearIF: 1,696 / 1,956</p>
[8]	<p>P. Ignaciuk (85%), A. Bartoszewicz (15%): Sliding mode dead-beat control of perishable inventory systems with multiple suppliers. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 9, No. 2, 2012, str. 418–423.</p> <p>JCR, 35 pkt., IF / 5yearIF: 1,461 / 1,677</p>

	<p>P. Ignaciuk: sformułowanie problemu badawczego, opracowanie modelu, zaprojektowanie algorytmu zarządzania zasobami oraz sformułowanie i udowodnienie jego właściwości, zbudowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy i przeprowadzenie badań numerycznych, dokonanie przeglądu literatury i redakcja tekstu artykułu.</p>
[9]	<p>P. Ignaciuk (85%), A. Bartoszewicz (15%): Linear-quadratic optimal control of periodic-review perishable inventory systems. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, No. 5, 2012, str. 1400–1407.</p> <p>JCR, 35 pkt., IF / 5yearIF: 1,766 / 2,309</p> <p>P. Ignaciuk: sformułowanie problemu badawczego, opracowanie modelu, sformułowanie i rozwiązanie problemu optymalizacji, określenie i udowodnienie właściwości zaprojektowanego algorytmu zarządzania zasobami, zbudowanie modelu symulacyjnego, opracowanie scenariuszy i przeprowadzenie badań numerycznych, dokonanie przeglądu literatury i redakcja tekstu artykułu.</p>
[10]	<p>P. Ignaciuk: LQ optimal and robust control of perishable inventory systems with multiple supply options. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013 (w druku), DOI: 10.1109/TAC.2013.2246093.</p> <p>JCR, 45 pkt., IF / 5yearIF: 2,110 / 2,773</p>

Cel naukowy cyklu publikacji i znaczenie osiągniętych wyników

Przedmiotem przeprowadzonych przeze mnie badań, których rezultaty zaprezentowano w postaci przedstawionego do oceny cyklu publikacji, jest projektowanie wydajnych algorytmów aktywnego zarządzania zasobami w układach sieciowych z niepomiernym opóźnieniem. Głównym obiektem rozważań są systemy transmisji danych oraz sieci logistyczne, a zatem układy o szczególnym znaczeniu dla postępu naukowego i ekonomicznego. Zagwarantowanie szybkiej, skutecznej i niezawodnej wymiany informacji za pośrednictwem sieci teleinformatycznej stanowi kluczowy element funkcjonowania nowoczesnych przedsiębiorstw, decydujący o ich pozycji rynkowej i możliwościach rozwoju. Z kolei rosnąca rola logistyki i transportu w gospodarce i życiu społeczeństwa pozbawionego lokalnych barier geograficznych wymusza konieczność zapewnienia wydajnych mechanizmów regulujących przepływ osób i towarów oraz wielkość gromadzonych zapasów.

Dotychczasowe rozwiązania proponowane w literaturze dotyczące zarządzania ruchem w sieciach teleinformatycznych bazują w dużej mierze na metodach heurystycznych i intuicji w doborze właściwej strategii regulacji przepływu danych. Podobnie w zakresie zarządzania zasobami w sieciach logistycznych większość opublikowanych technik ogranicza się do algorytmów określanych na drodze analizy statystycznej i badań numerycznych.

W ramach przeprowadzonych rozważań naukowych zidentyfikowałem podobieństwa między kluczowymi zjawiskami zachodzącymi w sieciach teleinformatycznych i logistycznych oraz opracowałem aparat matematyczny pozwalający w spójny sposób badać przebieg tych zjawisk w płaszczyźnie analitycznej. Przy użyciu zaawansowanych metod formalnych, bazujących na optymalizacji dynamicznej i teorii sterowania ślizgowego, zaprojektowałem szereg skutecznych algorytmów zarządzania zasobami w rozważanej klasie układów sieciowych. Opracowane algorytmy pozwalają na poprawę funkcjonowania systemów transmisji danych i procesów logistycznych. W przeciwieństwie do metod

tradycyjnych, zaprojektowane algorytmy cechują się trudną do osiągnięcia odpornością na niedokładności w określaniu modelu dynamiki sieci oraz działaniem zakłóceń zewnętrznych (takich jak z góry nieznane fluktuacje pasma transmisyjnego w sieciach teleinformatycznych, czy zmiany natężenia ruchu oraz wahania popytu w transporcie i logistyce). Ponadto opracowane przeze mnie techniki kompensacji, w tym przede wszystkim niwelowanie niekorzystnego wpływu opóźnienia i jego zmienności, pozwalają na skrócenie czasu reakcji na zmiany stanu sieci bez ryzyka utraty stabilności. Proponowane algorytmy nie wymagają skomplikowanych obliczeń i są łatwe w implementacji programistycznej, dzięki czemu zapewniają dużą wydajność nawet w przypadku złożonych scenariuszy spotykanych w praktyce.

Za wkład w rozwój dyscypliny uważam:

- opracowanie procedur projektowych, opartych na optymalizacji dynamicznej i teorii sterowania ślizgowego, prowadzących do uzyskania odpornych algorytmów zarządzania zasobami w sieciach teleinformatycznych i logistycznych,
- zaprojektowanie nowych algorytmów dynamicznego zarządzania zasobami w rozważanej klasie układów sieciowych,
- stworzenie aparatu matematycznego służącego formalnej analizie właściwości algorytmów zarządzania zasobami w układach sieciowych z niepomijalnym opóźnieniem.

Szczegółowy opis rozważanych problemów badawczych i uzyskanych rezultatów

W pracy [1] rozważono problem zarządzania przepływem danych w połączeniowej sieci teleinformatycznej, w której ruch przechodzący przez węzeł zagrożony przeciążeniem generowany jest przez wiele nadajników. Zadaniem projektowanego algorytmu, działającego w węzle „wąskiego gardła” (ang. *bottleneck node*), jest zapewnienie stabilnej a zarazem wydajnej pracy sieci poprzez ustalenie właściwej szybkości wysyłania danych przez nadajniki. W rozważanym modelu pasmo dostępne do obsługi ruchu sieciowego na interfejsie wyjściowym węzła wąskiego gardła zmienia się w czasie w zależności od intensywności ruchu o wyższym priorytecie oraz przepustowości kanałów transmisyjnych (jak to ma miejsce w przypadku sieci bezprzewodowych). Dostępne pasmo, którego wartość nie jest znana z wyprzedzeniem, opisane zostało funkcją o dowolnym przebiegu i dowolnym rozkładzie statystycznym. Zatem w przyjętej koncepcji modelowania zjawisk sieciowych dostępne pasmo traktowane jest jako zakłócenie zewnętrzne, powodujące odchylenie długości kolejki pakietów zgromadzonych w buforze interfejsu wyjściowego od wartości zadanej. Projektowany algorytm zarządzania szybkością nadawania danych ma za zadanie reagować na zmiany długości kolejki w taki sposób, aby uniknąć przepełnienia bufora i jednocześnie zapewnić wysoki stopień wykorzystania dostępnego pasma. Oprócz przypadkowych zmian pasma podstawową przeszkodą w uzyskaniu korzystnych warunków funkcjonowania sieci jest opóźnienie w przekazywaniu informacji zwrotnej, w przypadku ogólnym inne dla każdego połączenia. Opóźnienie związane jest z obsługą ruchu sieciowego w węzłach pośredniczących na trasie nadajnik-odbiornik i odbiornik-nadajnik oraz transferem danych na łączach między węzłami.

