

Politechnika Poznańska  
Wydział Elektroniki i Telekomunikacji  
Katedra Sieci Telekomunikacyjnych i Komputerowych



Maciej Sobieraj

# Modelowanie pól komutacyjnych z mechanizmami progowymi i wielouściugowymi źródłami ruchu

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Promotor: dr hab. inż. Mariusz Głąbowski, prof. nadzw.

Poznań, 2014

# Spis treści

<b>1. Wstęp</b>	<b>1</b>
<b>2. Systemy wielosługowe z wielosługowymi źródłami ruchu</b>	<b>6</b>
2.1. Ogólny model systemu . . . . .	6
2.2. Modele wiązek łączy . . . . .	11
<b>3. Mechanizmy progowe w polach komutacyjnych</b>	<b>12</b>
3.1. Podstawowe założenia . . . . .	12
3.2. Pole z mechanizmem rezerwacji . . . . .	13
3.3. Pole z właściwymi mechanizmami progowymi . . . . .	14
3.4. Pole z mechanizmami progowymi z histerezą . . . . .	14
<b>4. Modele pól komutacyjnych z wielosługowymi źródłami ruchu</b>	<b>16</b>
4.1. Klasyczne modele pól komutacyjnych z wielosługowymi źródłami ruchu	16
4.2. Ogólny model pola komutacyjnego z mechanizmami progowymi. . . . .	18
<b>5. Podsumowanie</b>	<b>25</b>
<b>6. Dorobek naukowy autora</b>	<b>27</b>

# Wstęp

Największy wpływ na rozwój sieci telekomunikacyjnych ma zapotrzebowanie abonentów na nowe rodzaje usług. Do niedawna sieć telekomunikacyjna była projektowana i rozwijana w głównej mierze dla zaspokojenia potrzeb tylko jednej usługi – telefonii. Wprowadzenie technik multimedialnych oraz znaczny wzrost zapotrzebowania na usługi transmisji danych, związany z dynamicznym rozwojem Internetu, spowodował potrzebę rozwoju nowych technologii transmisji i komutacji w kontekście rosnących wymagań użytkowników. Koniecznym stało się wprowadzenie technologii integrujących transmisję głosu, transmisję danych oraz usług multimedialnych. Dzięki zastosowaniu nowych technologii współczesne sieci telekomunikacyjne mają charakter wielousługowy, który bezpośrednio wpływa na metodologię modelowania systemów sieciowych.

Analityczne określanie charakterystyk ruchowych systemów sieci wielousługowych jest możliwe na podstawie trzech niezależnych grup modeli:

- modeli opartych na analizie równań stanu wielowymiarowego procesu Markowa,
- modeli opartych na aproksymacji wielowymiarowego procesu obsługi przez jednowymiarowy łańcuch Markowa,
- modeli wykorzystujących tzw. algorytm splotowy.

Pierwsza grupa modeli ma praktyczne zastosowanie w modelowaniu systemów o niewielkiej pojemności. W przypadku systemów o większych pojemnościach liczba stanów, w których może znajdować się wielowymiarowy proces Markowa, istotnie wzrasta. W konsekwencji takie podejście prowadzi do wykładniczego wzrostu złożoności obliczeniowej modelu, uniemożliwiającego jego zastosowanie praktyczne. Druga grupa modeli umożliwia określenie rozkładu zajętości w systemach wielousługowych za pomocą prostej rekurencji, tzw. wzoru Kaufmana-Robertsza. Trzecia grupa modeli polega na zastosowaniu tzw. algorytmów splotowych do określenia charakterystyk ruchowych sieciowych systemów wielousługowych. Biorąc pod uwagę dokładność uzyskiwanych wyników oraz złożoność obliczeniową tych trzech grup modeli można wykazać, że najbardziej efektywne jest wykorzystanie modeli należących do grupy drugiej.

W celu umożliwienia zastosowania omawianych grup modeli do wyznaczania charakterystyk ruchowych systemów wielousługowych, wprowadzono pojęcie tzw. modeli multi-rate. W modelach multi-rate określa się tzw. Podstawową Jednostkę Pasma (PJP), która powinna być mniejsza bądź równa największemu wspólnemu podzielnikowi zasobów żądanych przez poszczególne strumienie zgłoszeń. Takie podejście prowadzi do wyrażenia żądań poszczególnych klas zgłoszeń jako wielokrotności PJP.

W celu zastosowania modeli multi-rate do modelowania sieci wielousługowych, generujących strumienie zgłoszeń o zmiennej przepływności bitowej, wprowadzono pojęcie pasma ekwiwalentnego. Koncepcja ta polega na zastąpieniu zmiennej przepływności danego zgłoszenia pewną wartością stałą, której wartość zawiera się pomiędzy wartością średnią i wartością szczytową przepływności rzeczywistego strumienia.

W sieciach komórkowych z interfejsem radiowym WCDMA operowanie przepływnością jako jednostką alokacji jest niewygodne. W takiej sytuacji miarą zajętości zasobów może być procentowy poziom obciążenia interfejsu, a jednostkę alokacji wybiera się na podstawie jednostkowych obciążeń interfejsu przez źródła ruchu poszczególnych klas. W konsekwencji, przyjęta wartość PJP jest określona przez największy wspólny podzielnik jednostkowych obciążeń, wnoszonych przez poszczególne klasy ruchu.

Modele systemów multi-rate mogą być klasyfikowane względem różnorodnych kryteriów. Przyjmując za podstawę kryterium tzw. „zależność od stanu”, rozważane w literaturze przedmiotu systemy telekomunikacyjne możemy podzielić następująco:

- systemy niezależne od stanu:
  - systemy z niezależnym od stanu procesem przyjmowania nowych zgłoszeń,
  - systemy z niezależnym od stanu procesem napływania nowych zgłoszeń,
- systemy zależne od stanu:
  - systemy z zależnym od stanu procesem przyjmowania nowych zgłoszeń,
  - systemy z zależnym od stanu procesem napływania nowych zgłoszeń.

W przypadku systemów całkowicie niezależnych od stanu, zarówno proces przyjmowania, jak i napływania nowych zgłoszeń nie zależny od aktualnego stanu zajętości systemu. Przykładem takiego systemu może być model wiązki pełnodostępnej (niezależny proces przyjmowania nowych zgłoszeń) ze strumieniem ruchu Erlanga (niezależny proces napływania zgłoszeń). W systemach zależnych od stanu, zależność przyjmowania nowych zgłoszeń od stanu systemu może wynikać ze specyficznej struktury wiązki (np. wiązka z ograniczoną dostępnością) lub z polityki przyjmowania nowych zgłoszeń (np. systemy z rezerwacją, systemy progowe oraz systemy progowe z histerezą). Z kolei zależność procesu napływania nowych zgłoszeń od stanu systemu występuje w systemach ze skończoną



liczbą źródeł ruchu. Przykładami takich systemów mogą być systemy, którym oferowane są strumienie ruchu Engseta i Pascala.

W literaturze przedmiotu wykazano, że najbardziej efektywną grupą modeli, umożliwiających analizę systemów z dowolnym typem zależności od stanu, jest grupa, której podstawą jest aproksymacja wielowymiarowego procesu obsługi przez jednowymiarowy łańcuch Markowa.

Dotychczas w literaturze przedmiotu rozważane były modele systemów wielousługowych, w których pojedyncze źródło danej klasy ruchu mogło generować jeden, ściśle określony strumień ruchu. Modele systemów wielousługowych z jednousługowymi źródłami ruchu były podstawą analizy zarówno systemów bez wprowadzonych mechanizmów sterowania dostępem do zasobów, jak i systemów z wprowadzonymi mechanizmami sterowania dostępem do zasobów, takimi jak np. mechanizmy progowe. Mechanizmy sterowania dostępem do zasobów umożliwiają kształtowanie polityki jakości, zwiększają efektywność wykorzystania zasobów oraz zwiększają stabilność działania sieci. Termin mechanizmy progowe określa grupę mechanizmów sterowania dostępem do zasobów, w skład których wchodzi mechanizmy rezerwacji, w których część zasobów jest rezerwowana dla wybranych klas usług, oraz właściwe mechanizmy progowe, w szczególności mechanizmy progowe z histerezą, w których żądania danych klas są zmniejszane – zgodnie z przyjętym algorytmem – w miarę wzrostu obciążenia systemu powyżej pewnych ustalonych granic.

Autor podjął badania nad opracowaniem nowych modeli multi-rate wielousługowych systemów telekomunikacyjnych, w których pojedyncze źródło może generować różne strumienie ruchu, odpowiadające klasom usług związanych z danym źródłem. W rozważanych modelach źródła ruchu odpowiadają rzeczywistym terminalom (urządzeniom końcowym), zapewniającym możliwość korzystania z różnego typu usług (np. usługi głosowe, wideokonferencyjne czy transmisji danych). Problem jest nowy, ponieważ dotychczas w literaturze przedmiotu rozważano wyłącznie matematyczne modele systemów wielousługowych z jednousługowymi źródłami ruchu, tj. terminalami, z którymi związany był tylko jeden typ usługi.

Prowadzone badania nad opracowaniem nowych modeli systemów wielousługowych z wielousługowymi źródłami ruchu dotyczyły systemów z niezależnym jak i zależnym procesem przyjmowania i napływania nowych zgłoszeń. W szczególności badano systemy z wprowadzonymi mechanizmami progowymi, którym oferowano mieszaninę strumieni ruchów Erlanga, Engseta i Pascala generowanych przez źródła wielousługowe.

W wyniku przeprowadzonych badań, których rezultaty zawarto w rozprawie, proponowano następujące modele:

- model wiązki pełnodostępnej z wielousługowymi źródłami ruchu,
- model wiązki z ograniczoną dostępnością i wielousługowymi źródłami ruchu,

- model wiązki pełnodostępnej z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmem rezerwacji,
- model wiązki z ograniczoną dostępnością, z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmem rezerwacji,
- model wiązki pełnodostępnej z wielousługowymi źródłami ruchu i właściwymi mechanizmami progowymi,
- model wiązki z ograniczoną dostępnością, z wielousługowymi źródłami ruchu i właściwymi mechanizmami progowymi,
- model wiązki pełnodostępnej z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi z histerezą,
- model wiązki z ograniczoną dostępnością, z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi z histerezą.

Zaproponowane modele wiązek z wielousługowymi źródłami ruchu umożliwiają wyznaczenie rozkładu zajętości oraz prawdopodobieństwa blokady w takich systemach. Są one również podstawą konstrukcji nowych modeli wielousługowych pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu. Modele te umożliwiają wyznaczenie prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa oraz punkt-punkt w polach komutacyjnych z zaimplementowanymi mechanizmami progowymi.

