

13.12.2024

# **Akademia Górniczo-Hutnicza**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej



Modele kolejkowe

## **Sprawozdanie: System kolejkowy.**

Temat: Sieć kolejkowa do symulacji obsługi pacjentów w przychodni

Kierunek: Automatyka i Robotyka

Dawid Maziarski

Piotr Mamos

# 1. Cel projektu

Celem projektu jest opracowanie i implementacja sieci kolejkowej służącej do symulowania procesów obsługi pacjentów w przychodni.

Symulacja uwzględnia pełną ścieżkę pacjenta — od momentu rejestracji, przez wizyty u odpowiednich lekarzy, aż po finalizację wizyty w kasie. Każdy system w sieci reprezentuje kolejkę do innego specjalisty, a obsługa w poszczególnych systemach odbywa się na podstawie określonych parametrów, takich jak czas obsługi czy priorytety pacjentów.

Aby przyspieszyć symulację i ułatwić analizę wyników, rzeczywiste czasy obsługi zostały znacznie skrócone (1 sekunda symulacji odpowiada 15 minutom czasu rzeczywistego), jednakże implementacja umożliwia dostosowanie parametrów do bardziej realistycznych danych.

## 2. Wstęp teoretyczny

### 1. Intensywność zgłoszeń

Dla każdego systemu  $j$ , intensywność zgłoszeń ( $\lambda_j$ ) można wyznaczyć na podstawie zgłoszeń wpływających bezpośrednio do systemu oraz przejść z innych systemów:

$$\lambda_j = \lambda_j^{we} + \sum_i \lambda_i * p_{ij}$$

gdzie:

- $\lambda_j^{we}$  – intensywność zgłoszeń napływających bezpośrednio do systemu  $j$  (w naszym wypadku tylko do rejestracji),
- $\lambda_i * p_{ij}$  – intensywność zgłoszeń przekazywanych z systemu  $i$  do  $j$ ,
- $p_{ij}$  – prawdopodobieństwo przejścia zgłoszenia z systemu  $i$  do  $j$ .

### 2. Obciążenie systemu

Obciążenie ( $\rho_j$ ) określa, w jakim stopniu dany system jest zajęty:

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{s_j * \mu_j}$$

gdzie:

- $\lambda_j$  – intensywność zgłoszeń w systemie  $j$ ,
- $s_j$  – liczba stanowisk obsługowych w systemie  $j$ ,

- $\mu_j$  – intensywność obsługi jednego stanowiska (np. liczba zgłoszeń obsługiwanych w jednostce czasu).

Dla  $\rho_j < 1$ , system działa bez przeciążenia, natomiast  $\rho_j \geq 1$  oznacza przeciążenie i tworzenie się kolejek.

### 3. Średnia liczba zgłoszeń w systemie

Zgodnie z prawem Little'a, średnia liczba zgłoszeń w systemie ( $L_j$ ) jest powiązana z intensywnością zgłoszeń oraz średnim czasem przebywania zgłoszenia w systemie ( $T_j$ ):

$$L_j = \lambda_j * T_j$$

### 4. Prawdopodobieństwo stanu zerowego

Prawdopodobieństwo, że system j nie obsługuje żadnego zgłoszenia ( $P(0)$ ), wyznacza się dla kolejki M/M/s w następujący sposób:

$$P(0) = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^n}{n!} + \frac{(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^s}{s!(1-\rho_j)}}$$

gdzie:

- $\frac{\lambda_j}{\mu_j}$  – natężenie ruchu w systemie.

### 5. Prawdopodobieństwo stanu zajętości

Prawdopodobieństwo, że dokładnie n stanowisk obsługowych jest zajętych, można wyrazić wzorem:

$$P(n) = P(0) * \frac{(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^n}{n!}$$

### 6. Średnia liczba zgłoszeń w kolejce

Średnia liczba zgłoszeń oczekujących w kolejce ( $L_{kolejka}$ ) jest funkcją prawdopodobieństwa zajętości wszystkich stanowisk obsługowych ( $P(s)$ ) oraz obciążenia:

$$L_{kolejka} = P(s) \cdot \frac{\rho_j}{1-\rho_j}$$

### 7. Średni czas oczekiwania

Średni czas oczekiwania zgłoszenia w kolejce ( $W_j$ ) można wyznaczyć jako stosunek średniej liczby zgłoszeń w kolejce do intensywności zgłoszeń:

$$W_j = \frac{L_{kolejka}}{\lambda_j}$$

### 3. Założenia symulacji

Program symulacji kolejek pacjentów w klinice wykorzystuje podejście oparte na różnych systemach obsługi, w których pacjenci są przypisani do odpowiednich kategorii i są obsługiwani przez lekarzy. System jest zaprojektowany z wykorzystaniem języka C# i platformy .NET. Zakładamy, że 1 sekunda symulacji odpowiada 15 minutom w prawdziwym życiu.

#### **Symulacja:**

- Program tworzy instancję symulacji z czasem aktualizacji 0,1 sekundy, oraz wyłączeniem generowania nowych zgłoszeń po 26 sekundach (6,5 godziny w prawdziwym życiu). Symulacja trwa aż do czasu kiedy po wyłączeniu generacji wszystkie zgłoszenia opuszczą sieć.

#### **Systemy kolejkowe:**

- Program definiuje 8 systemów (kolejek do poszczególnych dziedzin lekarzy), które reprezentują różne obszary obsługi pacjentów w klinice. Każdy system ma przypisanych lekarzy (kanały obsługi), którzy go obsługują.
- Wszystkie systemy można oznaczyć jako M/M/n/FIFO/ $\infty$ , niektóre z nich są priorytetowe.
- Zdefiniowane systemy z domyślnymi ustawieniami:
  - Rejestracja – FIFO, 1 kanał obsługi (początek)
  - Pediatra – FIFO, 2 kanały obsługi
  - Internista – FIFO priorytetowe, 3 kanały obsługi
  - Kardiolog – FIFO priorytetowe, 1 kanał obsługi
  - Dermatolog – FIFO priorytetowe, 1 kanał obsługi
  - Laryngolog – FIFO priorytetowe, 1 kanał obsługi

- Chirurg – FIFO, 1 kanał obsługi
- Kasa – FIFO, 1 kanał obsługi (koniec)
- Dla systemów priorytetowych pacjenci są obsługiwani w zależności od ich priorytetu. Pacjenci (zgłoszenia) są obsługiwani w sposób FIFO, ale aby mógł zostać wzięty pacjent o niższym priorytecie, w kolejce nie może być już nikogo o wyższym priorytecie. Obsługa nie jest jednak przerywana po przyjsciu pacjenta o wyższym priorytecie.