W odróżnieniu od typowo stosowanego podejścia heurystycznego [L1]–[L3] oraz klasycznych metod sterowania (jako podstawę wykorzystujących na przykład regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący – PID [L4]) przy projektowaniu algorytmu zarządzania zasobami w pracy [1] zastosowano dyskretną optymalizację dynamiczną z

kwadratowym wskaźnikiem jakości [L5]. Uzyskany algorytm zapobiega przepelnieniu bufora i stratom pakietów do jakich doszłoby skutek przeciążenia, a zarazem zapewnia pełne wykorzystanie dostępnego pasma. Analityczne rozwiązanie trudnego problemu optymalizacji dynamicznej dla sieci obsługującej wiele połączeń o różnych opóźnieniach pozwala na przedstawienie uzyskanego mechanizmu wyznaczania szybkości nadawania danych w postaci jawnej. W rezultacie proponowany algorytm jest łatwy w implementacji (nie wymaga od programisty znajomości aparatu matematycznego stosowanego w rozwiązywaniu problemów optymalizacji) i dopasowaniu do warunków działania danej sieci. Obliczenia prowadzące do ustalenia szybkości nadawania danych opierają się na porównaniu zadanej i bieżącej długości kolejki pakietów oraz sumy pakietów „w locie” (czyli pakietów jakie algorytm pozwolił wysłać nadajnikom, ale które nie dotarły jeszcze do węzła z uwagi na opóźnienie) mnożonych przez stałą. Ponieważ działanie algorytmu opiera się jedynie na podstawowych operacjach sumowania i mnożenia, można go w sposób wydajny implementować zarówno programistycznie jak i sprzętowo. Przedstawienie mechanizmu wyznaczania szybkości nadawania danych w postaci jawnej pozwala również na określenie i formalne udowodnienie właściwości algorytmu związanych z obsługą ruchu sieciowego. Pokazano, że zaprojektowany algorytm generuje nieujemny sygnał dopasowania szybkości nadawania danych, nie dopuszcza do przepelnienia bufora oraz zapewnia pełne wykorzystanie dostępnego pasma, mimo że wielkość pasma nie jest znana *a priori*. Ponadto zaprezentowany algorytm w bezpośredni sposób uwzględnia górne ograniczenie szybkości nadawania danych. W konsekwencji szybkość reakcji na zmiany warunków panujących w sieci może być dostosowywana niezależnie od maksymalnej przepustowości łącz ani ograniczeń nadajnika.

W pracy [2] zastosowano inne podejście do opisu zjawisk sieciowych i projektowania algorytmów zarządzania zasobami. Połączeniową sieć teleinformatyczną zamodelowano jako układ próbkowany, w którym podstawowe funkcje opisujące stan układu są ciągłe w czasie, a szybkość nadawania ustalana jest przez algorytm w dyskretnych chwilach. Aby przeciwdziałać negatywnym skutkom opóźnienia w pętli sprzężenia zwrotnego zastosowano schemat kompensacji oparty o predyktor Smitha [L6]. Klasyczną postać predyktora podaną w literaturze dla układów ciągłych z pojedynczym opóźnieniem dostosowano do warunków pracy układu próbkowanego z wieloma kanałami transmisyjnymi charakteryzującymi się różnymi opóźnieniami. Rozważono szereg scenariuszy sieciowych i udowodniono, że proponowany algorytm pozwala wyeliminować ryzyko strat oraz zapewnić pełne wykorzystanie dostępnego pasma nie tylko w warunkach nominalnych, ale również wtedy gdy wartości opóźnień szacowane są z błędem a liczba połączeń zmienia się w czasie. Pokazano także jak przy pomocy sprzężenia w torze głównym układu regulacji (kompensacja typu *feed-forward*) ograniczyć wrażliwość długości kolejki pakietów na zmiany dostępnego pasma. Wyrównanie czasu oczekiwania kolejnych pakietów pozwala poprawić jakość obsługi strumieni wymagających niewielkiej wariacji opóźnień (ang. *delay jitter*). W konsekwencji, zaprojektowany algorytm zarządzania przepływem danych umożliwia wydajną i bezstratną transmisję sekwencji audio i wideo.

Istotnym ograniczeniem rezultatów przedstawionych w pracach [1] i [2] jest założenie stałego czasu obiegu informacji zwrotnej oraz propagacji pakietów należących do strumieni przechodzących przez węzeł wąskiego gardła. Tymczasem w rzeczywistych sieciach teleinformatycznych opóźnienie pakietów oraz jednostek sterujących (np. potwierdzeń w protokole TCP) obsługiwanych przez sieć w ramach danego połączenia zwykle podlega znacznym wahaniom w trakcie przebiegu transmisji [L4, L7, L8]. Fluktuacje opóźnień związane są z niezerowym czasem kolejkwania w węzłach pośredniczących, a także zmianami trasy, którą kierowane są poszczególne pakiety. Wahania opóźnień zależą od obciążenia całej sieci i nie można ich określić z wyprzedzeniem w momencie ustalania

szybkości nadawania danych. W rezultacie skuteczny algorytm zarządzania zasobami powinien cechować się odpornością nie tylko na zmiany dostępnego pasma ale również na fluktuacje kluczowego parametru modelu układu transmisji danych – opóźnienia.