W wyniku przeprowadzonych badań, których rezultaty zawarto w rozprawie, zaproponowano następujące modele:

- model pola komutacyjnego z wielousługowymi źródłami ruchu,
- model pola komutacyjnego z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami rezerwacji,
- model pola komutacyjnego z wielousługowymi źródłami ruchu i właściwymi mechanizmami progowymi,
- model pola komutacyjnego z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi z histerezą,
- uogólniony model pola komutacyjnego z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi.

Wysoka efektywność i dokładność zaproponowanych modeli pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi pozwala na ich zastosowanie praktyczne w obszarze projektowania oraz optymalizacji systemów sieciowych z zaawansowanymi mechanizmami zarządzania ruchem.

Celem rozprawy jest opracowanie spójnej metodologii modelowania wielousługowych pól komutacyjnych obsługujących strumienie ruchu generowane przez wielousługowe źródła ruchu, w których zaimplementowano zaawansowane mechanizmy progowe sterowania dostępem do zasobów.

Teza pracy jest następująca: *Możliwe jest opracowanie modeli analitycznych, umożliwiających efektywne określanie charakterystyk ruchowych wielousługowych pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i zaimplementowanymi mechanizmami progowymi.*

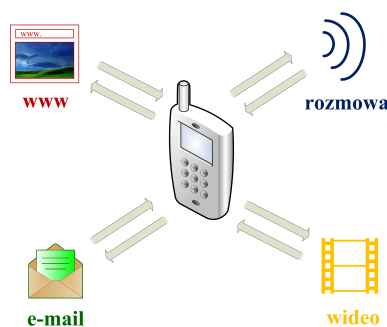
# Systemy wielousługowe z wielousługowymi źródłami ruchu

## 2.1. Ogólny model systemu

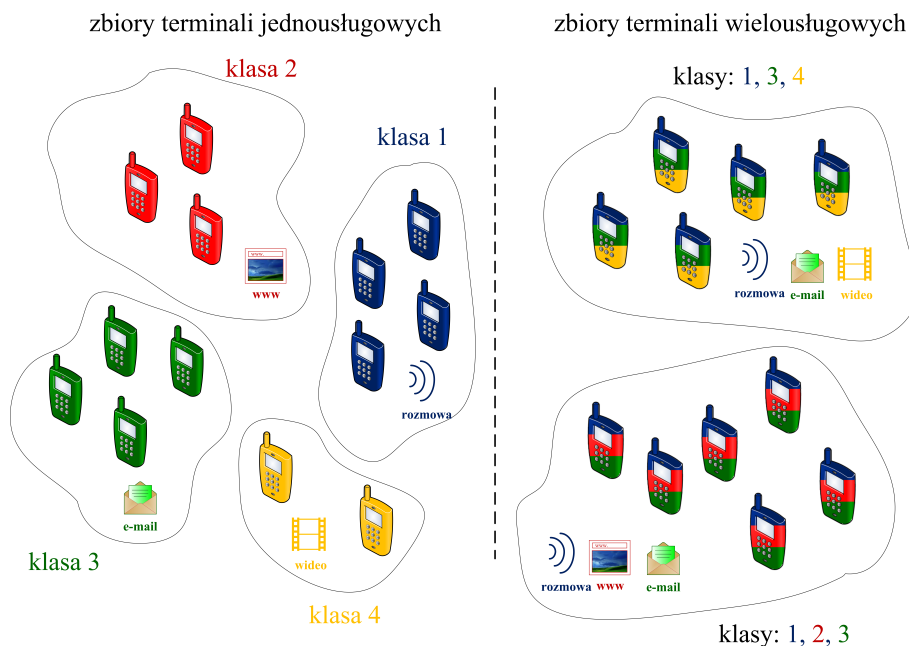
W rozprawie rozważano systemy wielousługowe z zależnym od stanu procesem napływania i przyjmowania zgłoszeń o pojemności  $V$ . W systemach tych określa się  $m$  klas ruchu należących do zbioru  $\mathbb{M} = \{1, 2, \dots, m\}$ . Każda klasa ze zbioru  $\mathbb{M}$  zdefiniowana jest poprzez następujące parametry: liczbę  $t_c$  żądanych PJP do zestawienia nowego połączenia klasy  $c$  oraz parametr  $\mu_c$  wykładniczego rozkładu czasu obsługi zgłoszeń klasy  $c$ .

W rozważanych systemach zgłoszenia poszczególnych klas ruchu mogą być generowane przez terminale (źródła ruchu)  $z$ -usługowe (rys. 2.1), tj. takie, które mogą być źródłem zgłoszeń  $z$  klas ruchu, gdzie  $z = 1, 2, \dots, m$ . Usługi związane z danym typem terminala są podzbiorem zbioru  $\mathbb{M}$  wszystkich klas ruchu zdefiniowanych w systemie. Rozważane systemy określane są jako systemy wielousługowe z wielousługowymi źródłami ruchu. Zauważmy, że rozważane dotychczas w literaturze systemy wielousługowe były systemami z jednousługowymi źródłami ruchu, w których pojedyncze źródło danej klasy ruchu mogło generować jeden, ściśle określony strumień ruchu. Porównanie systemów wielousługowych, z jednousługowymi i z wielousługowymi źródłami ruchu, przedstawiono na rysunku 2.2.

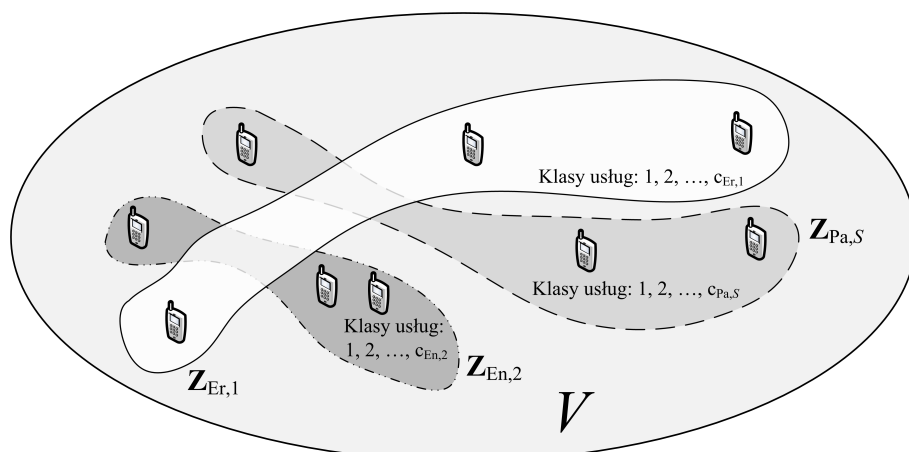
W rozprawie przyjęto, że poszczególne typy terminali mogą generować strumienie zgło-



Rys. 2.1: Terminal wielousługowy



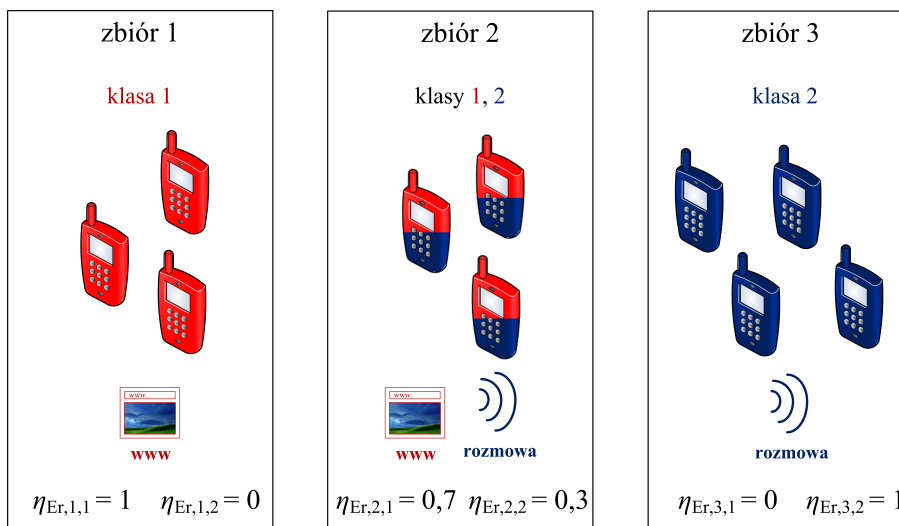
**Rys. 2.2:** Porównanie systemu wielosługowego z jednousługowymi źródłami ruchu z systemem wielosługowym z wielosługowymi źródłami ruchu



**Rys. 2.3:** System ze skończoną liczbą wielosługowych źródeł ruchu

szeń BPP (ang. Binomial-Poisson-Pascal). Wymienione typy strumieni zgłoszeń związane są ze strumieniami ruchu, odpowiednio Engseta, Erlanga i Pascala. W celu ułatwienia analizy rozważanego systemu z terminalami wielosługowymi zgrupowano źródła ruchu w zbiory generujące strumienie tego samego typu (rys. 2.3). W rozprawie oznaczono przez  $Z_{C,s}$  zbiór terminali nr  $s$ , gdzie  $C=Er|En|Pa$  określa jeden z trzech typów strumieni ruchu, odpowiednio Erlanga, Engseta bądź Pascala. Dla zbioru terminali nr  $s$  dostępny jest zbiór usług  $C_{C,s} = \{1, 2, \dots, c_{C,s}\}$ , gdzie  $c_{C,s}$  określa maksymalną liczbę usług, z których mogą korzystać terminale ze zbioru  $Z_{C,s}$ .

W rozważanym ogólnym modelu systemu zdefiniowano  $s_I$  zbiorów źródeł ruchu generujących strumienie ruchu Erlanga,  $s_J$  zbiorów źródeł ruchu generujących strumienie ruchu Engseta oraz  $s_K$  zbiorów źródeł ruchu generujących strumienie ruchu Pascala. Całkowita liczba zbiorów źródeł ruchu w systemie wynosi  $S = s_I + s_J + s_K$ .



**Rys. 2.4:** Udział klas zgłoszeń w strukturze ruchu oferowanego

Udział każdej klasy (ze zbioru  $\mathbb{M}$ ) w strukturze ruchu generowanego przez źródła odpowiednio ze zbiorów  $\mathbb{Z}_{Er,i}$ ,  $\mathbb{Z}_{En,j}$ ,  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$  jest określony za pomocą parametrów  $\eta_{Er,i,c}$ ,  $\eta_{En,j,c}$  i  $\eta_{Pa,k,c}$  gdzie  $c$  określa numer klasy usług. Parametry te dla poszczególnych zbiorów źródeł ruchu Erlanga, Engseta oraz Pascala spełniają następujące zależności:

$$\bigwedge_{1 \leq i \leq s_I} \sum_{c=1}^{c_{Er,i}} \eta_{Er,i,c} = 1, \quad \bigwedge_{1 \leq j \leq s_J} \sum_{c=1}^{c_{En,j}} \eta_{En,j,c} = 1, \quad \bigwedge_{1 \leq k \leq s_K} \sum_{c=1}^{c_{Pa,k}} \eta_{Pa,k,c} = 1. \quad (2.1)$$

Na rys. 2.4 przedstawiono przykładowe wartości parametru  $\eta$  dla systemu, w którym zdefiniowano dwie klasy zgłoszeń i trzy zbiory źródeł ruchu Erlanga. Terminale należące do zbioru pierwszego generują wyłącznie zgłoszenia klasy pierwszej, natomiast terminale należące do zbioru trzeciego – wyłącznie zgłoszenia klasy drugiej. W przypadku terminali należących do zbioru drugiego, 70% generowanych zgłoszeń stanowią zgłoszenia klasy pierwszej, a 30% – klasy drugiej.

