

# Symulacja pasożyt-żywicieli

Rafał Lisak<sup>1</sup> i Jakub Płotnikowski<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Informatyki, Kraków, Polska

\* Korespondencja: ralisak@student.agh.edu.pl, plotniko@student.agh.edu.pl

Version June 20, 2021 submitted to Appl. Sci.

**Abstract:** Poniższa praca opisuje przebieg badania zachowania modelu pasożyt żywicieli. W tym celu utworzona została symulacja wraz z odpowiednimi narzędziami nadzorującymi oraz wykonany szereg eksperymentów. Poszczególne podejścia różniły się od siebie parametrami takimi jak wielkość startowej populacji.

## 1. Wstęp

Celem naszej pracy jest stworzenie symulacji zachowania się pasożytów oraz ich nosicieli. Pasożyty to organizmy, które żyją w obrębie innych, które nazywamy żywicielami. Żywiciele są dla nich źródłem pożywienia oraz niejednokrotnie jedynym sposobem na przeżycie. Taką relację między dwoma organizmami nazywa się pasożytnictwem - jeden organizm czerpie korzyści ze współżycia, natomiast drugi ponosi straty. Wyróżniamy dwa główne rodzaje pasożytnictwa:

- Wewnętrzne - organizm będący pasożytem znajduje się całkowicie wewnątrz ciała żywiciela. Z tego względu szczególnie ważne dla szkodnika jest, aby utrzymać swojego gospodarza przy życiu - w razie śmierci nosiciela śmierć ponosi także pasożyt - jednak nie każdy pasożyt jest wystarczająco dobrze przystosowany do tego typu współżycia. Wszystko zależy m.in. od rodzaju aktywności żywiciela oraz szkodnika, a także od ilości osobników żerujących na gospodarzu. Relację w której gospodarz jest bezwarunkowo niezbędny do przetrwania pasożyta nazywamy pasożytnictwem obligatoryjnym.
- Zewnętrzne - organizm pasożytniczy znajduje się na zewnątrz ciała nosiciela lub w takiej jego części, która pozwala na kontakt ze środowiskiem zewnętrznym - np. początek układu pokarmowego gospodarza. Tutaj z kolei nie jest niezbędne, aby gospodarz przeżył. Relację, w której nosiciel nie jest niezbędny do przeżycia pasożyta, a ten może zmieniać żywicieli i w międzyczasie dalej się rozwijać nazywamy pasożytnictwem fakultatywnym.

Organizmy pasożytnicze bardzo często powodują różne choroby i niedogodności, które stanowią przeszkodę dla normalnego funkcjonowania organizmu żywiciela.

Z naukowego punktu widzenia ważne jest symulowanie ekosystemów, w którym czynny udział biorą pasożyty. [1] Warto zwrócić uwagę na to, że ekosystem wolny od pasożytów niekoniecznie jest tym prawidłowym - niektóre procesy biologiczne mogą zostać zachwiane, albowiem ilość pasożytów ma wpływ na populację dużej części gatunków, na łańcuch pokarmowy oraz na bioróżnorodność danego systemu. Często za zdrowe biologicznie ekosystemy uznaje się te, w których skład wchodzi mnogość organizmów pasożytniczych.

Symulacje oddziaływania organizmów pasożytniczych na swoich żywicieli stanowią ważną informację dla osób zajmujących się parazytologią - [2]. Studiują oni zachowanie wszystkich organizmów, które zachowują się w sposób pasożytniczy. Jest to również ściśle związane z mikrobiologią, gdyż często takimi organizmami są wirusy, bakterie, grzyby czy pierwotniaki. Symulacje są w tej dziedzinie nauki szczególnie cenne.

Dzięki odpowiednio skonfigurowanym symulacjom można dowiedzieć się wielu rzeczy na temat zachowań poszczególnych gatunków i organizmów w zależności od środowiska, w którym zostały umieszczone albo w którym zmuszone im było zamieszkać. Pozwalają one na dość dokładne i wiarygodne przewidzenie pewnych zachowań i dzięki temu jest możliwe odpowiednie przygotowanie się na nadchodzące zagrożenia lub nietypowe sytuacje. Sposób ich wykorzystania często jest dużo szerszy niż to, na co pozwala rzeczywistość, co pozwala też zredukować koszt i czas oczekiwania na rezultaty pożądanых kalkulacji. To co będzie działo się w przyrodzie przez dziesiątki lat dzięki nauce i technice może być skompresowane do znacznie krótszych okresów, których konsekwencje mogą zostać przeanalizowane znacznie szybciej i dużo bardziej efektywnie.