#### **Lekarze (kanały obsługi):**

- Domyślnie istnieje zestaw 11 lekarzy, z których każdy ma przypisany unikalny czas obsługi pacjenta (domyślnie od 0,1 do 5,0 sekundy) oraz przypisane systemy (kolejki pacjentów).
- Lekarze są przypisani do różnych systemów w zależności od ich specjalizacji (np. pediatra, internista, chirurg, itp.).
- Lekarze obsługują pacjentów w ramach FIFO (First In, First Out), z priorytetami w systemach: internista, kardiolog, dermatolog, laryngolog.

#### **Klasy pacjentów:**

Klasy pacjentów obejmują różne grupy wiekowe. Każda klasa pacjentów ma przypisane:

- **Prawdopodobieństwo przejścia między systemami** – dla każdego systemu z którego pacjent wychodzi określa, do jakiego systemu pacjent może przejść z jakim prawdopodobieństwem, bazując na jego klasie.
- **Prawdopodobieństwo priorytetów** – wskazuje prawdopodobieństwo na każdy priorytet z którym może pojawić się pacjent danej klasy (wysoki, średni, niski).
- **Prawdopodobieństwo wystąpienia** - wskazuje prawdopodobieństwo na to że nowe zgłoszenie w systemie zostanie zgłoszeniem akurat tej klasy

Zdefiniowane klasy to:

- **Dziecko (Child)** – z domyślnym prawdopodobieństwem 25%, Domyślne prawdopodobieństwa priorytetów: niski - 0%, średni - 50%, wysoki - 50%
- **Dorosły (Adult)** – z domyślnym prawdopodobieństwem 40%, Domyślne prawdopodobieństwa priorytetów: niski - 60%, średni - 25%, wysoki - 15%
- **Starszy (Elder)** – z domyślnym prawdopodobieństwem 35%, Domyślne prawdopodobieństwa priorytetów: niski - 40%, średni - 40%, wysoki - 20%

#### **Generator pacjentów:**

- Generator próbuje generować pacjentów w każdej aktualizacji symulacji, z określonym prawdopodobieństwem na utworzenie i dodanie nowego pacjenta do systemu początkowego (rejestracji). Prawdopodobieństwo to jest obliczane na podstawie ustalonego średniego czasu pojawiania się zgłoszeń.
- Każdy pacjent jest generowany na podstawie szansy, która decyduje o tym, do jakiej trafi klasy i jaki będzie jego priorytet.

### Wyświetlanie i zapisywanie informacji:

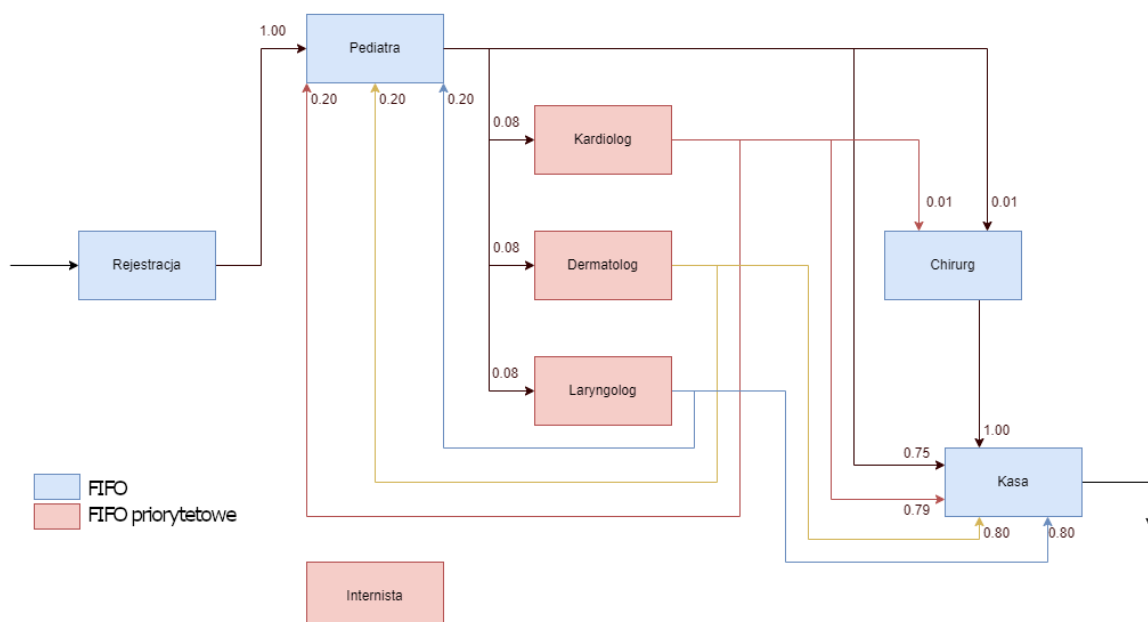
- W trakcie symulacji program wyświetla i na bieżąco, w czasie rzeczywistym, aktualizuje informacje o stanie systemu, takie jak liczba pacjentów o danych klasach (oznaczone kolorami) i priorytetach (oznaczone cyframi) w różnych systemach, czas oczekiwania oraz dostępność lekarzy.
- Na końcu symulacji program zapisuje dane o zajętości kolejek w czasie, oraz dane o każdym pacjencie do pliku .cls, oraz wyświetla liczbę obsłużonych pacjentów dla każdego lekarza.