W rozprawie zaproponowano metodę MIM-MSS (ang. Multiple Iteration Method – Multi-service Sources), umożliwiającą wyznaczenie rozkładu zajętości w systemach wielosługowych z wielosługowymi źródłami ruchu, tj. w systemach, w których pojedyncze źródło może generować strumień ruchu wielu klas. W metodzie MIM-MSS założono, że rozkład zajętości w systemie z wielosługowymi źródłami ruchu może być wyznaczony na podstawie odpowiednio zmodyfikowanego uogólnionego wzoru Kaufmana-Robertsza, w którym uwzględniony zostanie udział poszczególnych klas ruchu w strukturze ruchu generowanego przez źródła ze zbiorów Erlanga, Engseta i Pascala.

W przypadku strumieni ruchu Erlanga, intensywność pojawiania się nowych zgłoszeń nie zależy od liczby obsługiwanych źródeł ruchu. W konsekwencji, dla rozważanego systemu średnia wartość ruchu generowanego przez źródła Erlanga ze zbioru  $\mathbb{Z}_{Er,i}$ , generujące zgłoszenia klasy  $c$ , wynosi:

$$A_{Er,i,c} = \eta_{Er,i,c} \lambda_{Er,i} / \mu_c, \quad (2.2)$$

gdzie  $\lambda_{Er,i}$  jest intensywnością generowania zgłoszeń przez źródła należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{Er,i}$ , a  $\mu_c^{-1}$  jest średnim czasem obsługi zgłoszeń klasy  $c$ .

W przypadku źródeł Engseta, intensywność pojawiania się nowych zgłoszeń poszczególnych klas ruchu maleje wraz ze wzrostem liczby źródeł będących w stanie ON, natomiast w przypadku źródeł Pascala intensywność pojawiania się nowych zgłoszeń poszczególnych klas ruchu wzrasta wraz ze wzrostem liczby źródeł ruchu będących w stanie ON. Wartości ruchu  $A_{En,j,c}(n)$  oraz  $A_{Pa,k,c}(n)$  oferowanego odpowiednio przez źródła Engseta ze zbioru  $\mathbb{Z}_{En,j}$  oraz Pascala ze zbioru  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$  generujące zgłoszenia klasy  $c$ , w stanie  $n$  zajętych PJP, mogą być wyznaczone na podstawie następujących wzorów:

$$A_{En,j,c}(n) = [\eta_{En,j,c} N_{En,j} - y_{En,j,c}(n)] \alpha_{En,j}, \quad A_{Pa,k,c}(n) = [\eta_{Pa,k,c} S_{Pa,k} + y_{Pa,k,c}(n)] \beta_{Pa,k}, \quad (2.3)$$

gdzie:

- $N_{En,j}$  – liczba źródeł ruchu Engseta należących do zbioru  $\mathbb{Z}_{En,j}$ ,
- $S_{Pa,k}$  – liczba źródeł ruchu Pascala należących do zbioru  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$ ,
- $y_{En,j,c}(n)$  – średnia liczba zgłoszeń klasy  $c$ , wygenerowanych przez źródła Engseta należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{En,j}$ , aktualnie obsługiwanych w systemie w stanie zajętości  $n$ ,
- $y_{Pa,k,c}(n)$  – średnia liczba zgłoszeń klasy  $c$ , wygenerowanych przez źródła Pascala należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$ , aktualnie obsługiwanych w systemie w stanie zajętości  $n$ ,
- $\alpha_{En,j}$  – średnie natężenie ruchu generowanego przez pojedyncze wolne źródło Engseta, należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{En,j}$ :

$$\alpha_{En,j} = \sum_{c=1}^{c_{En,j}} \eta_{En,j,c} \frac{\gamma_{En,j}}{\mu_c}, \quad (2.4)$$

gdzie  $\gamma_{En,j}$  – intensywność pojawiania się nowych zgłoszeń generowanych przez pojedyncze wolne źródło Engseta należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{En,j}$ ,

- $\beta_{Pa,k}$  – średnie natężenie ruchu generowanego przez pojedyncze źródło Pascala, należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$ :

$$\beta_{Pa,k} = \sum_{c=1}^{c_{Pa,k}} \eta_{Pa,k,c} \frac{\gamma_{Pa,k}}{\mu_c}, \quad (2.5)$$

gdzie  $\gamma_{Pa,k}$  – intensywność pojawiania się nowych zgłoszeń generowanych przez pojedyncze wolne źródło Pascala należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$ .

Znając wartość ruchu oferowanego przez poszczególne zbiory źródeł ruchu generujące zgłoszenia danych klas ruchu można wyznaczyć rozkład zajętości w rozważanym systemie

z zależnym od stanu procesem przyjmowania i napływania zgłoszeń oraz z wielousługowymi źródłami ruchu na podstawie wzoru:

$$\begin{aligned}
n[P_n]_V = & \sum_{i=1}^{s_I} \sum_{c=1}^{c_{Er,i}} A_{Er,i,c} \sigma_{c, Całk}(n-t_c) t_c [P_{n-t_c}]_V + \\
& + \sum_{j=1}^{s_J} \sum_{c=1}^{c_{En,j}} A_{En,j,c} (n-t_c) \sigma_{c, Całk}(n-t_c) t_c [P_{n-t_c}]_V + \\
& + \sum_{k=1}^{s_K} \sum_{c=1}^{c_{Pa,k}} A_{Pa,k,c} (n-t_c) \sigma_{c, Całk}(n-t_c) t_c [P_{n-t_c}]_V, \quad (2.6)
\end{aligned}$$

gdzie  $[P_n]_V$  jest rozkładem zajętości (prawdopodobieństwo zajętości  $n$  PJP) w systemie o pojemności  $V$ , a parametr  $\sigma_{c, Całk}(n)$  jest warunkowym prawdopodobieństwem przejścia i określa zależność strumienia obsługi w systemie od aktualnego stanu systemu. Zależność ta może wynikać m.in. z zastosowanego typu mechanizmu progowego. W ogólnym przypadku parametr  $\sigma_{c, Całk}(n)$  jest określony następująco:

$$\sigma_{c, Całk}(n) = \prod_{g=1}^G \sigma_{c,g}(n), \quad (2.7)$$

gdzie  $\sigma_{c,g}(n)$  jest  $g$ -tym mechanizmem, uzależniającym obsługę zgłoszeń klasy  $c$  od stanu  $n$  procesu.

Dysponując rozkładem zajętości, otrzymanym na podstawie wzoru (2.6), można wyznaczyć wartości parametrów  $y_{En,j,c}(n)$  oraz  $y_{Pa,k,c}(n)$ , na podstawie odpowiednio zmodyfikowanych równań równowagi lokalnej:

$$y_{En,j,c}(n) = \begin{cases} A_{En,j,c}(n-t_c) \sigma_{c, Całk}(n-t_c) [P_{n-t_c}]_V / [P_n]_V & \text{dla } n \leq V, \\ 0, & \text{dla } n > V, \end{cases} \quad (2.8)$$

$$y_{Pa,k,c}(n) = \begin{cases} A_{Pa,k,c}(n-t_c) \sigma_{c, Całk}(n-t_c) [P_{n-t_c}]_V / [P_n]_V & \text{dla } n \leq V, \\ 0, & \text{dla } n > V. \end{cases} \quad (2.9)$$

Znajomość rozkładu  $[P_n]_V$  jest wymagana w celu wyznaczenia parametrów  $y_{En,j,c}(n)$  oraz  $y_{Pa,k,c}(n)$ . Natomiast, aby określić rozkład  $[P_n]_V$  konieczna jest znajomość wartości ruchu  $A_{En,j,c}(n)$  i  $A_{Pa,k,c}(n)$ , uzależnionego od parametrów  $y_{En,j,c}(n)$  oraz  $y_{Pa,k,c}(n)$ . Równania (2.3), (2.8) i (2.9) oraz (2.6) tworzą zatem układ równań uwikłanych. W celu rozwiązania danego układu równań uwikłanych konieczne jest użycie, opisanych w rozprawie, metod iteracyjnych.

Prawdopodobieństwo blokady określone jest dla każdej z  $m$  klas usług obsługiwanych w systemie wielousługowym. Dla zgłoszeń klasy  $c$  może być ono wyrażone za pomocą



następującego wzoru:

$$E_c = \sum_{n=0}^{V-t_c} [P_n]_V [1 - \sigma_{c, \text{Całk}}(n)] + \sum_{n=V-t_c+1}^V [P_n]_V. \quad (2.10)$$

Na podstawie rozkładu zajętości możemy również wyznaczyć prawdopodobieństwo strat dla zgłoszeń klasy  $c$  generowanych przez źródła Engseta, należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{\text{En},j}$  oraz dla zgłoszeń klasy  $c$  generowanych przez źródła Pascala, należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{\text{Pa},k}$ , jako stosunek strumienia straconych zgłoszeń (zgłoszenia pojawiające się w systemie w stanach blokowanych) do strumienia zgłoszeń pojawiających się w systemie we wszystkich stanach zajętości.

## 2.2. Modele wiązek łączy

Opracowany, ogólny model systemu wielosługowego z wielosługowymi źródłami ruchu wykorzystano następnie do konstrukcji modeli wiązek łączy. Rozważano modele zarówno systemów bez mechanizmów progowych, jak i z mechanizmami progowymi. W szczególności w rozprawie opracowano następujące analityczne modele wiązek łączy:

### 1. Model pojedynczego łączy:

- wiązka pełnodostępna bez mechanizmów progowych,
- wiązka pełnodostępna z rezerwacją,
- wiązka pełnodostępna z właściwymi mechanizmami progowymi,
- wiązka pełnodostępna z mechanizmami progowymi z histerezą.

### 2. Model separowanych łączy:

- wiązka z ograniczoną dostępnością bez mechanizmów progowych,
- wiązka z ograniczoną dostępnością i rezerwacją,
- wiązka z ograniczoną dostępnością i właściwymi mechanizmami progowymi,
- wiązka z ograniczoną dostępnością i mechanizmami progowymi z histerezą.