Chcemy spróbować pokazać jak mogą się one zachowywać w różnych warunkach i konfiguracjach. Planujemy zbadać m.in. zależności pomiędzy liczbą osobników pasożytniczych a liczbą żywicieli, sterować zachowaniem szkodników i manewrować prawdopodobieństwem zostania nosicielem szkodliwego organizmu.

W początkowej fazie tworzenia projektu możliwa jest zmiana początkowych parametrów symulacji takich jak początkowa liczba organizmów pasożytniczych i tych będących żywicielami. Obecnie w przypadku złapania pasożyta żywiciel rozpoczyna proces powolnego umierania, a gdy ono nastąpi, pasożyt umiera wraz z nim - narazie więc jest to pasożytnictwo obligatoryjne. Podczas badania takich zależności często uwzględniane jest wiele czynników takich jak dieta, rozmieszczenie siedlisk, liczebność, czas trwania rozrodu, a nawet wielkość żywiciela. [3] Czynniki te mają bezpośredni wpływ na długość życia zainfekowanego żywiciela. Dodatkowo warto uwzględnić naturalną odporność gatunku na atakujące je pasożyty. Może się wydawać, że jest to czynnik bardzo ogólny. Jest on jednak bardzo często zauważalny w zamkniętych ekosystemach gdzie organizmy na bazie ewolucji zaczynają wytwarzać mechanizmy obronne by zwalczać pasożyty.[4]

## 2. Wykorzystywane języki programowania i biblioteki

Językiem programowania wykorzystywanym do zaprogramowania symulacji jest Python w wersji 3.

Głównym frameworkiem, którego zdecydowaliśmy się wykorzystać do efektywnego zwizualizowania aktualnego stanu przeprowadzanej symulacji jest Pygame[5]. Dostarcza on biblioteki graficzne i dźwiękowe oraz odpowiedni szkielet ułatwiający tworzenie gier. Stanowi on zaawansowane narzędzie do game developmentu, które jednocześnie pozwala uniknąć niskopoziomowości języków zwykle wykorzystywanych do tego typu projektów.

Do symulacji fizyki wykorzystaliśmy silnik fizyczny 2D Pymunk[6]. Pozwala on na nadawanie obiektom fizycznych właściwości oraz symuluje interakcje między nimi. Całe poruszanie stworzone zostało w oparciu o przyspieszenie obiektów. Pozwala to na naturalne zachowania obiektów w momencie kolizji oraz uprasza sposób zmiany prędkości obiektów.

## 3. Prezentacja graficzna symulacji

Aplikacja uruchamiająca symulację posiada przystępny interfejs graficzny pozwalający na wybór poszczególnych parametrów początkowych symulacji. Możemy w prosty sposób zmieniać liczbę żywicieli oraz początkową liczbę pożywienia, którą żywiele mają dostępną.

## 4. Opis algorytmów

### 4.1. Odnajdywanie pożywienia

W pierwszej wersji symulacji każdy z żywicieli posiadał wiedzę na temat położenia pożywienia na mapie. Instynktownie kierował się w kierunku najbliższego z nich bez zwracania uwagi na innych konkurentów. Podejście to powodowało jednak, że żywiele po pewnym czasie zbijały się w jedną grupę. Doprowadzało to do bardzo szybkiego wymarcia całej grupy z powodu bardzo dużej rywalizacji o niewielkie ilości zasobów. Każdy z żywicieli musiał złożyć energię aby dotrzeć do zasobu,

82 jednak tylko jeden z nich otrzymywał pożywienie.  
 83 Aby ograniczyć konkurencję o te same zasoby, żywicieli zostały wyposażone w pole widzenia.  
 84 Zmieniło to drastycznie zachowanie obiektów badawczych. Ograniczenie wiedzy danego osobnika do  
 85 niewielkiego obszaru wokół niego spowodowało, że dużo częściej przemierzał on mapę w losowych  
 86 kierunkach w poszukiwaniu pożywienia. Zmniejszyło to ilość sytuacji gdzie klika żywicieli próbowało  
 87 dotrzeć do tego samego pożywienia przez co wydłużony został czas życia populacji.