W pracy [3] badano zjawiska związane z wymianą informacji w sieci obsługującej wiele kanałów transmisyjnych dostarczających dane z niejednostajnym opóźnieniem. W stworzonym modelu przyjęto, że opóźnienie w poszczególnych kanałach może zmieniać się w sposób przypadkowy i niezależny od dostępnego pasma na interfejsie wyjściowym węzła wąskiego gardła. W przeciwieństwie do większości koncepcji spotykanych dotychczas w literaturze w zaproponowanym modelu nie narzucono żadnego ograniczenia co do charakteru fluktuacji opóźnienia. Założono jedynie, że wynikowe opóźnienie jest ograniczone. Zatem opracowany model uwzględnia również trudny w analizie przypadek, kiedy pakiety oraz nośniki informacji zwrotnej docierają do miejsca przeznaczenia w innej kolejności niż zostały wysłane przez źródła. Zaproponowany w artykule [3] nieliniowy algorytm zarządzania ruchem pakietów łączy zalety płynące ze stosowania optymalizacji dynamicznej i teorii dyskretnego sterowania ślizgowego [L9]–[L12]. Przedstawiony algorytm gwarantuje, że nie dochodzi do przepelnienia bufora przy jednoczesnym pełnym wykorzystaniu dostępnego pasma, a zatem zapewnia uzyskanie maksymalnej przepustowości w rozważanej sieci ze zmiennym opóźnieniem. Zaprezentowany algorytm jest prosty w implementacji oraz dopasowaniu do specyfiki danego scenariusza wymiany danych. W odróżnieniu od wcześniejszych rozwiązań proponowanych dla podobnych modeli sieci właściwości zaprojektowanego algorytmu zostały sformułowane i udowodnione w odniesieniu do średniego opóźnienia w puli obsługiwanych połączeń, a nie maksymalnego spodziewanego opóźnienia. Dzięki temu możliwe jest zapewnienie szybszej reakcji na zmiany warunków panujących w sieci oraz stosowanie mniejszego bufora danych bez ryzyka utraty stabilności. Omawiana praca była nominowana do nagrody za najlepszy artykuł opublikowany w *IEEE Transactions on Control Systems Technology* w 2011 roku.

Monografia naukowa zredagowana w języku angielskim [4] prezentuje obszerne studium zagadnień dotyczących projektowania algorytmów zarządzania ruchem w sieciach teleinformatycznych oraz badania ich właściwości przy użyciu formalnych metod analitycznych. Omawiana praca z jednej strony porządkuje stan wiedzy w zakresie problematyki tworzenia odpornych algorytmów regulacji dla rozważanej klasy obiektów dynamicznych, a z drugiej strony prezentuje szereg autorskich rozwiązań wykorzystujących między innymi koncepcje sterowania ślizgowego oraz optymalizację dynamiczną do poprawy jakości obsługi ruchu sieciowego z bezpośrednim uwzględnieniem efektów opóźnienia.

Po krótkim wprowadzeniu dotyczącym zjawiska powstawania zatorów i konieczności zapewnienia właściwego schematu regulacji ruchu sieciowego w rozdziale 1, w rozdziale 2 monografii przedstawione zostały szczegółowe wymagania dotyczące tworzenia skutecznych algorytmów zarządzania zasobami w sieciach teleinformatycznych. Etapy rozwoju technik zarządzania przepływem danych i metod przeciwdziałania przeciążeniom zostały zaprezentowane w ujęciu historycznym. Nacisk położono na opis algorytmów opracowanych na drodze formalnych badań analitycznych. Rozdział 3 nakreśla podstawowe koncepcje tworzenia układów regulacji o zmiennej strukturze, opisuje zalety trybu ślizgowego, a także prezentuje główne zasady i problemy towarzyszące tworzeniu odpornych algorytmów dynamicznego zarządzania zasobami. W dalszej części pracy, rozdziały 4–7, rozwijane są kolejno tematy projektowania algorytmów regulacji dla sieci modelowanych jako układy ciągłe, dyskretne i próbkowane. Dla ułatwienia śledzenia wywodu osobno potraktowano przypadek pojedynczego (zagregowanego) strumienia danych oraz wielu kanałów transmisyjnych charakteryzujących się odmiennymi parametrami. Poczynając od scenariusza podstawowego – układ z przekazywaniem informacji zwrotnej w trybie ciągłym i ze stałym

opóźnieniem – prezentowane są modele o rosnącym poziomie skomplikowania w sposób dokładniejszy odzwierciedlające zjawiska zachodzące w rzeczywistych sieciach teleinformatycznych. Rozważane są przypadki ustalania szybkości nadawania danych wyłącznie w dyskretnych chwilach, transmisji przy ograniczeniach kanałów przesyłowych oraz zmiennego opóźnienia wymiany informacji. Poruszono również istotne kwestie dotyczące sprawiedliwego podziału zasobów, poprawy jakości usług, a także ryzyka strat na skutek zatorów formujących się w wielu punktach sieci. Dla przedstawionych scenariuszy wymiany danych zaprojektowano szereg algorytmów, w tym nowatorskie rozwiązania oparte na teorii sterowania ślizgowego i optymalizacji dynamicznej. Główne właściwości proponowanych algorytmów zostały sformułowane w postaci twierdzeń matematycznych i ściśle udowodnione, a następnie zweryfikowane na drodze licznych symulacji. Osobno potraktowano przypadek projektowania algorytmów regulacji dla sieci TCP/IP pracujących ze wsparciem aktywnego zarządzania kolejkami (ang. *Active Queue Management*) w rozdziale 8. Rozdział 9 zawiera podsumowanie wyników przedstawionych w monografii oraz dyskusję na temat dalszych kierunków badań w obrębie sieci teleinformatycznych i powiązań koncepcyjnych między układami transmisji danych a innymi rodzajami obiektów z opóźnieniem, głównie sieciami logistycznymi.

Na potrzeby weryfikacji algorytmów zaprezentowanych w pracach [1]–[4] zostały stworzone odpowiednie modele w Matlabie-Simulinku (sprawdzenie przypadków granicznych) oraz w dyskretnym symulatorze pakietowym ns2 (testy wydajności odzwierciedlające zjawiska panujące w rzeczywistych sieciach teleinformatycznych). Funkcjonalność symulatora ns2 poszerzono o nowe moduły implementujące zaprojektowane algorytmy zarządzania zasobami i modele sieci, w tym modele ze zmiennym okresem próbkowania, które stanowią mój oryginalny wkład w rozwój tego narzędzia.

Spoglądając na zjawiska towarzyszące wymianie dóbr w układach logistycznych, można dostrzec szereg podobieństw z procesami zachodzącymi w sieciach teleinformatycznych. Analogie zarysowują się zarówno w opisie kluczowych aspektów dynamiki obu klas układów oraz formułowaniu wymagań i celów projektowych. W szczególności istotne jest uzyskanie wysokiej wydajności regulowanych procesów pomimo ograniczonej precyzji modeli matematycznych i występowania zakłóceń zewnętrznych. Zasadne jest zatem klarowne zidentyfikowanie podobieństw (i różnic) w zachowaniu obu rodzajów sieci i wykorzystanie wniosków płynących z analizy jednej klasy układów do tworzenia lepszych (od powszechnie istniejących) algorytmów zarządzania zasobami dla obiektów drugiej klasy. Oprócz uzyskania szerszej perspektywy w problematyce zarządzania zasobami w układach sieciowych, studium różnych typów układów może również pomóc uniknąć podejmowania niewłaściwych kierunków badań.