Dokładność opracowanych modeli określono porównując rezultaty uzyskane z obliczeń analitycznych z danymi uzyskanymi na podstawie eksperymentów symulacyjnych. Przeprowadzone badania porównawcze potwierdziły dużą dokładność proponowanych metod i tym samym poprawność przyjętych założeń teoretycznych.

Następnie, opracowane modele wiązek łączy posłużyły do skonstruowania modeli pól komutacyjnych z wielosługowymi źródłami ruchu, przedstawionych w dalszej części autoreferatu.

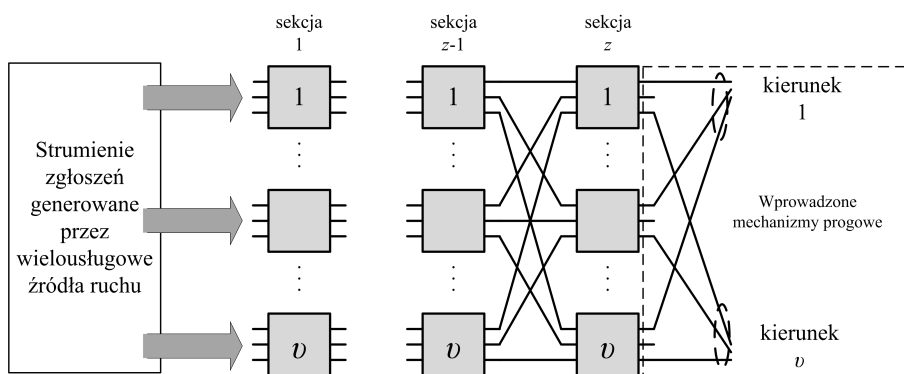
# Mechanizmy progowe w polach komutacyjnych

## 3.1. Podstawowe założenia

Kształtowanie zależności pomiędzy prawdopodobieństwami blokady zgłoszeń poszczególnych klas ruchu w wielousługowych polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu możliwe jest dzięki zastosowaniu mechanizmów progowych. Mechanizmy te mogą być traktowane jako realizacje funkcji sterowania przyjmowaniem nowych zgłoszeń. W skład mechanizmów progowych wchodzi: mechanizm rezerwacji, właściwe mechanizmy progowe oraz mechanizmy progowe z histerezą.

Zastosowanie rozważanych mechanizmów progowych w celu sterowania parametrami obsługi zgłoszeń polega na zmianie wartości przydzielanych zasobów zgłoszeniom poszczególnych klas ruchu w zależności od obciążenia pola komutacyjnego. Analizując pola komutacyjne z jednousługowymi źródłami ruchu, w literaturze przedmiotu można znaleźć modele pól, w których mechanizmy progowe są wprowadzane w łączach międzysekcyjnych lub w kierunkach wyjściowych.

W celu przedstawienia wpływu mechanizmów progowych na właściwości ruchowe i metody analizy wielousługowych pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu, rozważmy pole komutacyjne przedstawione na rysunku 3.1. Załóżmy, że każde łącze międzysekcyjne ma pojemność równą  $f$  PJP, a łącza wyjściowe tworzą grupy łącz nazywane kierunkami. Jedną z typowych realizacji kierunków wyjściowych została przedstawiona na rysunku 3.1. Każdy kierunek  $s$  posiada jedno łącze wyjściowe  $s$  z każdego komutatora ostatniej sekcji. Rozważane pole komutacyjne może pracować z algorytmami wyboru drogi połączeniowej punkt-grupa lub punkt-punkt. W rozprawie przyjęto, że rozważane mechanizmy progowe będą wprowadzane tylko w kierunkach wyjściowych pola komutacyjnego. Przyjęte założenie wynika z faktu, że wprowadzony mechanizm sterowania przyjmowaniem zgłoszeń odnosi się do łącz pomiędzy węzłami danej sieci i jego celem jest optymalizacja obciążenia sieci względem przyjętych parametrów jakości QoS.



Rys. 3.1: Wielosekcyjne pole komutacyjne z mechanizmami progowymi

Wprowadzenie mechanizmów progowych do kierunków wyjściowych wpływa na zmianę sposobu określania prawdopodobieństwa blokady zewnętrznej pola komutacyjnego. W przypadku klas, które nie podlegają działaniu mechanizmów progowych, blokada zewnętrzna występuje wówczas, gdy żaden z komutatorów ostatniej sekcji nie posiada przynajmniej  $t_c$  wolnych PJP w łączy żądanego kierunku wyjściowego. W przypadku klas, które podlegają działaniu mechanizmów progowych, blokada zewnętrzna zależy od stanu zajętości kierunku wyjściowego i przyjętych parametrów definiujących obszary progowe. Uzależnienie wielkości przydzielanych zasobów od odpowiednio sparametryzowanego mechanizmu progowego i stanu zajętości kierunków wyjściowych wpływa z kolei na zmianę obciążenia łączy międzysekcyjnych. Prowadzi to w konsekwencji do większej złożoności modelu wielosługowego pola komutacyjnego z mechanizmami progowymi.

## 3.2. Pole z mechanizmem rezerwacji

W rozprawie mechanizm rezerwacji wprowadzono dla klas należących do zbioru  $\mathbb{R}$ , który jest podzbiorem zbioru  $\mathbb{M}$  wszystkich klas ruchu oferowanych polu komutacyjnemu. Zaproponowany w pracy algorytm rezerwacji oddziałuje tylko na kierunki wyjściowe. W kierunkach wyjściowych wprowadza się tzw. granicę rezerwacji  $R_c$  dla klas ruchu należących do zbioru  $\mathbb{R}$ . Parametr  $R_c$  określa poziom zajętości wiązki (kierunku wyjściowego), powyżej której przyjęcie do obsługi zgłoszenia klasy  $c$  jest niemożliwe. Wszystkie stany zajętości powyżej granicy  $R_c$  należą do obszaru rezerwacji  $S_c$ , w którym zgłoszenia klasy  $c$  należącej do zbioru  $\mathbb{R}$  są blokowane:

$$S_c = V_L - R_c, \quad (3.1)$$

gdzie  $V_L$  jest całkowitą pojemnością wiązki łączy tworzących kierunek wyjściowy pola komutacyjnego:  $V_L = vf$ .

Zgłoszenie klasy  $c$ , nienależącej do zbioru  $\mathbb{R}$ , może być przyjęte do obsługi tylko wtedy, gdy może ono być całkowicie obsłużone przez zasoby jednego z łączy kierunku wyjścio-

wego. Natomiast zgłoszenie klasy  $c$ , należącej do zbioru  $\mathbb{R}$ , może być przyjęte do obsługi jeśli spełnione są następujące warunki:

1. liczba zajętych PJP żadanego kierunku wyjściowego jest mniejsza bądź równa granicy rezerwacji  $R_c$ ,
2. zgłoszenie może być całkowicie obsłużone przez zasoby jednego z łączy kierunku wyjściowego.

### 3.3. Pole z właściwymi mechanizmami progowymi

W systemach telekomunikacyjnych z wprowadzonymi mechanizmami progowymi parametry ruchu oferowanego zmieniają się w zależności od obciążenia systemu. Rozważmy jeden z możliwych tzw. właściwych mechanizmów progowych w wielousługowych polach komutacyjnych (rysunek 3.1), którym oferowane są zgłoszenia  $m$  klas ruchu należących do zbioru  $\mathbb{M} = \{1, 2, \dots, m\}$ , generowane przez źródła wielousługowe. Zakładamy, że właściwy mechanizm progowy został wprowadzany w łączach kierunków wyjściowych pola dla klas należących do zbioru  $\mathbb{T}$ , który jest podzbiorem zbioru  $\mathbb{M}$ . Dla zgłoszeń klasy  $c$ , należącej do zbioru  $\mathbb{T}$ , zbiór wprowadzonych progów może zostać zapisany w następującej postaci:  $\{Q_{c,1}, Q_{c,2}, \dots, Q_{c,q_c}\}$ , gdzie pierwszy indeks każdego elementu określa numer klasy zgłoszeń, natomiast drugi indeks określa numer progów. Zakładamy również następującą zależność pomiędzy wprowadzonymi progami:  $Q_{c,1} \leq Q_{c,2} \leq \dots \leq Q_{c,q_c}$ .

Dany obszar progowy  $u$  klasy  $c$  należącej do zbioru  $\mathbb{T}$  ograniczony progami  $Q_{c,u}$  oraz  $Q_{c,u+1}$  jest zdefiniowany poprzez zbiór parametrów  $\{t_{c,u}, \mu_{c,u}\}$ , gdzie  $t_{c,0} > t_{c,1} > \dots > t_{c,u} > \dots > t_{c,q_c}$  oraz  $\mu_{c,0}^{-1} \leq \mu_{c,1}^{-1} \leq \dots \leq \mu_{c,u}^{-1} \leq \dots \leq \mu_{c,q_c}$ . Oznacza to, że wraz ze wzrostem obciążenia systemu liczba PJP przydzielanych zgłoszeniom poszczególnych klas maleje, natomiast średni czas obsługi zgłoszeń może wzrosnąć. Gdy obciążenie systemu maleje, liczba przydzielanych PJP zgłoszeniom poszczególnych klas wzrasta, a średni czas obsługi może się zmniejszyć.

### 3.4. Pole z mechanizmami progowymi z histerezą

W rozprawie rozważano także wielosekcyjne pola komutacyjne, w których wprowadzono mechanizmy progowe z histerezą. W przypadku tych mechanizmów, na zmianę wartości przydzielanych zasobów ma wpływ nie tylko przekroczenie żadanego progów, ale również kierunek przejścia. W porównaniu z właściwymi systemami progowymi, każdemu progowi we właściwym systemie progowym odpowiadają dwa progi w systemie progowym z histerezą. Jeden dla kierunku zmian od małych obciążeń do dużych, drugi dla kierunku zmian od dużych obciążeń do małych. Przekroczenie wartości danego progów w kierunku

dla niego właściwym powoduje zmianę wartości parametrów ruchu. Takie rozwiązanie pozwala zredukować liczbę przejść systemu pomiędzy sąsiednimi obszarami progowymi, co prowadzi do bardziej stabilnego działania systemu.