---

**Algorithm 1:** Algorytm wyszukiwania najbliższego pożywienia

---

```

[1]  moveDirection;
[2]  minDistance ← infinity;
[3]  for each food in foods do
[4]      positionfood ← get position from food;
[5]      distnacefood ← calculate distance from positionfood to positionhost ;
[6]      if distnacefood is less than visualRangehost and less than minDistance then
[7]          directionfood ← calculate direction to food;
88 [8]          minDistance ← distnacefood;
[9]          moveDirection ← directionfood;
[10]     end
[11] end
[12] if minDistance != infinity then
[13]     host go in the moveDirection;
[14] else
[15]     host continue move;
[16] end

```

---

#### 89 4.2. Rozmnażanie

90 Aby zaimplementować najprostrzy sposób rozmnażania wzorowaliśmy się na rozmnażaniu  
 91 przez podział komórki. Osobni nie potrzebuje więc do rozmnażania innego osobnika ale jest w stanie  
 92 rozmnożyć się sam przez podzielenie po osiągnięciu pewnego konforowego dla niego poziomu energii.  
 93 Aby zachować balans energii w naszym systemie przy podziale nowe osobniki posiadają połowę  
 94 energii osobnika przed podzieleniem. Wybór tak prostego sposobu rozmnażania nie był przypadkowy.  
 95 Próba implmentacji rozmnażania płciowego okazała się bardzo trudna do kalibracji. Trudne warunki  
 96 przetrwania związane z dużą szansą zarażenia się pasożytem oraz niewielką szansą spotkania dwóch  
 97 osobników chętnych do rozmnażania powodowały bardzo szybkie wymierania populacji. Przy  
 98 późniejszej zmianie modelu rozmnażania na rozmnażanie płciowe, możemy zaobserwować, że  
 99 żywicieli lepiej zaczęły sobie radzić w większej grupie i przy niewielkiej ilości pasożytów są w stanie  
 100 ustabilizować obydwie populacje. Widoczne są również wady tego typu podejścia. W przypadku gdy  
 101 na żywicieli zostaną zdziesiątkowani do pewnej niewielkiej liczby osobników, nie mają oni szans na  
 102 odbudowanie populacji. Po porównaniu obydwu sposobów postanowiliśmy zostać przy rozmnażaniu  
 103 płciowym ze względu na możliwość stabilizacji symulacji. Wyszukiwanie partnera odbywa się na  
 104 takiej samej zasadzie jak odnajdywanie pożywienia z tym zastrzeżeniem, że rozmnażanie ma większy  
 105 priorytet.

#### 106 4.3. Przenoszenie pasożyta

107 W początkowej wersji symulacji utworzone zostały jednoski zarażone pasożytami już przy samym  
 108 starcie populacji. Zarażony osobnik posiada pewną szasę na przekazanie pasożyta potomkowi. Inną  
 109 możliwością złapania posożyta jest pobranie go z pożywienia[7]. Zainfekowane jedzenie pojawia się  
 110 co pewien czas na mapie i wyróżnia się kolorem. Warto podkreślić, że jeden żywiciel może posiadać

więcej niż jednego pasożyta. Każdy kolejny pasożyt powoduje zwiększenie zapotrzebowania swojego żywiciela na energię.