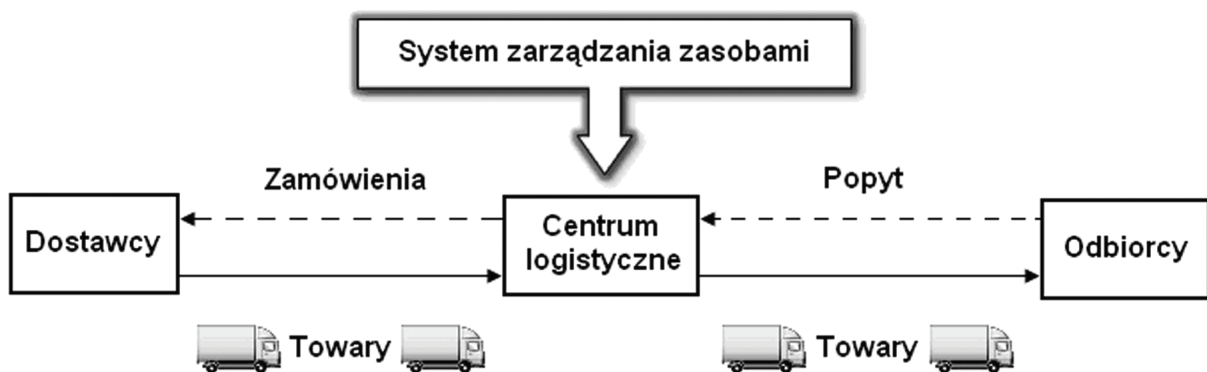
Typowe podejście do projektowania algorytmów zarządzania zasobami w sieciach logistycznych opiera się na sformułowaniu problemu optymalizacji (dynamicznej lub statycznej) dla określonego typu funkcji popytu i rozwiązaniu tego problemu celem uzyskania sekwencji decyzji określających moment składania zamówienia i wielkość dostawy [L13]. Rozwiązania analityczne są rzadko spotykane, szczególnie w sytuacji, gdy realizacja zamówienia obciążona jest niepomiernym opóźnieniem, a popyt zmienia się w sposób losowy. Alternatywą do metod opartych na teorii optymalizacji są rozwiązania heurystyczne dopasowane do specyfiki konkretnego systemu produkcyjno-dystrybucyjnego, na przykład podane w publikacjach [L14, L15]. Rozwiązania heurystyczne są jednak trudne w formalnej analizie i rzadko dostarczają ogólnych wniosków służących poprawie funkcjonowania szerszej klasy systemów logistycznych.

W przeciwieństwie do podejścia klasycznego cykl publikacji [5]–[10] prezentuje szereg rozwiązań algorytmicznych, opartych na formalnych metodach teorii regulacji, które

zapewniają wysoką wydajność układów logistycznych, gdy określenie funkcji popytu obarczone jest znaczną niepewnością. W rezultacie przebieg procesu wymiany dóbr i informacji w łańcuchu dostaw można w sposób elastyczny dopasować do specyfiki danego sektora rynkowego. Ta kształtująca się od niedawna w literaturze badań operacyjnych metodyka tworzenia schematów regulacji, określana jako poszukiwanie odpornych algorytmów zarządzania zasobami (ang. *robust control approach*) [L16], uważana jest za jedną z podstawowych, jakie mogą dostarczyć rozwiązań dla procesów logistycznych o szybkiej dynamice i nieprecyzyjnych parametrach. Z uwagi na obserwowaną w ostatnich latach postępującą globalizację, dywersyfikację popytu i wzrost wymagań jakościowych, coraz więcej przedsiębiorstw produkcyjno-dystrybucyjnych zmuszonych jest do działania w warunkach znacznej niepewności. Zatem oprócz poprawy efektywności istniejących firm poszukiwane odporne algorytmy zarządzania zasobami mogą pomóc w kształtowaniu odpowiednich reguł postępowania w przypadku nieprzewidzianych wahań koniunkturalnych i w konsekwencji decydować o sukcesie konkurencyjnym przedsiębiorstw logistycznych w przyszłości.

Z uwagi na odmienny charakter obserwowanych zjawisk oddzielnie rozważono problem projektowania algorytmów zarządzania wymianą dóbr w tradycyjnych systemach logistycznych z długim czasem przydatności rynkowej przechowywanych towarów [5, 6] oraz systemów z degradacją zasobów, w których przydatność rynkowa towarów maleje z upływem czasu [7]–[10].

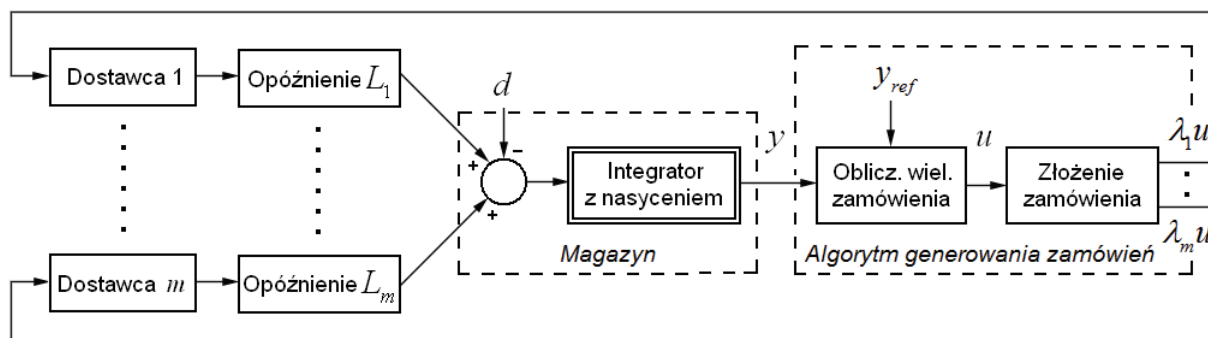
W pracach [5] i [6] zaproponowano sposób modelowania procesów towarzyszących wymianie dóbr w tradycyjnych systemach logistycznych w obecności niepomijalnego opóźnienia i znacznej niepewności popytu. Rozważono sytuację, w której zasoby centrum logistycznego, wykorzystywane do zaspokojenia zgłaszanego popytu, są uzupełniane towarami z zamówień składanych u jednego lub wielu dostawców. Schemat poglądowy układu obejmującego interakcje pomiędzy trzema podstawowymi uczestnikami wymiany dóbr – dostawcami, centrum logistycznym i odbiorcami – zaprezentowano na Rys. 1.