### Domyślne ustawienia i parametry:

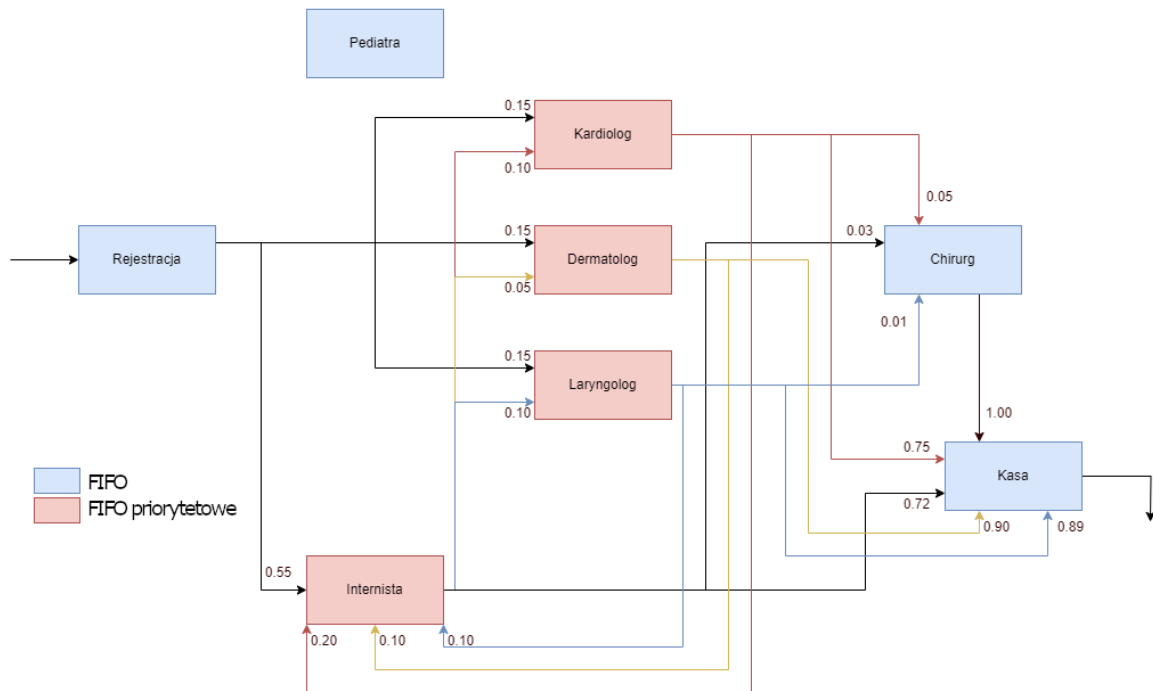
Powyższe są domyślnymi ustawieniami, a parametrami konfigurowalnymi są:

- Prawdopodobieństwa wystąpienia każdej z klas.
- Prawdopodobieństwa przejść do danych systemów w obrębie klasy.
- Prawdopodobieństwo każdego z priorytetów w obrębie klasy.
- Średni czas przybywania zgłoszenia.
- Liczba kanałów obsługi danego systemu.
- Czas obsługi w obrębie każdego systemu.

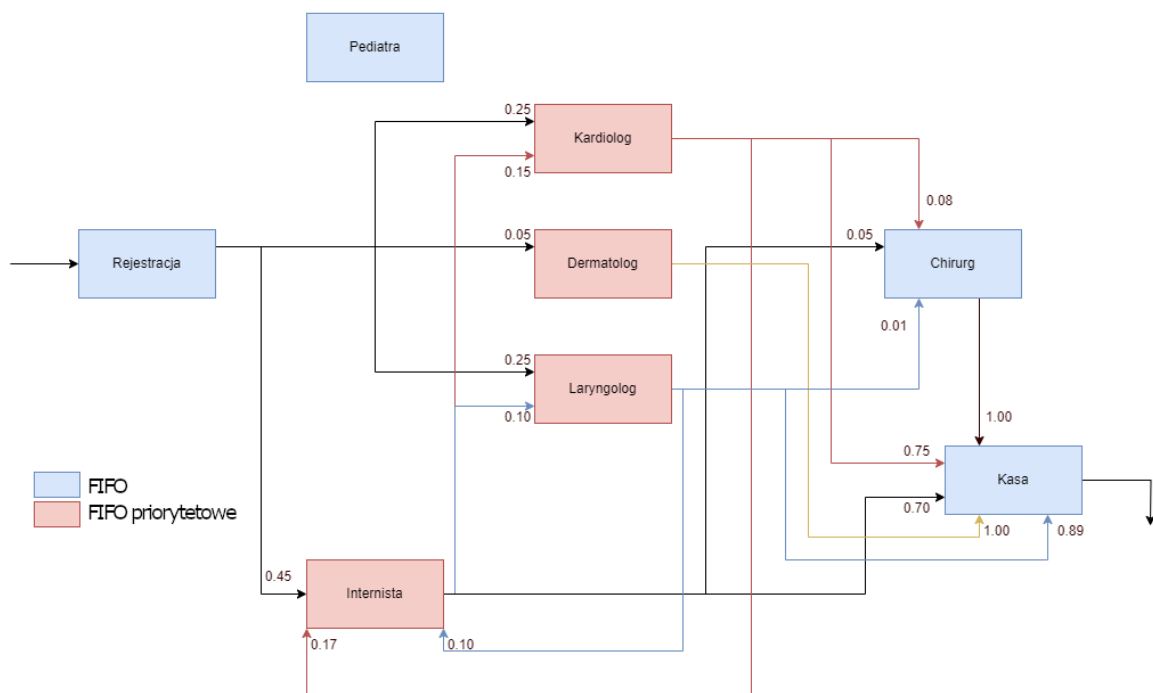
Te parametry można dostosować w celu przeprowadzenia różnych scenariuszy symulacji i analizy wydajności systemu. Parametry klas są odczytywane z pliku Excel (SimulationData/patientClasses.xlsx).



Rys. 1 Schemat domyślnego działania sieci dla dziecka



Rys. 2 Schemat domyślnego działania sieci dla dorosłego



Rys. 3 Schemat domyślnego działania sieci dla osoby starszej

Klasy pacjentów nie są obsługiwane niezależnie i współistnieją ze sobą, zostały one przedstawione na oddzielnych diagramach z powodu czytelności. Strzałki mają różne kolory również z powodu czytelności, pacjenci nigdy nie zmieniają swojej klasy podczas przebywania w sieci.