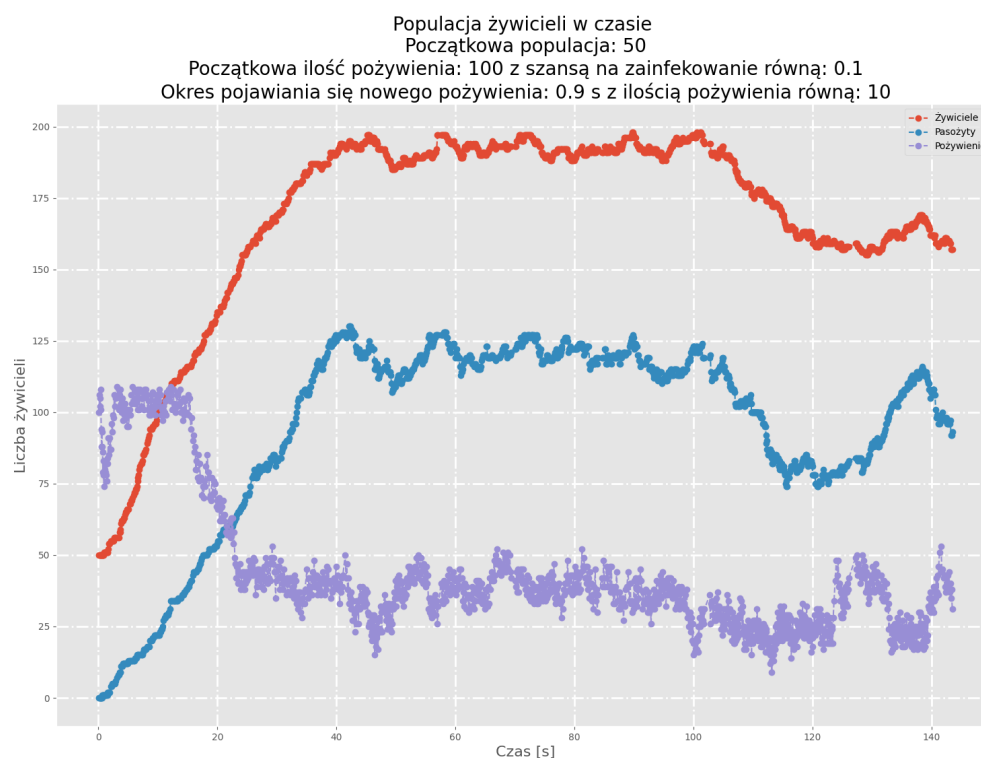
#### 4.4. Generowanie pożywienia

Pożywienie generowane jest w sposób losowy przy inicjalizacji mapy. Jej ilość zależy od konfiguracji początkowej. Dodany został także konfigurowalny generator jedzenia, który umożliwia dodawanie do planszy jedzenia w trakcie działania symulacji. Jedzenie dodawane jest co określony interwał czasowy a jego współrzędne są generowane losowo w obrębie mapy. Dodatkowo w zależności od ustalonego prawdopodobieństwa pożywienie może zostać wygenerowane z pasożytem. Po skonsumowaniu takiego pożywienia, pasożyt automatycznie przechodzi na żywiciela. Możliwa jest również regulacja ilości generowanego jedzenia co dany interwał czasowy. Niestety ze względów wydajnościowych musieliśmy dodać ograniczenia ilości pożywienia, które może być jednocześnie na mapie.

### 5. Wyniki symulacji oraz dyskusja rezultatów

Zdecydowaliśmy zbadać kilka zależności w symulacji możliwych do sparametryzowania i zwizualizowania.

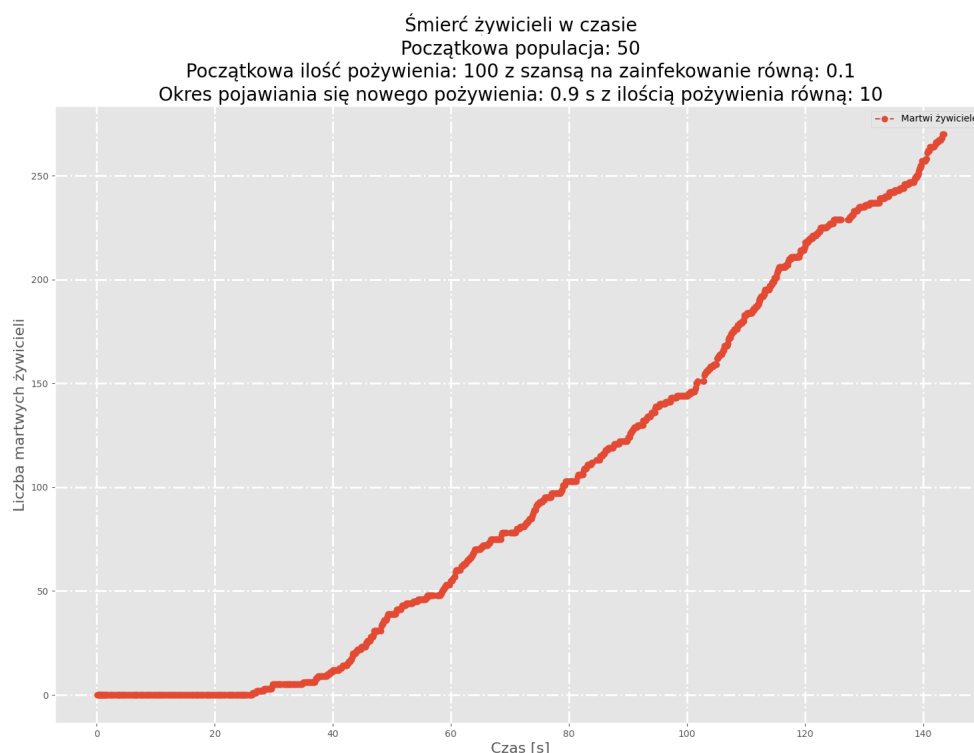
Na początku chcieliśmy zbadać jak szansa na złapanie pasożyta wpływa na populacje obu gatunków.