Rys. 1. Schemat poglądowy procesu logistycznego związanego z obsługą przepływu dóbr i komunikacją między elementami sieci logistycznej

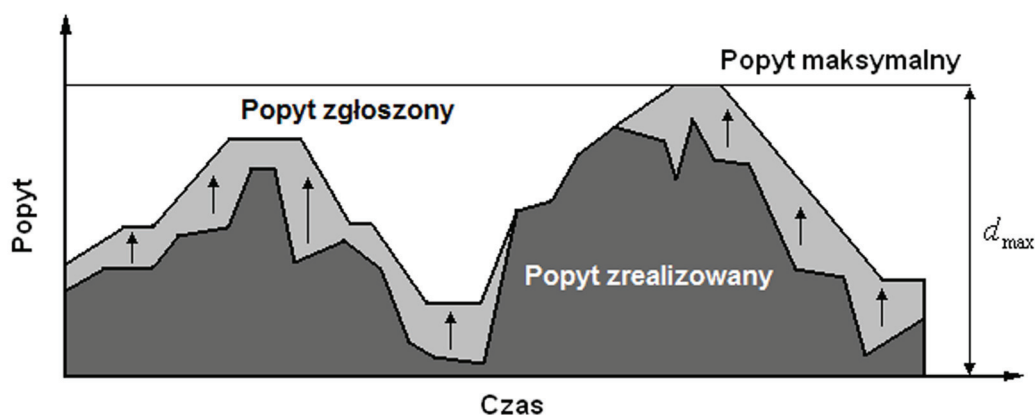
Model rozważanego układu pokazano na Rys. 2. W odpowiedzi na zgłaszane zapotrzebowanie d , centrum logistyczne przekazuje towary do odbiorców poprzez sieć dystrybucji. Celem uzupełnienia zasobów, przy wykorzystaniu odpowiedniego algorytmu, system zarządzania generuje zamówienie które składane jest u wybranych dostawców. Wielkość bieżącego zamówienia u ustalana jest na podstawie informacji o poziomie zasobów dostępnych w magazynie centrum logistycznego y , wartości odniesienia y_{ref} oraz historii zamówień, a następnie dzielona zgodnie z przyjętą polityką klasyfikacji dostawców opisaną

przy pomocy współczynników λ_p ($p = 1, 2, \dots, m$, gdzie m – liczba dostawców lub kanałów transportowych).



Rys. 2. Schemat sieci logistycznej z wieloma źródłami uzupełniania zasobów

Popyt modelowany jest jako sygnał zewnętrzny o dowolnym przebiegu i jest traktowany jako zakłócenie odzwierciedlające wahania koniunktury i nastrojów rynkowych. Projektowany algorytm generowania zamówień powinien reagować na zmiany popytu i poziomu zasobów, tak aby zachowane były stosowne kryteria jakości funkcjonowania systemu logistycznego. Przykładowym kryterium, zilustrowanym na Rys. 3, jest zapewnienie maksymalnych zysków ze sprzedaży, co jest spełnione, gdy popyt zrealizowany (ilość towarów przekazana do odbiorców) równy jest zgłaszanemu.



Rys. 3. Popyt zgłoszony i popyt zrealizowany

Podobnie jak to ma miejsce w przypadku systemów transmisji danych, głównym czynnikiem utrudniającym sformułowanie stabilnej, a zarazem wydajnej strategii zarządzania zasobami dla sieci logistycznych jest opóźnienie [L17, L18]. W przypadku sieci logistycznych opóźnienie w procesie uzupełniania zasobów związane jest z utworzeniem właściwej dokumentacji, przygotowaniem przesyłki przez dostawcę, a także transportem i umieszczeniem towarów w magazynie centrum logistycznego. W modelu zaproponowanym w artykułach [5] i [6] efekty niezerowego opóźnienia opisano szeregiem dodatkowych zmiennych uzyskując n -wymiarowy układ dyskretny.

Algorytmy zaprojektowane w obu pracach – w artykule [5] uzyskane poprzez rozwiązanie problemu dyskretnej optymalizacji dynamicznej z kwadratowym wskaźnikiem jakości, a w pracy [6] z wykorzystaniem teorii sterowania ślizgowego – zapewniają stabilną pracę układu

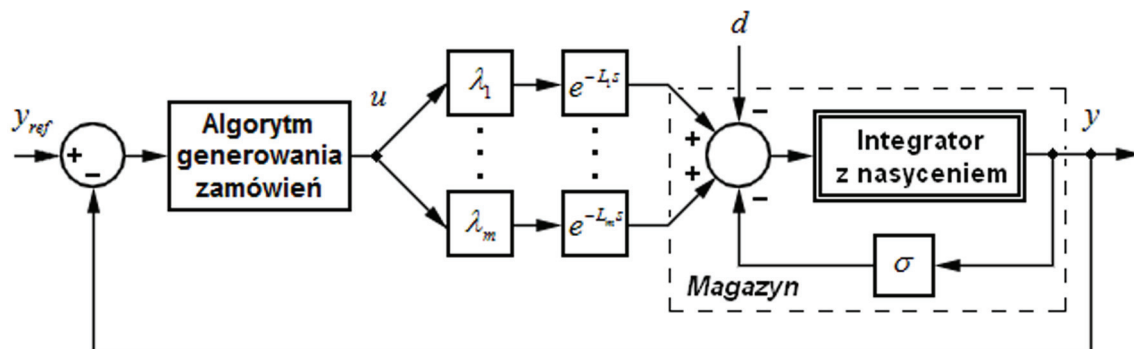
logistycznego dla dowolnych (stałych) wartości opóźnienia przy zachowaniu szybkiej reakcji na zmiany warunków rynkowych. Ponadto pokazano, że niezależnie od charakteru zmian zgłaszanego zapotrzebowania na towary proponowane algorytmy:

- pozwalają osiągnąć wysoki wskaźnik zadowolenia klienta (mierzony poziomem zaspokojenia popytu),
- nie generują zamówień nadmiarowych, które skutkowałyby wzrostem kosztów przechowywania lub nawet przepełnieniem magazynu i koniecznością rezerwacji dodatkowej przestrzeni do składowania napływających dóbr,
- unikają gwałtownych zmian wielkości zamówienia generowanego w kolejnych chwilach, a tym samym przeciwdziałają niekorzystnemu efektowi byczego bicia (ang. *bullwhip effect*) [L19], czyli zwiększeniu wariacji zamówień w stosunku do wariacji popytu.

Ponadto w pracy [6] rozszerzono podstawowy model procesu wymiany dóbr zaproponowany w artykule [5] na przypadek, kiedy źródła dostaw podlegają ograniczeniom i nie mogą realizować zamówień o dowolnej wielkości w pojedynczym cyklu. Procedurę projektowania algorytmu zarządzania zasobami oparto na teorii dyskretnego sterowania ślizgowego z predefiniowanym przebiegiem zmiennej przełączającej (ang. *reaching law approach*) [L10]–[L12]. Pokazano, że opracowany nieliniowy algorytm zapewnia szybką reakcję na zmiany warunków rynkowych (odzwierciedlonych w wahaniach popytu) przy zachowaniu narzuconego ograniczenia wielkości zamówień. W przeciwieństwie do liniowych algorytmów zaprezentowanych w pracy [5] spełnienie ograniczeń sygnału zamówień odbywa się bez pogorszenia dynamiki procesu uzupełniania zasobów.