Mechanizm progowy z histerezą został wprowadzony w łączach kierunków wyjściowych pola komutacyjnego. W każdym kierunku wyjściowym zdefiniowano dwa progi  $Q_1$  oraz  $Q_2$  spełniające następującą zależność:  $Q_2 < Q_1$ . Ruch oferowany składa się z  $m$  klas należących do zbioru  $\mathbb{M} = \{1, 2, \dots, m\}$ . Mechanizm progowy z histerezą wprowadzono dla klas należących do zbioru  $\mathbb{H}$ , który jest podzbiorem zbioru  $\mathbb{M}$ . W przypadku wzrostu obciążenia w kierunkach wyjściowych powyżej zdefiniowanej granicy  $Q_1$ , następuje zmniejszenie liczby przydzielanych PJP zgłoszeniom klasy  $c$  należącej do zbioru  $\mathbb{H}$  z wartości  $t_{c,0}$  do  $t_{c,1}$ . Średni czas obsługi poszczególnych zgłoszeń może się zwiększyć z wartości  $\mu_{c,0}^{-1}$  do  $\mu_{c,1}^{-1}$ . Czas obsługi zmienia się dla zgłoszeń generowanych przez klasy elastyczne, natomiast dla klas adaptacyjnych pozostaje niezmienny. Jeśli w kolejnym etapie pracy systemu jego obciążenie zmniejsza się, to do momentu, w którym obciążenie nie osiągnie drugiego progu  $Q_2$ , zmniejszanie obciążenia nie będzie wpływać na liczbę przydzielanych PJP zgłoszeniom klas należących do zbioru  $\mathbb{H}$ . Dopiero gdy obciążenie systemu przekroczy próg  $Q_2$ , nastąpi zwiększenie liczby przydzielanych PJP zgłoszeniom klasy  $c$ . Możliwe też będzie zmniejszenie średniego czasu obsługi. Zatem, z każdą klasą należącą do zbioru  $\mathbb{H}$  związane są dwie pary parametrów:  $\{t_{c,0}, \mu_{c,0}^{-1}\}$  oraz  $\{t_{c,1}, \mu_{c,1}^{-1}\}$ , gdzie  $t_{c,0} > t_{c,1}$  oraz  $\mu_{c,0}^{-1} \leq \mu_{c,1}^{-1}$

# Modele pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu

## 4.1. Klasyczne modele pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu

W rozprawie zaproponowano zbiór modeli umożliwiających analityczne określenie prawdopodobieństwa blokady wewnętrznej i zewnętrznej punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych bez wprowadzonych mechanizmów progowych z wielousługowymi źródłami ruchu. Podstawą zaproponowanych modeli jest metoda efektywnej dostępności, polegająca na sprowadzeniu obliczeń prawdopodobieństwa blokady w wielosekcyjnym polu komutacyjnym z ruchem wielousługowym do obliczeń prawdopodobieństwa blokady w ekwiwalentnym modelu pola obsługującego ruch jednokanałowy. Zaproponowane metody określania prawdopodobieństwa blokady powstały w wyniku modyfikacji metod opracowanych dla pól komutacyjnych z jednousługowymi źródłami ruchu. Modyfikacje te polegały na zmianie sposobu określania parametru efektywnej dostępności (umożliwiającego wyznaczenie prawdopodobieństwa blokady wewnętrznej) oraz prawdopodobieństwa blokady zewnętrznej. Parametr efektywnej dostępności w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu określa się na podstawie modelu rozkładu zajętości w wiązce pełnodostępnej z wielousługowymi źródłami ruchu. Natomiast prawdopodobieństwo blokady zewnętrznej określa się na podstawie rozkładu zajętości w wiązce z ograniczoną dostępnością i wielousługowymi źródłami ruchu.

Następnie rozszerzono metody określania prawdopodobieństwa blokady w polach komutacyjnych bez mechanizmów progowych w celu umożliwienia analitycznego określenia prawdopodobieństwa blokady całkowitej (wewnętrznej i zewnętrznej) punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i wprowadzonymi mechanizmami progowymi. Wyszczególniono trzy grupy modeli pól komutacyjnych: z wprowadzonymi mechanizmami rezerwacji, z właściwymi mechanizmami progowymi

oraz z mechanizmami progowymi z histerezą. Wszystkie trzy typy mechanizmów określane są jako mechanizmy progowe. Ideą metod określania prawdopodobieństwa blokady całkowitej w polach komutacyjnych z mechanizmami progowymi jest uwzględnienie oddziaływania zmian obciążenia w wiązkach wyjściowych na zmiany obciążenia w łączach międzysekcyjnych. W celu uwzględnienia tego wpływu, w rozprawie zaproponowano proporcjonalne odwzorowanie wartości progów w kierunkach wyjściowych na wartości progów w łączach międzysekcyjnych:

$$Q_{c,u}^F = \lfloor Q_{c,u}^L/v \rfloor, \quad (4.1)$$

gdzie  $Q_{c,u}^L$  jest granicą obszaru progowego  $u$  w wiązce z ograniczoną dostępnością (modelującej kierunki wyjściowe), natomiast  $Q_{c,u}^F$  jest granicą obszaru progowego  $u$  w wiązce pełnodostępnej (modelującej łącza międzysekcyjne).

Dla każdego z zaproponowanych typów mechanizmów progowych opracowano odpowiednie metody umożliwiające określenie prawdopodobieństwa blokady w polach komutacyjnych z wielosługowymi źródłami ruchu. Zaproponowane zostały następujące metody (opisane w rozprawie w rozdziałach 4 i 5), dla odpowiednich typów selekcji (punkt-grupa i punkt-punkt):

1. Pola komutacyjne z selekcją punkt-grupa:

- pole komutacyjne bez mechanizmów progowych,
  - PGB (ang. Point-to-Group Blocking),
  - PGPPBRec (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent),
- pole komutacyjne z rezerwacją,
  - PGB-R (ang. Point-to-Group Blocking – Reservation),
  - PGPPBRec-R (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Reservation),
- pole komutacyjne z właściwymi mechanizmami progowymi,
  - PGB-T (ang. Point-to-Group Blocking – Threshold),
  - PGPPBRec-T (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Threshold),
- pole komutacyjne z mechanizmami progowymi z histerezą,
  - PGB-H (ang. Point-to-Group Blocking – Hysteresis),
  - PGPPBRec-H (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Hysteresis).

2. Pola komutacyjne z selekcją punkt-punkt:

- pole komutacyjne bez mechanizmów progowych,

- PPB (ang. Point-to-Point Blocking),
- PPD (ang. Point-to-Point Direct),
- PGPPBRec (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent),
- pole komutacyjne z rezerwacją,
  - PPB-R (ang. Point-to-Point Blocking – Reservation),
  - PPD-R (ang. Point-to-Point Direct – Reservation),
  - PGPPBRec-R (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Reservation),
- pole komutacyjne z właściwymi mechanizmami progowymi,
  - PPB-T (ang. Point-to-Point Blocking – Threshold),
  - PPD-T (ang. Point-to-Point Direct – Threshold),
  - PGPPBRec-T (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Threshold),
- pole komutacyjne z mechanizmami progowymi z histerezą,
  - PPB-H (ang. Point-to-Point Blocking – Hysteresis),
  - PPD-H (ang. Point-to-Point Direct – Hysteresis),
  - PGPPBRec-H (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Hysteresis).

Wszystkie te metody są metodami przybliżonymi. W celu oceny dokładności proponowanych metod, wyniki obliczeń analitycznych wybranych, wielousługowych pól komutacyjnych z mechanizmami progowymi, porównano z danymi uzyskanymi na podstawie eksperymentów symulacyjnych. Przeprowadzone badania porównawcze potwierdziły dużą dokładność proponowanych metod i tym samym poprawność wszystkich przyjętych założeń teoretycznych.

## 4.2. Ogólny model pola komutacyjnego z mechanizmami progowymi

Następnym etapem badań było opracowanie ogólnego modelu pola komutacyjnego z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi. Zaproponowane uogólnienie polega na ujednoczeniu procesu wyznaczania prawdopodobieństwa blokady wewnętrznej w wielousługowych polach komutacyjnych dla wszystkich rozważanych w rozprawie mechanizmów progowych, tj. mechanizmów rezerwacji, właściwych mechanizmów progowych oraz mechanizmów progowych z histerezą. Dodatkowo, opracowany model pozwala zwiększyć dokładność określania wpływu mechanizmów progowych, stosowanych w kierunkach wyjściowych, na charakterystyki ruchowe łączy międzysekcyjnych.



W uogólnionym modelu pola komutacyjnego z mechanizmami progowymi przyjęto, tak jak w klasycznych metodach modelowania pól komutacyjnych, że wiązki łączy wyjściowych mogą być analizowane na podstawie modelu wiązki z ograniczoną dostępnością, w której wprowadzono odpowiednie mechanizmy sterowania przyjmowaniem nowych zgłoszeń. Nowe podejście zastosowano natomiast do modelowania łączy międzysekcyjnych.

Wpływ mechanizmów progowych, wprowadzonych w wiązkach łączy wyjściowych, na strukturę ruchu oferowanego wiązkom międzysekcyjnym, jest uwzględniany poprzez przekształcenie oferowanego im ruchu, tj. poprzez zmianę liczby klas ruchu oferowanych łącom międzysekcyjnym. Zauważmy bowiem, że zgłoszeniom klasy  $c$ , oferowanym wiązkom wyjściowym, może być przydzielonych  $(q_c + 1)$  różnych  $t_{c,u}$  wartości zasobów (PJP), w zależności od stanu zajętości systemu, gdzie  $u$  jest numerem progów, a  $q_c$  jest liczbą progów zdefiniowanych dla klasy  $c^1$ . Określona liczba żądań zasobów, które mogą wystąpić w kierunkach wyjściowych w wyniku zastosowanych mechanizmów progowych, określa jednocześnie maksymalną liczbę klas ruchu, których zgłoszenia mogą być oferowane łącom międzysekcyjnym.

Łączna międzysekcyjne, w proponowanej metodzie, modelowane są na podstawie wiązki pełnodostępnej bez wprowadzonych mechanizmów progowych, ale z uwzględnieniem zmiennej liczby klas ruchu. Zmianie nie ulega liczba zdefiniowanych zbiorów źródeł ruchu  $s_I$  Erlanga,  $s_J$  Engseta i  $s_K$  Pascala, a jedynie liczba klas ruchu, należących do odpowiednich zbiorów  $\mathbb{C}_{Er,i}$ ,  $\mathbb{C}_{En,j}$  i  $\mathbb{C}_{Pa,k}$  klas ruchu, związanych z odpowiednimi zbiorami wielousługowych źródeł ruchu. Zwiększona liczność zbiorów  $\mathbb{C}_{Er,i}$ ,  $\mathbb{C}_{En,j}$  i  $\mathbb{C}_{Pa,k}$  może być wyrażona następującymi równaniami:

$$c_{Er,i}^F = \sum_{c=1}^{c_{Er,i}} (q_c + 1), \quad c_{En,j}^F = \sum_{c=1}^{c_{En,j}} (q_c + 1), \quad c_{Pa,k}^F = \sum_{c=1}^{c_{Pa,k}} (q_c + 1). \quad (4.2)$$

Parametry  $t_c$  oraz  $\mu_c$  dla nowych klas ruchu, związanych ze strumieniami zgłoszeń oferowanych wiązkę pełnodostępnej, otrzymujemy w wyniku odpowiedniego przyporządkowania parametrów  $t_{c,u}$  oraz  $\mu_{c,u}$  związanych ze strumieniami zgłoszeń oferowanymi wiązkę z ograniczoną dostępnością w poszczególnych obszarach progowych. Przyporządkowanie parametrom  $t_c$  oraz  $\mu_c$  odpowiednich wartości odbywa się na podstawie następujących wzorów:

$$\forall_{1 \leq c \leq m} \forall_{0 \leq u \leq q_c} t_{c+u+\sum_{z=1}^{c-1} q_z} = t_{c,u}, \quad (4.3)$$

$$\forall_{1 \leq c \leq m} \forall_{0 \leq u \leq q_c} \mu_{c+u+\sum_{z=1}^{c-1} q_z} = \mu_{c,u}. \quad (4.4)$$

We wzorach (4.3) i (4.4) wyrażenie  $\sum_{z=1}^{c-1} q_z$  umożliwia uniknięcie duplikacji indeksów związanych z nowymi klasami ruchu. Zastosowany sposób określania wartości paramet-

<sup>1</sup>Szczególnym przypadkiem mechanizmu progowego jest mechanizm rezerwacji, w którym w ostatnim obszarze progowym (tzw. obszarze rezerwacji) żądania klas ruchu, dla których wprowadzono mechanizm rezerwacji, nie są obsługiwane. W takim przypadku mamy  $\{t_{c,q_c} = 0, \mu_{c,q_c} = 0\}$ .

trów  $t_c$  oraz  $\mu_c$  umożliwia wykorzystanie modelu wiązki pełnodostępnej bez mechanizmów progowych do aproksymacji łączy międzysekcyjnych pól komutacyjnych z mechanizmami progowymi.