## 4. Wyniki Symulacji

Podczas symulacji pacjenci oznaczani są różnokolorowymi liczbami, gdzie kolor oznacza klasę (zielony - dziecko, niebieski - dorosły, fioletowy - starszy), a liczba oznacza priorytet (0 - niski, 1 - średni, 2 - wysoki).

```
E:\SzkolaProgramowanie\SK\QueueingSystemsProject\ClinicQueueSimulation\bin\Debug\net8.0\ClinicQueueSimulation.exe
Czas symulacji: 9,10 --- Rzeczywisty czas: 02 h 16 min --- Generacja zgłoszeń: Włączona, średni czas zgłoszeń = 0,20

Kolejka Rejestracja: 2212
Lekarz 0, czas obsługi: 0,1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 0

Kolejka Pediatra: 2
Lekarz 10, czas obsługi: 1,1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 1
Lekarz 11, czas obsługi: 1,1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 2

Kolejka Internista:
Lekarz 20, czas obsługi: 1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 1
Lekarz 21, czas obsługi: 1s, stan: Czekaj...
Lekarz 22, czas obsługi: 1s, stan: Czekaj...

Kolejka Kardiolog: 001
Lekarz 30, czas obsługi: 1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 1

Kolejka Dermatolog: 00
Lekarz 40, czas obsługi: 1,2s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 1

Kolejka Laryngolog: 0010
Lekarz 50, czas obsługi: 1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 1

Kolejka Chirurg:
Lekarz 60, czas obsługi: 5s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 0

Kolejka Kasa:
Lekarz 70, czas obsługi: 0,1s, stan: Leczy pacjenta o priorytecie 2
```