W sytuacji, gdy okres przechowywania towarów jest ograniczony i krótszy od horyzontu czasowego rozważanego w procesie zarządzania wymianą dóbr, zwykle konieczne jest stosowanie innych modeli i procedur niż w tradycyjnych systemach logistycznych [L20]–[L23].

W pracy [7] analizowano dynamikę bardziej złożonych procesów logistycznych – procesów z degradacją zasobów. W badaniach wykorzystano metody częstotliwościowe w domenie zmiennej zespolonej s . Rozważono proces wymiany dóbr między dostawcami, centrum logistycznym i odbiorcami dla towarów charakteryzujących się zanikiem wykładniczym o stałej $\sigma > 0$. Model sieci logistycznej z wieloma źródłami uzupełniania zasobów w badanym procesie wymiany nietrwałych towarów pokazano na Rys. 4.



Rys. 4. Schemat sieci logistycznej w procesie uzupełniania nietrwałych towarów

Podobnie jak w przypadku tradycyjnych systemów logistycznych, w układach z degradacją zasobów istotne dla zapewnienia efektywnej polityki zarządzania zasobami jest

skonstruowanie właściwego mechanizmu kompensacji efektów opóźnienia. Mechanizm ten, stanowiący kluczowy element algorytmu zarządzania przepływem dóbr, powinien z jednej strony uwzględniać ilość towarów z zamówień otwartych (dobra zamówione, ale które jeszcze nie zostały dostarczone z uwagi na opóźnienie) oraz ubytek zasobów bieżących. W pracy [7] zbadano możliwość wykorzystania predyktora Smitha dla celów kompensacji efektów opóźnienia. Wskazano wady struktury bazowej predyktora w układach z degradacją zasobów i zaproponowano stosowną modyfikację. Zaprojektowany algorytm zarządzania zasobami uwzględniający zmodyfikowaną postać predyktora Smitha zapewnia pozbawiony przeregulowań, bezoscylacyjny charakter przebiegów przejściowych w odpowiedzi na nagłe zmiany warunków rynkowych. Ponadto wykazano formalnie, że algorytm generuje nieujemny i ograniczony sygnał określający wielkość zamówień w kolejnych chwilach i nie powoduje przepełnienia przestrzeni magazynowej zarezerwowanej w centrum logistycznym. Sformułowano również warunki, przy spełnieniu których zagwarantowane jest pełne zaspokojenie zgłaszanego popytu. Zaprojektowany algorytm porównano z klasyczną polityką zarządzania zasobami – zamów do poziomu (ang. *order-up-to policy*) – i pokazano jego przewagę w łagodzeniu efektu byczego bicza oraz generowaniu mniejszych kosztów ekonomicznych.

W praktycznej implementacji w rzeczywistych systemach logistycznych zamówienia zwykle generowane są w określonych, dyskretnych chwilach, np. raz dziennie, raz w tygodniu, etc. Prace [8]–[10] prezentują nowe rozwiązania algorytmiczne dla układów z degradacją zasobów z dyskretnym trybem składania zamówień.

W artykule [8] zastosowano metodologię projektowania ślizgowych algorytmów zarządzania zasobami z płaszczyzną ślizgową dobraną dla regulatora typu *dead-beat* w układzie z wieloma dostawcami. Opracowany algorytm gwarantuje pełne zaspokojenie popytu, jednocześnie ustalając taką wielkość zamówień, która nie powoduje przepełnienia zarezerwowanej przestrzeni magazynowej. W przeciwieństwie do opracowanej na drodze badań heurystycznych klasycznej polityki zarządzania zasobami uzyskany algorytm generuje bezoscylacyjny sygnał zamówień oraz redukuje wariancję popytu, dzięki czemu skuteczniej przeciwdziała efektowi byczego bicza. Wielkość zamówienia generowanego w kolejnych okresach $k = 0, 1, 2, \dots$, określana jest według wzoru

$$u(k) = y_{ref} - \Lambda \rho y(k) - \Lambda \Omega(k), \quad (1)$$

gdzie $\rho = 1 - \sigma$, $0 < \rho \leq 1$, oznacza część towarów jaka pozostaje w magazynie w procesie z degradacją σ , n_p jest liczbą okresów składających się na opóźnienie w realizacji dostaw w kanale p , a $\Lambda = 1 / \sum_{p=1}^m \lambda_p \rho^{-n_p}$ jest stałą zależną od przyjętej polityki podziału zamówienia między poszczególnych dostawców. Sumę

$$\Omega(k) = \sum_{p=1}^m \lambda_p \sum_{j=k-n_p}^{k-1} \rho^{k-n_p-j} u(j), \quad (2)$$

można wyznaczyć z zależności rekurencyjnej

$$\begin{aligned} \Omega(0) &= 0, \\ \Omega(k > 0) &= \rho[\Omega(k-1) + u(k-1) - \sum_{p=1}^m \lambda_p u(k-n_p-1)], \end{aligned} \quad (3)$$

co gwarantuje wysoką wydajność implementacji programowej algorytmu i dużą dokładność obliczeniową. Istotną zaletą zaproponowanego algorytmu zarządzania zasobami jest możliwość wprowadzenia dowolnego sposobu podziału zbiorczego zamówienia u ,

spełniającego warunek kompletności $\sum_{p=1}^m \lambda_p = 1$, bez ryzyka pogorszenia dynamiki procesu wymiany dóbr. W konsekwencji do wyznaczenia wartości współczynników λ_p można użyć oddzielnej procedury optymalizacyjnej, uwzględniającej kryteria kosztowe i jakościowe charakteryzujące poszczególnych dostawców [L24].

W literaturze coraz częściej spotyka się podejście kompleksowe do optymalizacji procesów logistycznych uwzględniające interakcję kilku uczestników wymiany dóbr [L25]. W konsekwencji oprócz zapewnienia odpowiedniego poziomu kosztów i zysków w funkcjonowaniu danego ogniwa (uczestnika wymiany dóbr), poszukuje się metod poprawiających wydajność całego łańcucha dostaw. Jednym z głównych zagrożeń dla efektywności ekonomicznej systemu logistycznego jako całości jest wcześniej wspomniane zjawisko byczego bicza. Prowadzi ono do gromadzenia nadmiernych zapasów celem zapewnienia odpowiedniego poziomu usług i zwiększa ryzyko utraty stabilności procesu wymiany dóbr. Jak pokazano w pracy [5], zastosowanie optymalizacji dynamicznej z kwadratowym wskaźnikiem jakości pozwala skutecznie przeciwdziałać temu niekorzystnemu efektowi w tradycyjnych systemach logistycznych, czyli takich w których proces gromadzenia zasobów odzwierciedla się za pomocą elementu całkującego. Tymczasem artykuły [9] i [10] prezentują analityczne rozwiązanie problemu liniowo-kwadratowego dla trudniejszych w analizie procesów z degradacją zasobów, w płaszczyźnie dynamicznej reprezentowanych poprzez obiekty inercyjne pierwszego rzędu z opóźnieniem. W pracy [9] analizowano proces logistyczny z pojedynczym źródłem uzupełniania zasobów, który następnie rozszerzono na przypadek sieci o wielu kanałach realizacji dostaw w artykule [10].