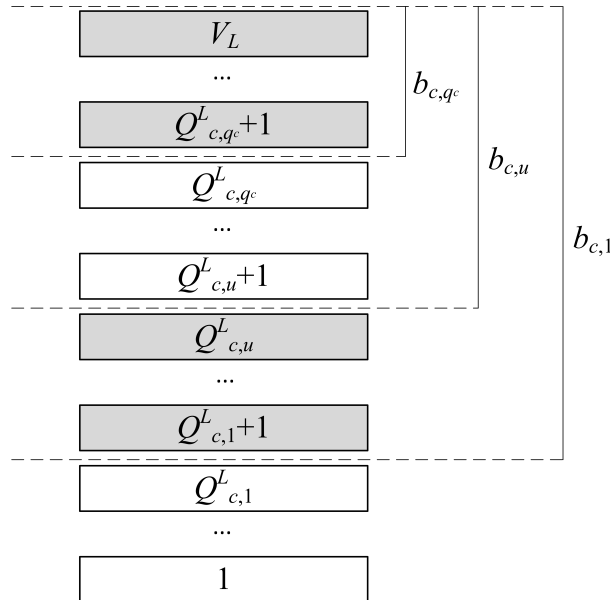
W rozprawie opracowano sposób określenia natężenia ruchu oferowanego nowej klasy  $c$  w łączu międzysekcyjnym. W tym celu do rozważanego modelu wprowadzono parametr  $b_{c,u}$ , który określa prawdopodobieństwo blokady zgłoszeń klasy  $c$ , którym przydzielana jest dana liczba PJP, właściwa dla obszaru progowego  $u - 1$ . Wartości parametru  $b_{c,u}$  mogą być określone na podstawie następującego wzoru:

$$b_{c,u} = \sum_{n=Q_{c,u}^L+1}^{V_L} [P_n]_{V_L}, \quad (4.5)$$

gdzie  $[P_n]_{V_L}$  jest rozkładem zajętości określonym na podstawie modelu wiązki z ograniczoną dostępnością i mechanizmami progowymi. Parametr  $b_{c,u}$  jest równy sumie prawdopodobieństw tych stanów (rys. 4.1), w których zgłoszeniu klasy  $c$  nie jest możliwe przydzielenie zasobów równych:  $(t_{c,u-1}, t_{c,u-2}, \dots, t_{c,0})$ .

Dysponując wartościami parametru  $b_{c,u}$ , możemy określić wartość ruchu oferowanego w poszczególnych obszarach kierunku wyjściowego. Do obszaru progowego  $u$  kierowany jest ruch zablokowany w obszarach progowych od zerowego (w obszarze przedporogowym) do  $u - 1$ .

Uwzględniając powyższe rozumowanie i biorąc pod uwagę całkowity ruch oferowany



**Rys. 4.1:** Wyznaczanie parametru  $b_{c,u}$  w wiązce z ograniczoną dostępnością

łączy międzysekcyjnym<sup>2</sup> możemy określić wartość średniego ruchu Erlanga:

$$\begin{aligned} \forall_{1 \leq i \leq s_I} \forall_{1 \leq c \leq c_{Er,i}} \forall_{0 \leq u \leq q_c} A_{Er,i,c,u+\sum_{z=1}^{c-1} q_z}^F &= \\ &= \begin{cases} [A_{Er,i,c,0}(1 - b_{c,u+1}) \prod_{z=1}^u b_{c,z}] / v & \text{dla } u < q_c, \\ [A_{Er,i,c,0} \prod_{z=1}^u b_{c,z}] / v & \text{dla } u = q_c, \end{cases} \end{aligned} \quad (4.6)$$

gdzie  $A_{Er,i,c,0}$  jest średnią wartością ruchu oferowanego kierunkowi wyjściowemu w obszarze przedprogowym. Następnie można określić wartości średniego ruchu  $\alpha_{En,j,c}^F$  oraz  $\beta_{Pa,k,c}^F$  oferowanego przez jedno wolne źródło ze zbioru źródeł ruchu, odpowiednio Engseta oraz Pascala:

$$\begin{aligned} \forall_{1 \leq j \leq s_J} \forall_{1 \leq c \leq c_{En,j}} \forall_{0 \leq u \leq q_c} \alpha_{En,j,c,u+\sum_{z=1}^{c-1} q_z}^F &= \\ &= \begin{cases} [\alpha_{En,j,c,0}(1 - b_{c,u+1}) \prod_{z=1}^u b_{c,z}] / v & \text{dla } u < q_c, \\ [\alpha_{En,j,c,0} \prod_{z=1}^u b_{c,z}] / v & \text{dla } u = q_c, \end{cases} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \forall_{1 \leq k \leq s_K} \forall_{1 \leq c \leq c_{Pa,k}} \forall_{0 \leq u \leq q_c} \beta_{Pa,k,c,u+\sum_{z=1}^{c-1} q_z}^F &= \\ &= \begin{cases} [\beta_{Pa,k,c,0}(1 - b_{c,u+1}) \prod_{z=1}^u b_{c,z}] / v & \text{dla } u < q_c, \\ [\beta_{Pa,k,c,0} \prod_{z=1}^u b_{c,z}] / v & \text{dla } u = q_c. \end{cases} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Średnie natężenia ruchu  $\alpha_{En,j,c,0}$  i  $\beta_{Pa,k,c,0}$  oferowanego przez jedno wolne źródło Engseta oraz Pascala w obszarze przedprogowym jest określone na podstawie następujących wzorów:

$$\alpha_{En,j,c,0} = \eta_{En,j,c} \frac{\gamma_{En,j}}{\mu_{c,0}}, \quad (4.9)$$

$$\beta_{Pa,k,c,0} = \eta_{Pa,k,c} \frac{\gamma_{Pa,k}}{\mu_{c,0}}, \quad (4.10)$$

gdzie  $\gamma_{En,j}$  jest intensywnością pojawiania się nowych zgłoszeń generowanych przez pojedyncze wolne źródło Engseta należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{En,j}$ , natomiast  $\gamma_{Pa,k}$  jest intensywnością pojawiania się nowych zgłoszeń generowanych przez pojedyncze wolne źródło Pascala należące do zbioru  $\mathbb{Z}_{Pa,k}$ .

Dysponując wartościami  $A_{Er,i,c}^F$  średniego natężenia ruchu klasy  $c$  ze zbioru Erlanga,  $\alpha_{En,j,c}^F$  średniego natężenia ruchu klasy  $c$  generowanego przez jedno wolne źródło ze zbioru Engseta oraz  $\beta_{Pa,k,c}^F$  średniego natężenia ruchu klasy  $c$  generowanego przez jedno wolne źródło ze zbioru Pascala można wyznaczyć rozkład zajętości  $[P_n]_{V_F}$  oraz prawdopodobień-

<sup>2</sup>Wartość ruchu przypadającego na jedno łącze międzysekcyjne, żądającego  $t_{c+u}$  PJP, jest  $v$  razy mniejsza niż wartość ruchu oferowanego kierunkowi wyjściowemu.

stwo blokady w łączy międzysekcyjnym na podstawie metody MIM-MSS.

Następnie można określić wartość parametru efektywnej dostępności dla zgłoszeń poszczególnych klas ruchu i – w konsekwencji – prawdopodobieństwo blokady w wielosekcyjnych polach komutacyjnych. W rozprawie opracowano następujące nowe, uogólnione metody obliczania całkowitego prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa i punkt-punkt w wielosługowych polach komutacyjnych z wielosługowymi źródłami ruchu i wprowadzonymi mechanizmami progowymi:

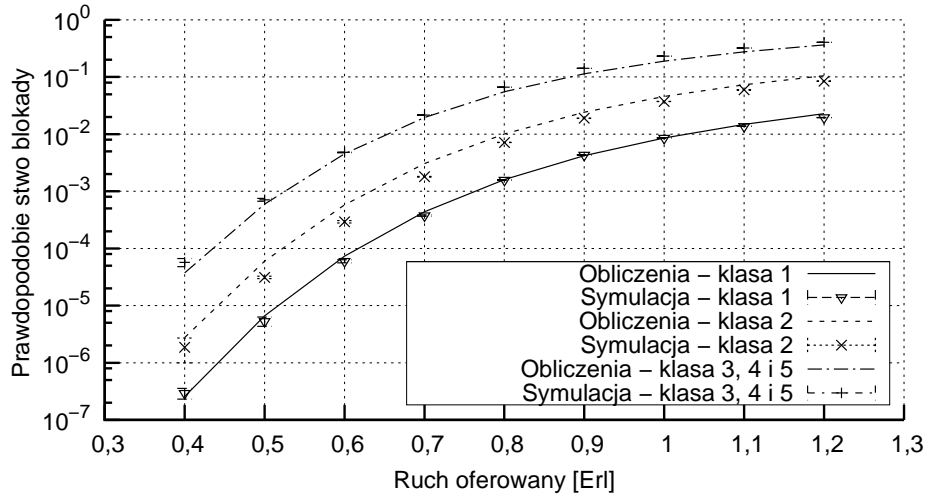
- PGB-U (ang. Point-to-Group Blocking – Universal),
- PPB-U (ang. Point-to-Point Blocking – Universal),
- PPD-U (ang. Point-to-Point Direct – Universal),
- PGPPBRec-U (ang. Point-to-Group and Point-to-Point Blocking Recurrent – Universal).