**Figure 1.** Populacja żywicieli w czasie - szansa na zainfekowanie 10% pozwala na stabilizację symulacji

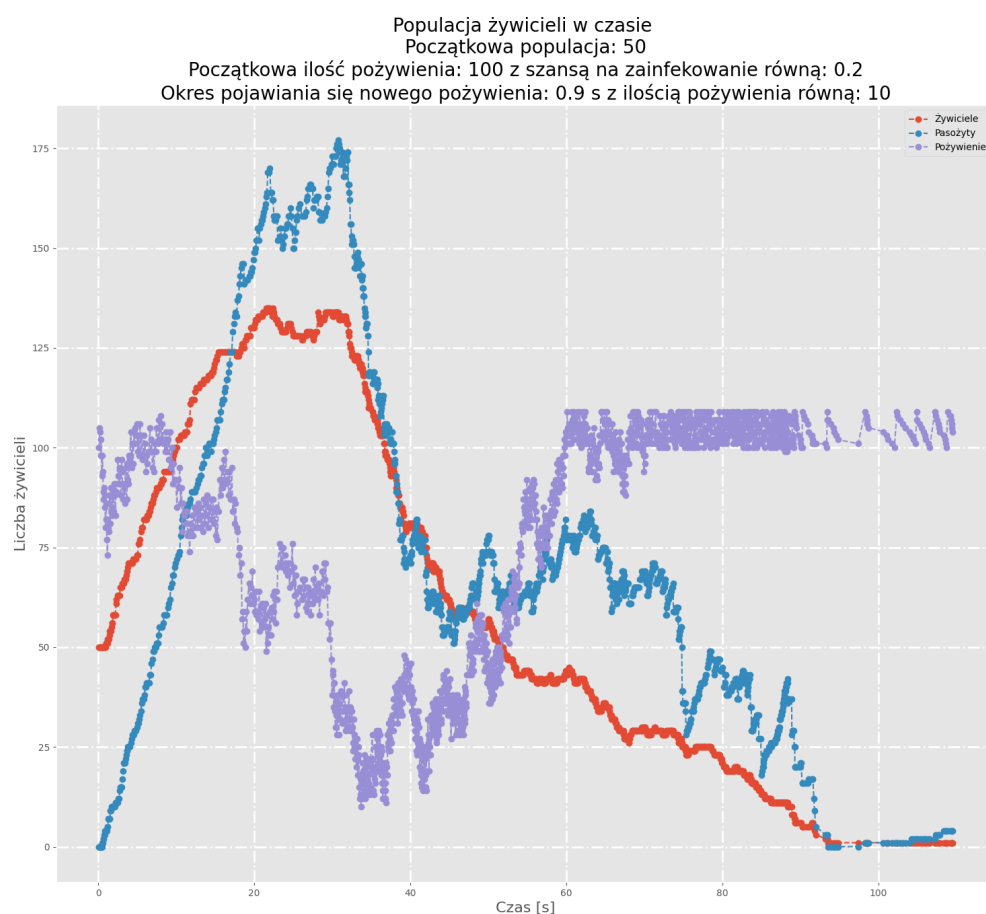
Jedną z najważniejszych cech symulacji jakie przedstawia powyższa konfiguracja jest możliwość stabilizacji. Jak widać na powyższym wykresie przy dobraniu odpowiednich parametrów symulacja jest w stanie trwać w nieskończoność. Pomimo tego, że pasożyt w dużym stopniu przyczynia się do śmierci swojego żywiciela, to zabicie go nie jest celem. Paradoksalnie śmierć żywiciela oznacza również śmierć pasożyta. Brak możliwości koegzystencji oby gatunków oznaczał by, że model jest źle zdefiniowany i w żaden sposób nie odzwierciedla rzeczywistości. Podczas