Zaproponowane w pracach [9] i [10] algorytmy zarządzania zasobami gwarantują bezoscylacyjny charakter przebiegów przejściowych i zmniejszają wariancję sygnału zamówień w stosunku do wariancji popytu w procesie wymiany nietrwałych towarów. Łagodzenie fluktuacji popytu i w rezultacie przeciwdziałanie formowaniu się efektu byczego bicza zapewnione jest również w przypadku niedokładnego oszacowania parametrów modelu (współczynnika degradacji zasobów oraz opóźnienia). Ponadto zaproponowany w pracy [10] nieliniowy algorytm zarządzania zasobami zapewnia wysoką odporność procesu wymiany dóbr także w sytuacji przypadkowych wahań opóźnienia i zakłóceń sekwencji zdarzeń występujących na skutek błędu lub realizacji zamówień w innej kolejności niż zostały złożone. Zaprezentowana przewaga uzyskanych algorytmów nad klasycznymi politykami uzupełniania zasobów poparta została dokładną analizą formalną i numeryczną.

Literatura

- [L1] D. Katabi, M. Handley, Ch. Rohrs: Congestion control for high bandwidth-delay product networks. Proceedings of ACM SIGCOMM, Pittsburgh, USA, sierpień 2002.
- [L2] Y. Xia, L. Subramanian, I. Stoica, S. Kalyanaraman: One more bit is enough. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, Vol. 35, No. 4, 2005, str. 37–48.
- [L3] H. Wu, F. Ren, D. Mu, X. Gong: An efficient and fair explicit congestion control protocol for high bandwidth-delay product networks. **Computer Communications**, Vol. 32, No. 7–10, 2009, str. 1138–1147.
- [L4] F. Blanchini, R. Lo Cigno, R. Tempo: Robust rate control for integrated services packet networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, Vol. 10, No. 5, 2002, str. 644–652.
- [L5] H. Górecki, S. Fuksa, A. Korytowski, W. Mitkowski: *Sterowanie optymalne w systemach liniowych z kwadratowym wskaźnikiem jakości*. Państwowe Wydawnictwo

Naukowe, Warszawa, 1983.

- [L6] O. J. M. Smith: A controller to overcome dead time. **ISA Journal**, Vol. 6, No. 2, 1959, str. 28–33.
- [L7] M. L. Sichertiu, P. H. Bauer: Asymptotic stability of congestion control systems with multiple sources. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Vol. 51, No. 2, 2006, str. 292–298.
- [L8] H. U. Ünal, B. Ataşlar, A. İftar, H. Özbay: H^∞ -based flow control in data-communication networks with multiple time-delays. Technical Report 2006–001, Anadolu University, 2006.
- [L9] Č. Milosavljević: General conditions for the existence of a quasisliding mode on the switching hyperplane in discrete variable structure systems. **Automation and Remote Control**, Vol. 46, No. 3, 1985, str. 307–314.
- [L10] W. Gao, Y. Wang, A. Homaifa: Discrete-time variable structure control systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 42, No. 2, 1995, str. 117–122.
- [L11] A. Bartoszewicz: Discrete time quasi-sliding mode control strategies. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. Vol. 45, No. 4, 1998, str. 633–637.
- [L12] G. Golo, Č. Milosavljević: Robust discrete-time chattering free sliding mode control. **Systems & Control Letters**, Vol. 41, No. 1, 2000, str. 19–28.
- [L13] S. P. Sethi, G. L. Thompson: *Optimal Control Theory: Applications to Management Science and Economics*, (2E). Kluwer, Boston, 2000.
- [L14] R. A. C. M. Broekmeulen, K. H. van Donselaar: A heuristic to manage perishable inventory with batch ordering, positive lead times, and time-varying demand. **Computers & Operations Research**, Vol. 36, No. 11, 2009, str. 3013–3018.
- [L15] S. Minner, S. Transchel: Periodic review inventory-control for perishable products under service-level constraints. **OR Spectrum**, Vol. 32, No. 4, 2010, str. 979–996.
- [L16] H. Sarimveis, P. Patrinos, C. D. Tarantilis, C. T. Kiranoudis: Dynamic modeling and control of supply chain systems: a review. **Computers & Operations Research**, Vol. 35, No. 11, 2008, str. 3530–3561.
- [L17] K. Hoberg, J. R. Bradley, U. W. Thonemann: Analyzing the effect of the inventory policy on order and inventory variability with linear control theory. **European Journal of Operational Research**, Vol. 176, No. 3, 2007, str. 1620–1642.
- [L18] R. Sipahi, I. I. Delice: Stability of inventory dynamics in supply chains with three delays. **International Journal of Production Economics**, Vol. 123, No. 1, 2010, str. 107–117.
- [L19] C. Chen, Z. Drezner, J. K. Ryan, D. Simchi-Levi: Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead times, and information. **Management Science**, Vol. 46, No. 3, 2000, str. 436–443.
- [L20] S. Nahmias: Perishable inventory theory: a review. **Operations Research**, Vol. 30, No. 4, 1982, str. 680–708.
- [L21] F. Rafaat: Survey of literature on continuously deteriorating inventory models. **Journal of the Operational Research Society**, Vol. 42, No. 1, 1991, str. 27–37.
- [L22] S. K. Goyal, B. C. Giri: Recent trends in modeling of deteriorating inventory. **European**

Journal of Operational Research, Vol. 134, No. 1, 2001, str. 1–16.

- [L23] I. Karaesmen I, A. Scheller-Wolf, B. Deniz: Managing perishable and aging inventories: review and future research directions, rozdział w monografii *Handbook of Production Planning*, Kluwer, Dordrecht, 2008.
- [L24] N. Aissaoui, M. Haouari, E. Hassini: Supplier selection and order lot sizing modeling: a review. **Computers & Operations Research**, Vol. 34, No. 12, 2007, str. 3516–3540.
- [L25] D.-P. Song: Optimal integrated ordering and production policy in a supply chain with stochastic lead-time, processing-time, and demand. **IEEE Transactions on Automatic Control**, Vol. 54, No. 9, 2009, str. 2027–2041.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Charakterystyka działalności naukowej

Studia magisterskie ukończyłem w 2005 r. z wynikiem celującym oraz wyróżnieniem na Wydziale EEIA Politechniki Łódzkiej. Za pracę magisterską uzyskałem nagrody w trzech konkursach: konkurs SEP organizowany na Wydziale EEIA, konkurs NOT na najlepszą pracę dyplomową na Politechnice Łódzkiej oraz ogólnopolski konkurs Fundacji im. Ignacego Łukasiewicza z siedzibą w Warszawie.