Aby ocenić poprawność przyjętych założeń teoretycznych, rezultaty obliczeń analitycznych, uzyskanych na podstawie metod PGB-U, PPB-U, PPD-U oraz PGPPBRec-U, porównano z wynikami uzyskanymi na podstawie eksperymentów symulacyjnych. Badania przeprowadzono dla 3-sekcyjnych pól komutacyjnych zbudowanych z komutatorów  $v \times v$  łączy, każde o pojemności  $f$  PJP.

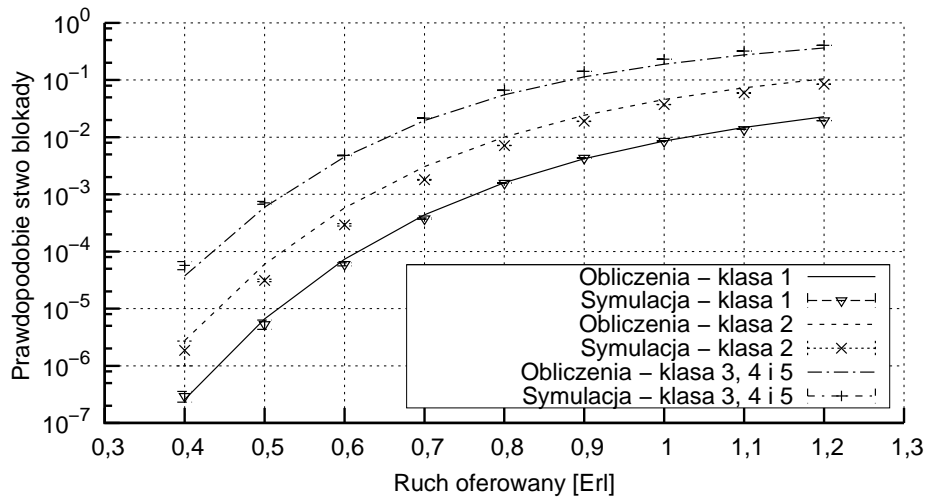
Wyniki obliczeń analitycznych i rezultaty badań symulacyjnych prawdopodobieństwa blokady poszczególnych klas zgłoszeń przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 4.2-4.6. Wyniki eksperymentów symulacyjnych przedstawiono w postaci odpowiednio oznaczonych punktów z zaznaczonymi przedziałami ufności (95-procentowy poziom ufności), określonymi dla 5 serii symulacji. Czas trwania poszczególnych serii symulacji, przy określaniu prawdopodobieństwa blokady, wyznaczany był na podstawie czasu niezbędnego do wygenerowania 1000000 zgłoszeń klasy, która żądała największej liczby PJP. W wielu przypadkach wielkość przedziału ufności jest mniejsza niż wysokość symbolu użytego do wskazania rezultatów symulacji. Rezultaty obliczeń i symulacji przedstawiono w funkcji ruchu jednostkowego  $a$ , oferowanego pojedynczej PJP systemu.

Pierwszym badanym systemem było pole komutacyjne z wielosługowymi źródłami ruchu i właściwymi mechanizmami progowymi, scharakteryzowane następującymi parametrami:

- struktura pola komutacyjnego:  $v = 4$ ,  $f = 28$  PJP,  $V = 112$  PJP;
- struktura ruchu oferowanego:
  - klasy ruchu:  $m = 4$ ,  $t_{1,0} = 1$  PJP,  $\mu_{1,0}^{-1} = 1$ ,  $t_{2,0} = 2$  PJP,  $\mu_{2,0}^{-1} = 1$ ,  $t_{3,0} = 4$  PJP,  $\mu_{3,0}^{-1} = 1$ ,  $t_{4,0} = 8$  PJP,  $\mu_{4,0}^{-1} = 1$ ,  $t_{4,1} = 4$  PJP,  $\mu_{4,1}^{-1} = 2$ ,  $t_{5,0} = 12$  PJP,  $\mu_{5,0}^{-1} = 1$ ,  $t_{5,1} = 8$  PJP,  $\mu_{5,1}^{-1} = 1$ ,  $t_{5,2} = 4$  PJP,  $\mu_{5,2}^{-1} = 3$ ;



Rys. 4.2: Prawdopodobieństwo blokady punkt-grupa – metoda PGB-U

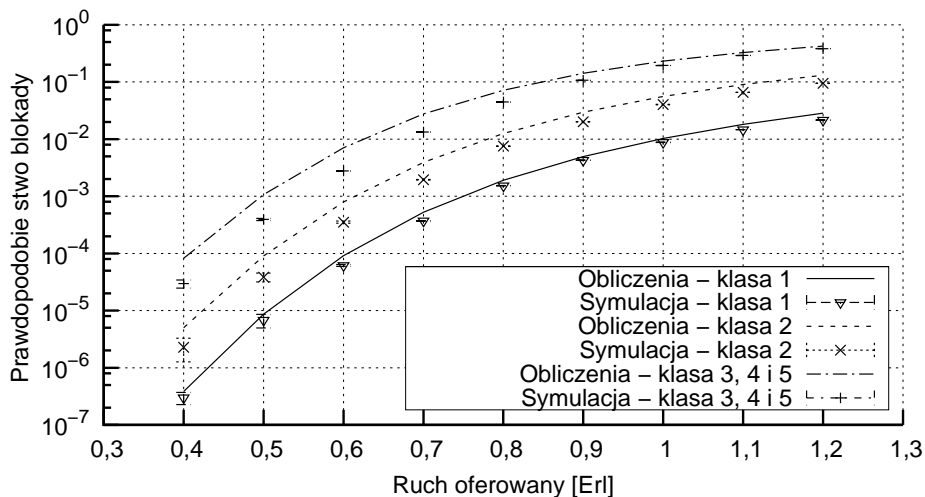


Rys. 4.3: Prawdopodobieństwo blokady punkt-grupa – metoda PGPPBRec-U

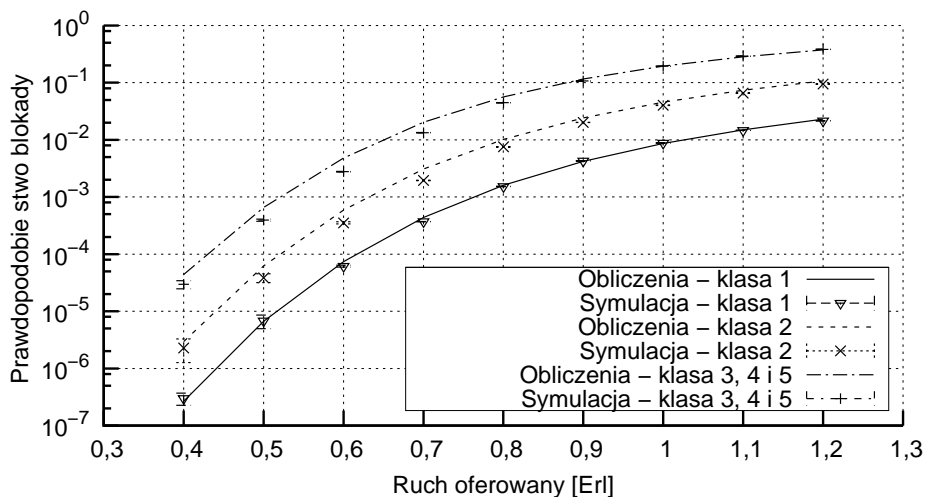
- zbiory źródeł ruchu:  $S = 3$ ,  $\mathbb{C}_{Er,1} = \{1, 3\}$ ,  $\eta_{Er,1,1} = 0,6$ ,  $\eta_{Er,1,3} = 0,4$ ,  $\mathbb{C}_{En,2} = \{1, 2, 4\}$ ,  $\eta_{En,2,1} = 0,5$ ,  $\eta_{En,2,2} = 0,3$ ,  $\eta_{En,2,4} = 0,2$ ,  $N_{En,2} = 1000$ ,  $\mathbb{C}_{En,3} = \{1, 4, 5\}$ ,  $\eta_{En,3,1} = 0,6$ ,  $\eta_{En,3,4} = 0,1$ ,  $\eta_{En,3,5} = 0,3$ ,  $N_{En,3} = 1000$ ;

- mechanizm progowy:  $Q_{4,1} = Q_{5,1} = 84$  PJP,  $Q_{5,2} = 72$  PJP.

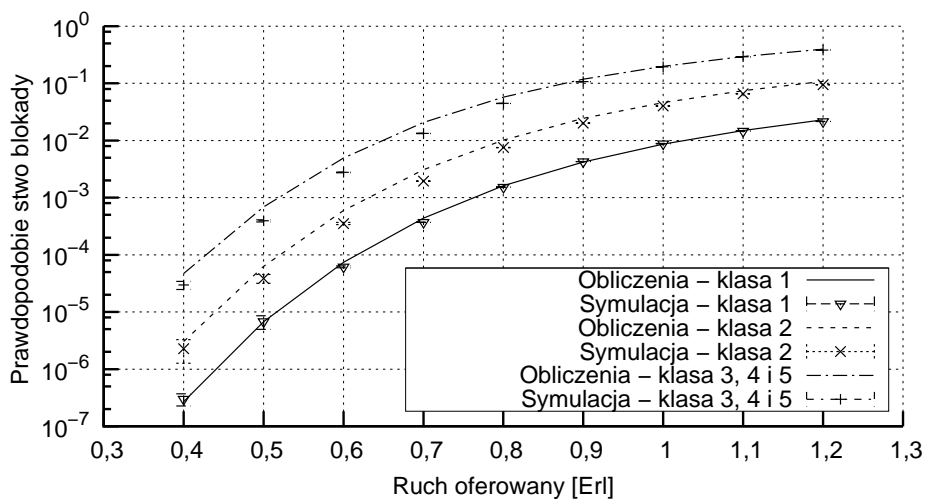
Rysunki 4.2 oraz 4.3 przedstawiają rezultaty prawdopodobieństwa punkt-grupa otrzymane na podstawie metod PGB-U i PGPPBRec-U. Natomiast rysunki 4.4, 4.5 oraz 4.6 przedstawiają rezultaty prawdopodobieństwa punkt-punkt otrzymane odpowiednio na podstawie metod PPB-U, PPD-U oraz PGPPBRec-U.



Rys. 4.4: Prawdopodobieństwo blokady punkt-punkt – metoda PPB-U



Rys. 4.5: Prawdopodobieństwo blokady punkt-punkt – metoda PPD-U



Rys. 4.6: Prawdopodobieństwo blokady punkt-punkt – metoda PGPPBRec-U

## Podsumowanie

Celem rozprawy było opracowanie spójnej metodologii modelowania pól komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi. Podstawą zaprezentowanych w rozprawie metod jest aproksymacja rzeczywistych procesów obsługi w polach komutacyjnych za pomocą jednowymiarowych łańcuchów Markowa. Przyjęte założenie pozwoliło na przybliżenie procesu obsługi w systemach zależnych od stanu (systemy z wprowadzonymi mechanizmami sterowania przyjmowaniem zgłoszeń) procesem odwracalnym, co w konsekwencji prowadzi do opracowania efektywnych obliczeniowo metod wyznaczania prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa oraz punkt-punkt w wielousługowych polach komutacyjnych. W rozprawie przedstawiono metody umożliwiające określenie charakterystyk ruchowych systemów z wielousługowymi źródłami ruchu, w których pojedyncze źródło może generować zgłoszenia kilku klas.