Rys. 4 Zrzut ekranu z losowego momentu przykładowego przebiegu symulacji dla domyślnych parametrów.

```
Statystyki lekarzy:

Lekarz 0 - Rejestracja, obsłużono 132 pacjentów:
31 dzieci, 50 dorosłych i 51 starszych.

Lekarz 10 - Pediatra, obsłużono 15 pacjentów:
15 dzieci, 0 dorosłych i 0 starszych.

Lekarz 11 - Pediatra, obsłużono 17 pacjentów:
17 dzieci, 0 dorosłych i 0 starszych.

Lekarz 20 - Internista, obsłużono 22 pacjentów:
0 dzieci, 15 dorosłych i 7 starszych.

Lekarz 21 - Internista, obsłużono 18 pacjentów:
0 dzieci, 11 dorosłych i 7 starszych.

Lekarz 22 - Internista, obsłużono 24 pacjentów:
0 dzieci, 12 dorosłych i 12 starszych.

Lekarz 30 - Kardiolog, obsłużono 35 pacjentów:
4 dzieci, 8 dorosłych i 23 starszych.

Lekarz 40 - Dermatolog, obsłużono 11 pacjentów:
2 dzieci, 8 dorosłych i 1 starszy.

Lekarz 50 - Laryngolog, obsłużono 26 pacjentów:
3 dzieci, 10 dorosłych i 13 starszych.

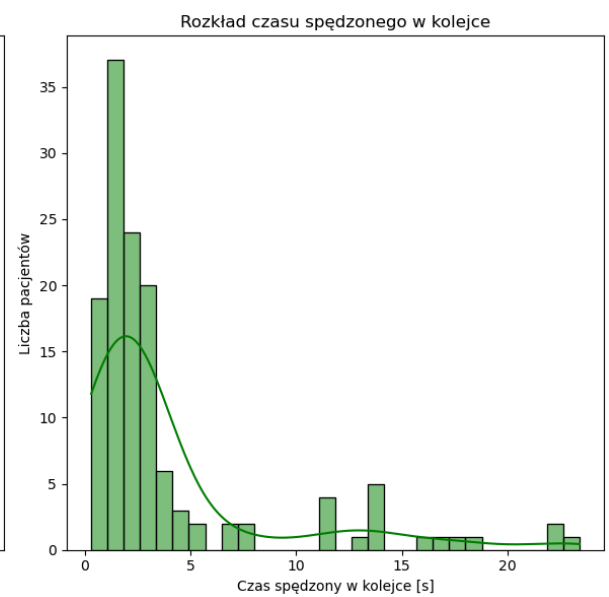
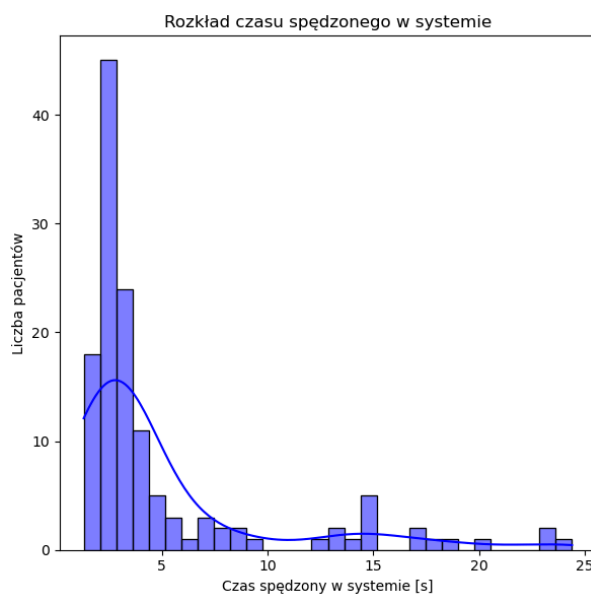
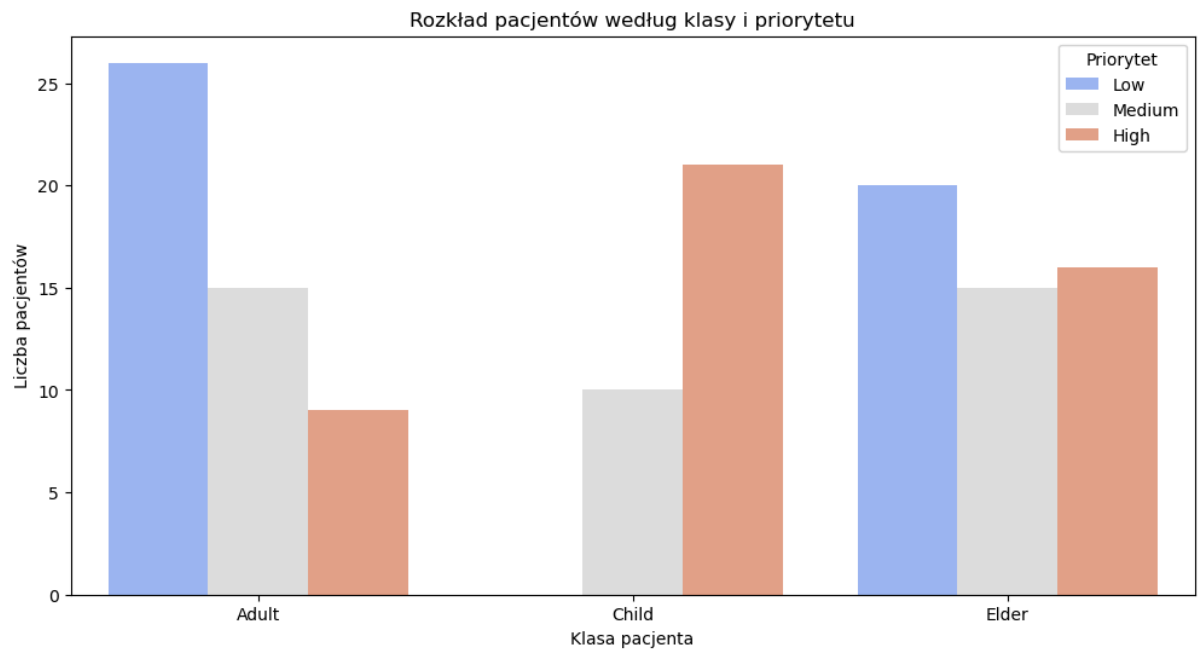
Lekarz 60 - Chirurg, obsłużono 4 pacjentów:
1 dzieci, 2 dorosłych i 1 starszy.

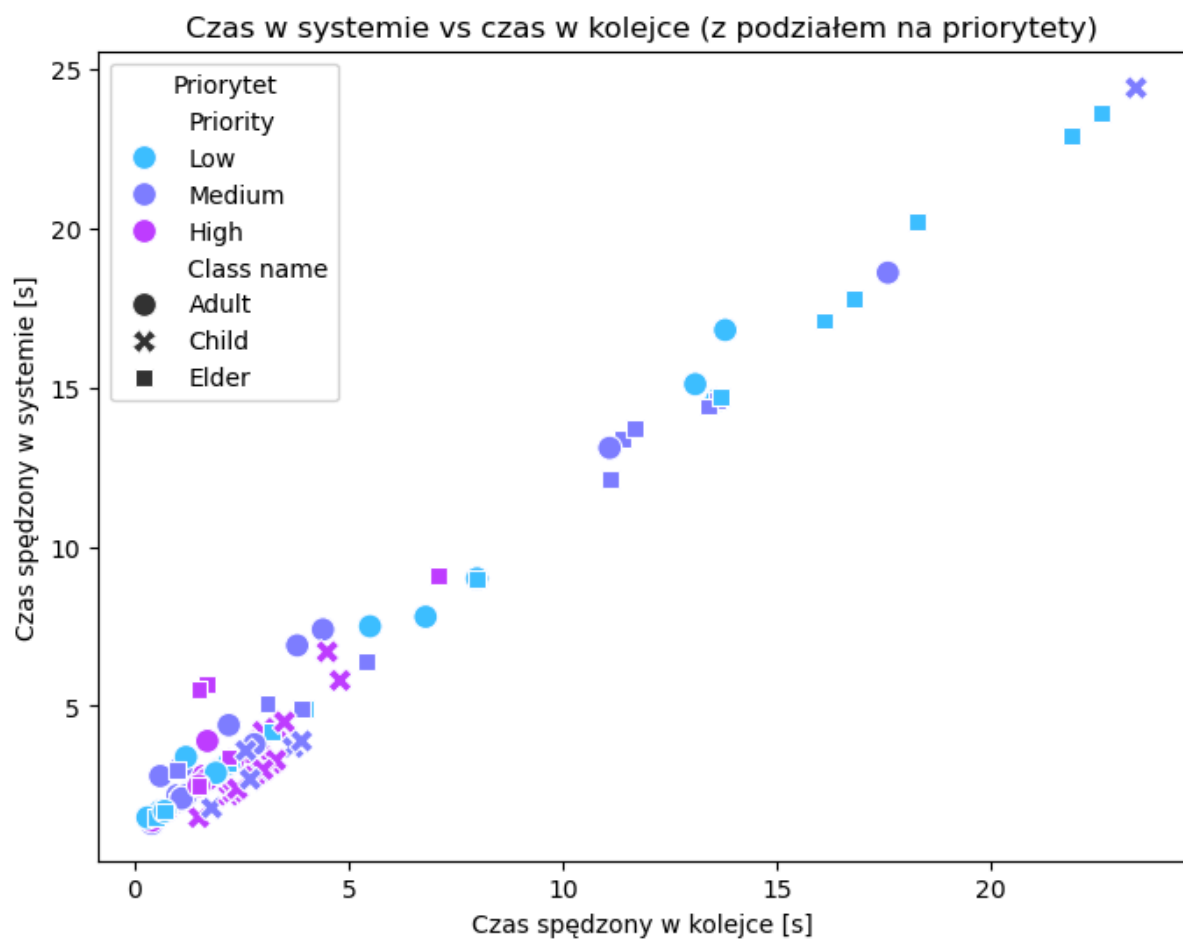
Lekarz 70 - Kasa, obsłużono 132 pacjentów:
31 dzieci, 50 dorosłych i 51 starszych.
```