W ramach programu Sokrates/Erasmus studiowałem przez jeden semestr w największej uczelni technicznej Europy – Technical University of Denmark (DTU), a po powrocie do kraju brałem udział w zajęciach Akademii Cisco – 4-semestralnym specjalistycznym kursie z zakresu nowoczesnych technik transmisji danych i uzyskałem certyfikat *Cisco Certified Network Associate* (CCNA).

Po zakończeniu studiów magisterskich uczestniczyłem w kilkumiesięcznym projekcie badawczym realizowanym dla Olympus Corporation w Japonii (Centrum Badawczo-Rozwojowe Hachioji, Tokio), a następnie pracowałem w przemyśle – najpierw na stanowisku analityka w Telekomunikacji Polskiej S.A., a potem programisty i architekta systemów informatycznych w Ericpol Telecom. Jednocześnie podjąłem studia doktoranckie na Politechnice Łódzkiej, które zaowocowały licznymi publikacjami w uznanych periodykach naukowych oraz wartościowymi referatami na międzynarodowych konferencjach (dwukrotnie zdobyłem nagrodę za najlepszy referat – na konferencjach w Londynie i we Wrocławiu). Stopień doktora nauk technicznych z wyróżnieniem zredagowanej w języku angielskim rozprawy doktorskiej uzyskałem w październiku 2008 r.

Jesienią 2008 r. podjąłem pracę na stanowisku adiunkta w Instytucie Automatyki Politechniki Łódzkiej, a od października 2011 dołączyłem do zespołu Instytutu Informatyki Politechniki Łódzkiej, gdzie rozwijam swoją działalność badawczą w dziedzinie informatyki, telekomunikacji, automatyki i logistyki. W szczególności zajmuję się badaniem dynamiki układów sieciowych oraz projektowaniem skutecznych algorytmów zarządzania ruchem w sieciach rozległych z niepomijalnym opóźnieniem. W procedurach projektowych wykorzystuję formalne metody analityczne, głównie optymalizację dynamiczną oraz odporne techniki regulacji.

Rezultaty moich prac zostały opublikowane w cenionych w skali światowej periodykach naukowych w dziedzinie nauk technicznych (jestem głównym autorem między innymi 6 artykułów w 4 różnych *IEEE Transactions*). Za działalność badawczą uzyskałem także szereg nagród i wyróżnień, jak na przykład prestiżowe stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej dla wybitnych młodych uczonych.

Publikacje

Mój dotychczasowy dorobek publikacyjny obejmuje 74 prace (w tym 54 opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora):

- 1 monografię naukową o zasięgu światowym (opublikowaną po uzyskaniu stopnia doktora),
- 3 rozdziały w monografiach w języku angielskim (opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora),
- 15 artykułów w czasopiśmie wymienionych w JCR (14 opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora),
- 12 artykułów w recenzowanych czasopiśmie spoza wykazu JCR (6 opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora),
- 43 referaty konferencyjne (30 po uzyskaniu stopnia doktora).

Liczba cytowań moich prac bez autocytowań według bazy *Web of Science* wynosi 21, a indeks Hirscha równa się 4.

Sumaryczny IF zgodnie z rokiem publikacji w danym czasopiśmie równa się 26,833 (26,739 po uzyskaniu stopnia doktora).

Sumaryczna liczba punktów według aktualnej listy MNiSW wynosi 544 (318,833 ważona równomiernie względem liczby autorów).

Projekty badawcze

Jestem kierownikiem projektu badawczego:

1. Tytuł: Projektowanie i weryfikacja algorytmów sterowania w sieciowych układach regulacji, nr DEC-2012/05/D/ST6/03030, NCN, obecnie realizowany projekt badawczy SONATA, 2013–2016.

Wniosek zgłoszony w konkursie z 15 marca 2012 r. został przyjęty do realizacji przez NCN z pierwszą lokatą na liście rankingowej w panelu „Informatyka i technologie informacyjne” (ST6),

<http://www.ncn.gov.pl/aktualnosci/2012-11-21-wyniki-konkursow-st-nz>.

Ponadto uczestniczyłem (lub aktualnie biorę udział) w 7 projektach badawczych:

2. Tytuł: Optymalne ślizgowe sterowanie obiektami dynamicznymi, FNP, obecnie realizowany projekt badawczy w programie MISTRZ (laureat prof. A. Bartoszewicz), 2013–2015, wykonawca.
3. Tytuł: Optymalne ślizgowe sterowanie obiektami z opóźnieniem, nr DEC-2011/01/B/ST7/02582, NCN, obecnie realizowany projekt badawczy OPUS, 2011–2014, główny wykonawca.
4. Tytuł: Zastosowanie metod teorii regulacji do sterowania procesami logistycznymi, nr N N514 108638, MNiSW, projekt badawczy własny, 2010–2012, główny wykonawca.
5. Tytuł: Projektowanie powierzchni przełączeń do ślizgowego sterowania obiektami dynamicznymi, nr N N514 300035, MNiSW, projekt badawczy własny, 2008–2010, wykonawca pomocniczy.

6. Tytuł: Budowa i sterowanie robota o zamkniętym łańcuchu kinematycznym z napędami elektrycznymi, nr R01 009 03, MNiSW, projekt rozwojowy, 2007–2010, wykonawca pomocniczy.
7. Tytuł: Sterowanie wybranymi układami elektromechanicznymi przy wykorzystaniu sieci komputerowych, nr 3T10A 037 28, MNiSW, projekt badawczy własny, 2005–2007, wykonawca pomocniczy.
8. Tytuł: Modele i algorytmy wieloszczekowego rutowania w sieciach komputerowych z gwarancją jakości usług, nr 3T11C 043 26, MNiSW, projekt badawczy własny, 2004–2006, wykonawca pomocniczy.

Nagrody i wyróżnienia

Za działalność naukowo-badawczą otrzymałem szereg nagród i wyróżnień:

- stypendium START Fundacji na rzecz Nauki Polskiej – edycja 2009 i 2010,
- roczne stypendium naukowe przyznane w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki – edycja 2008, 2009 i 2010,
- stypendium habilitacyjne Rektora Politechniki Łódzkiej,
- 6 nagród za najlepszy referat na międzynarodowych konferencjach (m. in. w Londynie, Ferrarze i Sinai),
- 3 nagrody Rektora Politechniki Łódzkiej za osiągnięcia w pracy naukowej w roku 2009, 2010 i 2012,
- wyróżnienie pracy doktorskiej,
- 3 nagrody za najlepszą pracę magisterską w konkursach SEP, NOT i PGNiG.

P. Ignaciuk