Rezultaty badań przeprowadzonych w rozprawie można podsumować w następujący sposób:

1. Opracowano model wiązki pełnodostępnej oraz wiązki z ograniczoną dostępnością dla wielousługowych źródeł ruchu.
2. Opracowano model wiązki pełnodostępnej z rezerwacją oraz wiązki z ograniczoną dostępnością i rezerwacją dla wielousługowych źródeł ruchu.
3. Opracowano model wiązki pełnodostępnej z właściwymi mechanizmami progowymi oraz wiązki z ograniczoną dostępnością i właściwymi mechanizmami progowymi dla wielousługowych źródeł ruchu.
4. Opracowano model wiązki pełnodostępnej z mechanizmami progowymi z histerezą oraz wiązki z ograniczoną dostępnością i mechanizmami progowymi z histerezą dla wielousługowych źródeł.
5. Opracowano metodę efektywnej dostępności oraz metodę rekurencyjną dla określania prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu.

6. Opracowano metodę efektywnej dostępności oraz metodę rekurencyjną dla określania prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmem rezerwacji.
7. Opracowano metodę efektywnej dostępności oraz metodę rekurencyjną dla określania prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i właściwymi mechanizmami progowymi.
8. Opracowano metodę efektywnej dostępności oraz metodę rekurencyjną dla określania prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi z histerezą.
9. Opracowano uogólnioną metodę efektywnej dostępności oraz uogólnioną metodę rekurencyjną, umożliwiającą wyznaczenie prawdopodobieństwa blokady punkt-grupa i punkt-punkt w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi. W metodach tych zaproponowano nowy algorytm określania parametru efektywnej dostępności w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi. Metody te w większości przypadków charakteryzują się wyższą dokładnością w porównaniu z innymi metodami zaproponowanymi w rozprawie.

W celu oceny dokładności proponowanych metod wykorzystano odpowiednie, autorskie programy obliczeniowe i symulacyjne. Wyniki uzyskane za pomocą modeli analitycznych porównano z rezultatami eksperymentów symulacyjnych. Przeprowadzone badania potwierdziły wysoką dokładność proponowanych metod wyznaczania prawdopodobieństwa blokady w polach komutacyjnych z wielousługowymi źródłami ruchu i mechanizmami progowymi.



## Dorobek naukowy autora

### rozdziały w książkach zbiorowych

- [1] Głąbowski M., Sobieraj M., Zwierzykowski P., Modeling of resource management mechanism for virtual networks. *Information Systems Architecture and Technology*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 303–316, 2011.
- [2] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Analytical model of limited-availability group with multi-service sources. *Information Systems Architecture and Technology*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 187–197, 2010.
- [3] Głąbowski M., Sobieraj M., Recurrent method for determining blocking probability in multi-service switching networks with BPP traffic and bandwidth reservation. *Information Systems Architecture and Technology*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 205—218, 2009.

### artykuły w czasopismach

- [4] Sobieraj M., Stasiak M., Weissenberg J., Zwierzykowski P., Model of the radio interface with hysteresis mechanism in the cellular networks, *IEICE Transactions on Communications*, vol.E95-B, numer 1, 2012, s. 120-132.
- [5] Hanczewski S., Stasiak M.D., Sobieraj M., Weissenberg J., Queuing models for wireless mesh networks. *Image Processing and Communications* 18(4), 2013.
- [6] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Analytical and simulation modeling of limited-availability systems with multi-service sources and bandwidth reservation, *International Journal On Advances in Telecommunications*, 2013, 6, 1–2, s. 1–11.
- [7] Sobieraj M., Stasiak M., Weissenberg J., Zwierzykowski P., Single hysteresis model for limited-availability group with BPP traffic, *Journal of Telecommunications and Information Technology*, Vol. 13, No. 3, 2013, s. 89-96.

- [8] Sobieraj M., Stasiak M., Zwierzykowski P., Double hysteresis model for multi-service networks with BPP traffic. *Advances in Information Technology and Applied Computing* (ISSN 2251-3418), vol.1, no. 1, 2012, s. 51-56.
- [9] Głąbowski M., Sobieraj M., Multi-service switching networks with resource management mechanisms. *The Mediterranean Journal of Computers and Networks*, 2011, vol. 7, nr 4, s. 292-303.
- [10] Sobieraj M., Stasiak M., Weissenberg J., Zwierzykowski P., Model analityczny dynamicznego interfejsu Abis. *Materiały Krajowej Konferencji Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne*, czerwiec 2010, s. 504-507.
- [11] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Modelling of the influence of connection handoff on UMTS traffic Characteristics. *Poznan University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, 2007, nr 54 s. 57-64.

#### **artykuły w materiałach konferencyjnych**

- [12] Głąbowski M., Sobieraj M., Point-to-group blocking probability in switching networks with multi-service sources and bandwidth reservation, *IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Manchester, UK, lipiec 2014.
- [13] Głąbowski M., Krstic D., Sobieraj M., Simulator of multi-service switching networks with multi-service sources, *Proceedings of The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications*, Paris, Francja, lipiec 2014.
- [14] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M.D., Analytical modelling of multi-service systems with multi-service BPP traffic sources, *2nd European Teletraffic Seminar (ETS 2013)*, Karlskrona, Sweden, 30 września – 2 października 2013.
- [15] Sobieraj M., Stasiak M., Zwierzykowski P., Weissenberg J., Single hysteresis model for multi-service networks with BPP traffic. *Polish Teletraffic Symposium 2012 (PTS 2012)*, Zakopane, 5-7 grudnia 2012.
- [16] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Modeling switching networks with multi-service sources and point-to-group selection, *The 17th Asia-Pacific Conference on Communications*, Jeju Island, Korea, październik 2012.
- [17] Głąbowski M., Sobieraj M., The full-availability group model with multi-service sources and threshold mechanisms. *IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Poznań, 18-20 lipca 2012.

- [18] Sobieraj M., Stasiak M., Zwierzykowski P., Model of the threshold mechanism with double hysteresis for multi-service networks. Science Conference, *Computer Networks 2012*, Szczyrk, czerwiec 2012 (**wyróżnienie “best paper”**).
- [19] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Analytical model of full-availability group with multi-service sources and reservation mechanisms, *Sarajevo Technology Forum*, Sarajevo, maj 2012.
- [20] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Modelling limited-availability systems with multi-service sources and bandwidth reservation, *Proceedings of The Eighth Advanced International Conference on Telecommunications*, Stuttgart, Niemcy, maj 2012, s. 105-110.
- [21] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Weissenberg J., Switching networks with hysteresis mechanism, *Proceedings of The Seventh Advanced International Conference on Telecommunications*, red. M. Głąbowski, D.K. Mynbaev, IARIA, St. Maarten, Antyle Holenderskie, marzec 2011, s. 135–140.
- [22] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Point-to-point blocking probability in switching networks with hysteresis. *The First European Teletraffic Seminar*, 14-16 lutego 2011, Poznań, s. 225 – 231.
- [23] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Analytical modeling of multi-service systems with multi-service sources. *The 16th Asia-Pacific Conference on Communications*, Auckland, Nowa Zelandia, październik 2010, s. 285 – 290.
- [24] Głąbowski M., Sobieraj M., Compression mechanism for multi-service switching networks with BPP traffic. *IEEE, IET International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Newcastle, Wielka Brytania, lipiec 2010, s. 816 – 821.
- [25] Głąbowski M., Sobieraj M., Call admission control mechanisms in multiservice switching networks with BPP traffic. *V International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists InterTech 2010*, Poznań, maj 2010, s. 240 – 244.
- [26] Głąbowski M., Sobieraj M., Effective-availability methods for point-to-point blocking probability in switching networks with BPP traffic and bandwidth reservation. *Sixth International Working Conference on Performance Modeling and Evaluation of Heterogeneous Networks*, Zakopane, styczeń 2010, s. 297 – 310.
- [27] Głąbowski M., Sobieraj M., Point-to-group blocking probability in switching networks with threshold mechanisms. *Fifth Advanced International Conference on Telecommunications*, IEEE Computer Society, Wenecja, Włochy, 2009, s. 95 – 100.

- [28] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., modelling limited-availability groups with BPP traffic and bandwidth reservation. *Fifth Advanced International Conference on Telecommunications*, IEEE Computer Society, Wenecja, Włochy, 2009, s. 89 – 94 (**wyróżnienie “best paper”**).
- [29] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Evaluation of QoS deterioration in threshold systems. *Proceedings of The Fifth Polish-German Teletraffic Symposium*, Berlin, Niemcy, 6-7 października 2008, s. 19-28.
- [30] Kleban J., Sobieraj M., Delayed response of central arbiter in three-stage bufferless Clos-network switches. *Proceedings of The Fifth Polish-German Teletraffic Symposium*, Berlin, Niemcy, 6-7 października 2008, s. 51-60.
- [31] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Blocking probability calculation in UMTS networks with bandwidth reservation, handoff mechanism and finite source population. *Proceedings of the 7th International Symposium on Communications and Information Technologies*, Sydney, Australia, 16-19 października 2007 s. 433—438.
- [32] Kleban J., Sobieraj M., Węclewski S., The modified MSM Clos switching fabric with efficient packet dispatching scheme. *Proceedings of IEEE High Performance Switching and Routing 2007*, Nowy Jork, USA, 30 maja 1 czerwca 2007.
- [33] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Evaluation of traffic characteristics of UMTS with bandwidth reservation and handoff mechanism. *Proceedings of The 14th IEEE International Conference On Telecommunications*, Penang, Malezja, maj 2007 s. 736—740.
- [34] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Analytical modeling of the influence of connection handoff on UMTS traffic characteristics. *Proceedings of The Third Advanced International Conference on Telecommunications*, Morne, Mauritius, maj 2007.
- [35] Głąbowski M., Kubasik K., Sobieraj M., Stasiak M., Modeling of systems with overflow multi-rate traffic and finite number of traffic sources. *Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne (PWT 2007)*, Poznań, 6-7 grudnia 2007.
- [36] Głąbowski M., Sobieraj M., Stasiak M., Analityczne modelowanie wpływu przenoszenia połączeń na charakterystyki ruchowe systemu UMTS. *Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne (PWT 2006)*, Poznań, 7-8 grudnia 2006 s. 199 – 204.