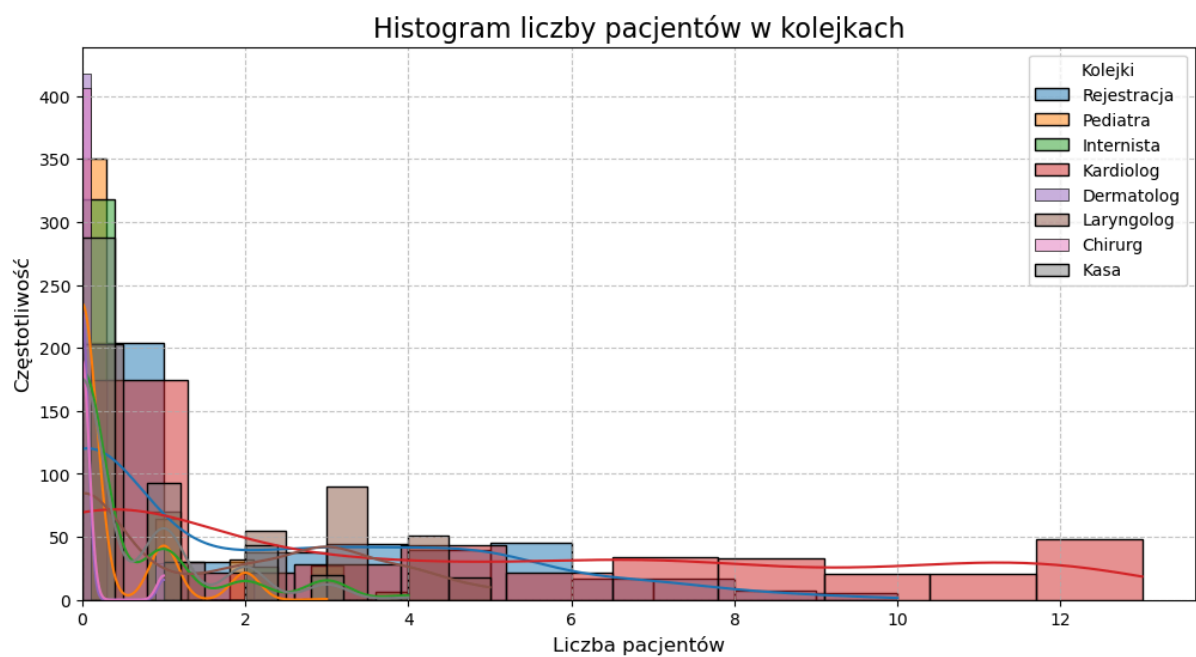
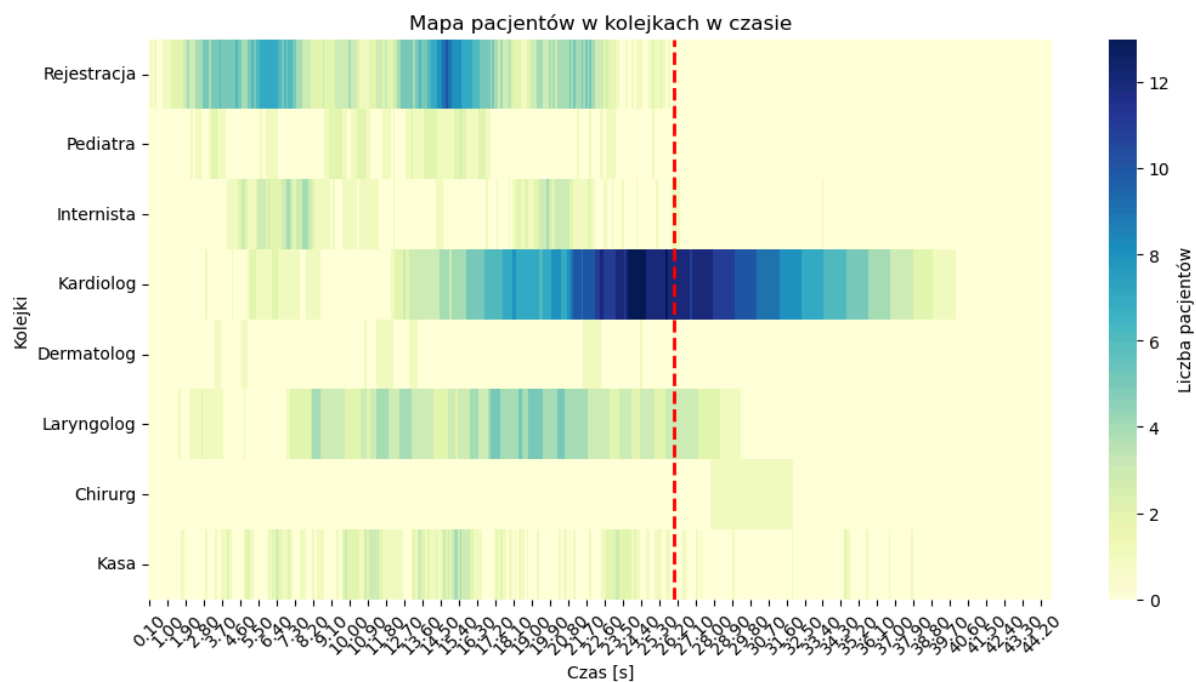
Rys. 5 Statystyki lekarzy wyświetlane na konsoli po zakończeniu symulacji

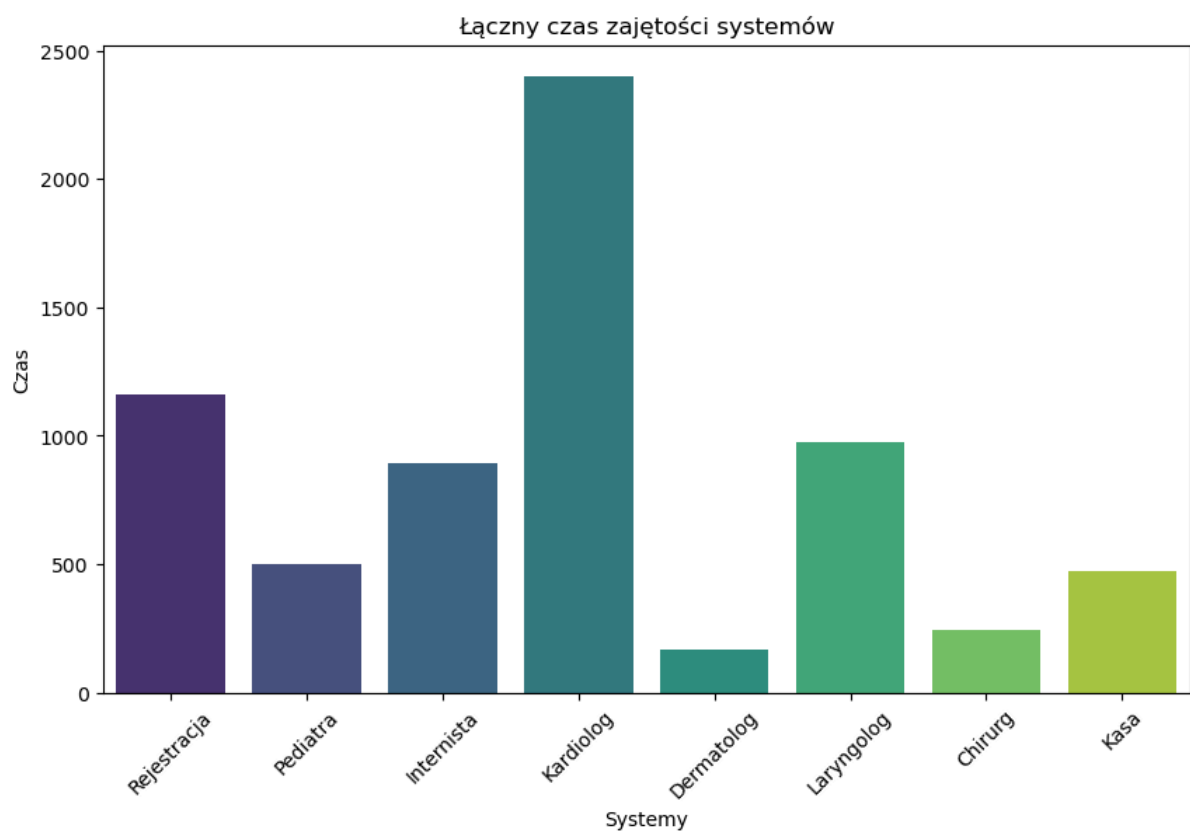
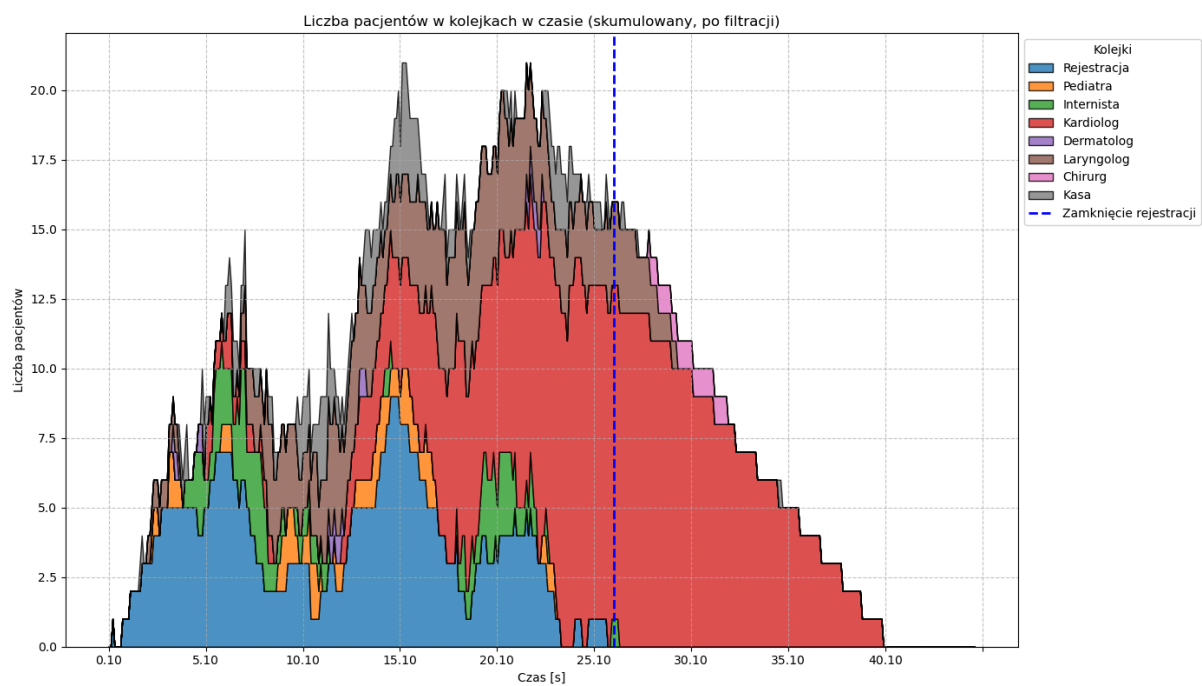


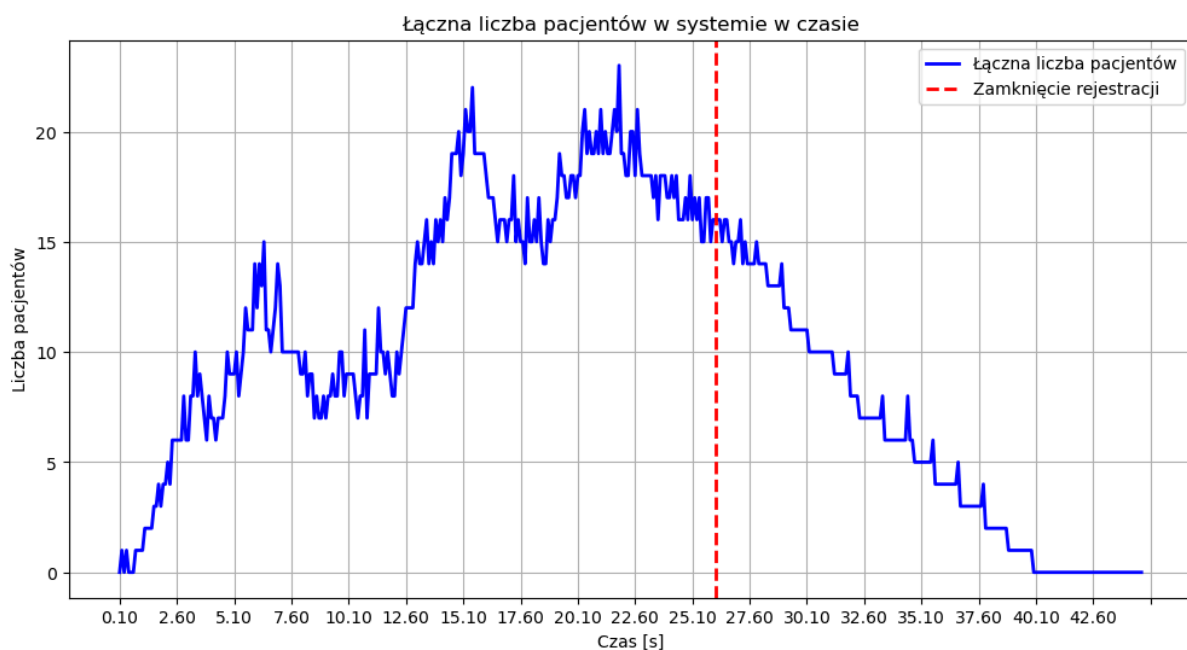
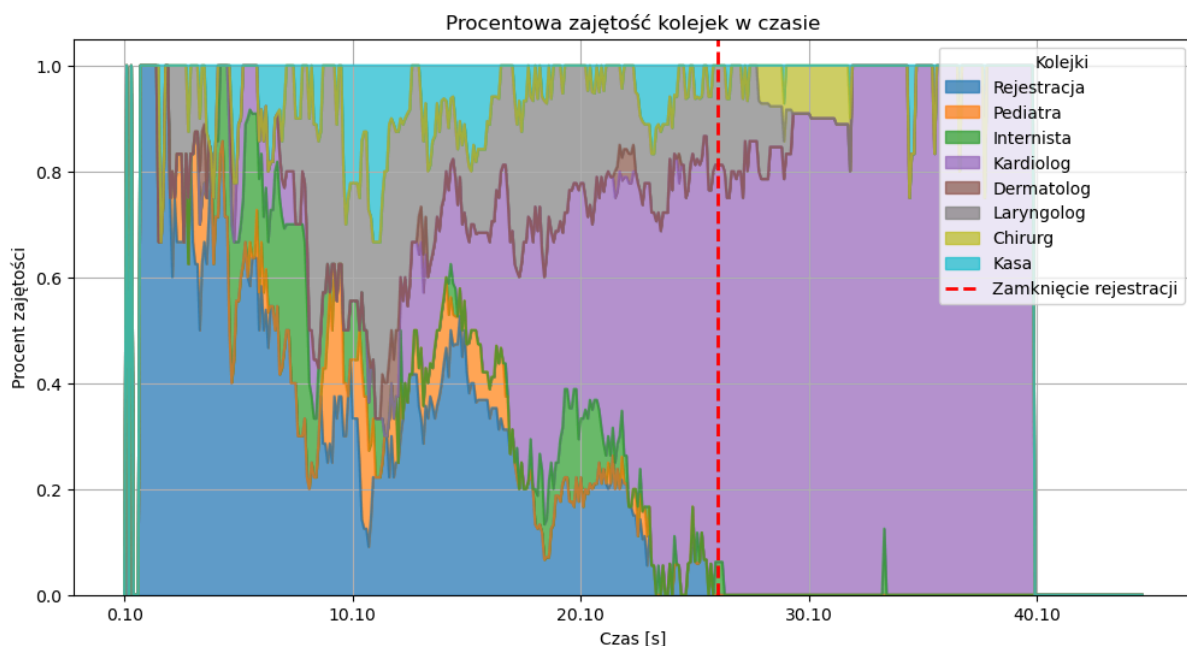
Dla domyślnych wartości parametrów otrzymaliśmy poniższe statystyki:











Nazwa systemu	Rejestracja	Pediatria	Internista	Kardiolog	Dermatolog	Laryngolog	Chirurg	Kasa
Średnia liczba zgłoszeń w kolejce	2.23640	0.30969	0.53664	4.81323	0.06855	1.66430	0.09692	0.59338
Średnia liczba zgłoszeń w systemie	2.74231	1.18912	2.10638	5.67612	0.39243	2.30732	0.57446	1.11347

Średnia liczba zgłoszeń w każdej kolejce i systemie (od początku symulacji do opróżnienia sieci po wyłączeniu generacji zgłoszeń).

## 5. Podsumowanie

- Przedstawione powyżej badania zostały przeprowadzone na domyślnych parametrach systemu, które dobraliśmy, uznając je za zbliżone do rzeczywistego procesu obsługi pacjentów w przychodni. Symulacja jest jednak bardzo uproszczona, można ją rozwijać poprzez dodawanie większej liczby klas i systemów.
- Parametry systemu można dowolnie modyfikować bez ponownej kompilacji programu, co daje użytkownikowi możliwość przeprogramowania symulacji w prosty sposób. Nie można jedynie dodawać nowych klas, priorytetów i systemów.
- Przez zastosowanie zdarzeń i zrównoleglenie działania wszystkich obiektów symulacji, jest ona w niektórych aspektach nieprzewidywalna, co naszym zdaniem dobrze odzwierciedla funkcjonowanie typowej przychodni.
- Czas obsługi pacjentów dla danego systemu jest zawsze taki sam i nie ma on żadnej wariancji. Generowanie zgłoszeń jest dużo bardziej chaotyczne, ponieważ w każdej aktualizacji programu istnieje prawdopodobieństwo na pojawienie się nowego zgłoszenia w sieci. Prawdopodobieństwo to jest dobierane na podstawie podanego przez użytkownika średniego czasu między zgłoszeniami, domyślnie 0,2s (z czego wynika, że co 0,1 sekundy jest 50% szans na pojawienie się zgłoszenia).
- W statystykach lekarzy można zauważyć, że w niektórych przypadkach zostało przetworzonych więcej zgłoszeń niż weszło do sieci (dobrze to widać w przypadku pediatri i klasy dzieci). Jest to spowodowane faktem, że te same zgłoszenia mogą wielokrotnie przechodzić przez te same systemy (zgodnie z macierzą prawdopodobieństw).
- Zajętość systemów jest prawdopodobnie źle odczytywana, ponieważ przez sposób implementacji, przejście z kolejki do kanału obsługi zajmuje pewien czas (czas do następnej aktualizacji programu) i jeżeli pomiar został zrobiony w tym czasie, to zgłoszenie nie zostanie zarejestrowane. Z tego powodu łączny czas zajętości systemu rejestracji i kasy są od siebie różne (choć w teorii powinny być takie same).
- W symulacji występuje niewyjaśniony błąd, który sprawia, że niewielki odsetek zgłoszeń znika, kiedy powinny przejść do ostatniego systemu (Kasy). Zgłoszenia te są usuwane z danych symulacji, aby nie zakłócać wyników.