stabilizacji symulacji możemy łatwo zaobserwować bezpośrednią zależność między ilością pasożytów, hostów oraz dostępnego pożywienia. Początkowy wzrost obu populacji związany jest z dużą dostępnością pożywienia. Jednak gdy populacja osiąga około 190 osobników wzrost zużycie pożywienia zatrzymuje się podobnie jak wzrost ilości osobników obu gatunków. Jest to spowodowane fizycznymi właściwościami żywicieli takimi jak prędkość poruszania czy zasięg widzenia. Te cechy bezpośrednio przekładają się na prędkość znajdowania pożywienia jak i na prędkość rozmnażania osobnika. Ważnym czynnikiem jest również sposób rozmnażania, który wymaga poświęcenia czasu na znalezienia partnera.



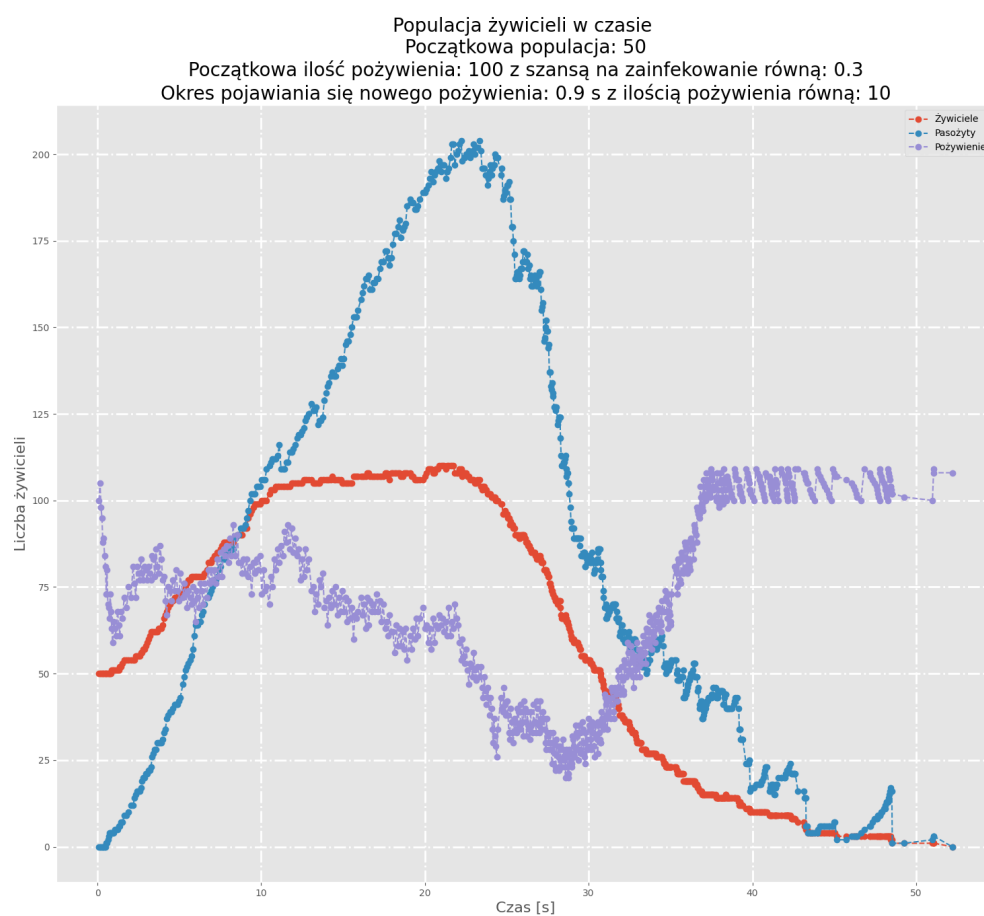
**Figure 2.** Śmierć żywicieli w czasie - liniowa funkcja liczby martwych żywicieli w zależności od czasu

Kolejną metryką potwierdzającą stabilizację symulacji jest wykres liczby martwych żywicieli w zależności od czasu. Pomijając początkowe wypłaszczenie, które jest spowodowane tym, że każdy żywiciel zaczyna ze stałą wartością energii, to funkcja na wykresie jest praktycznie liniowa co oznacza stały przyrost oraz śmierć osobników.



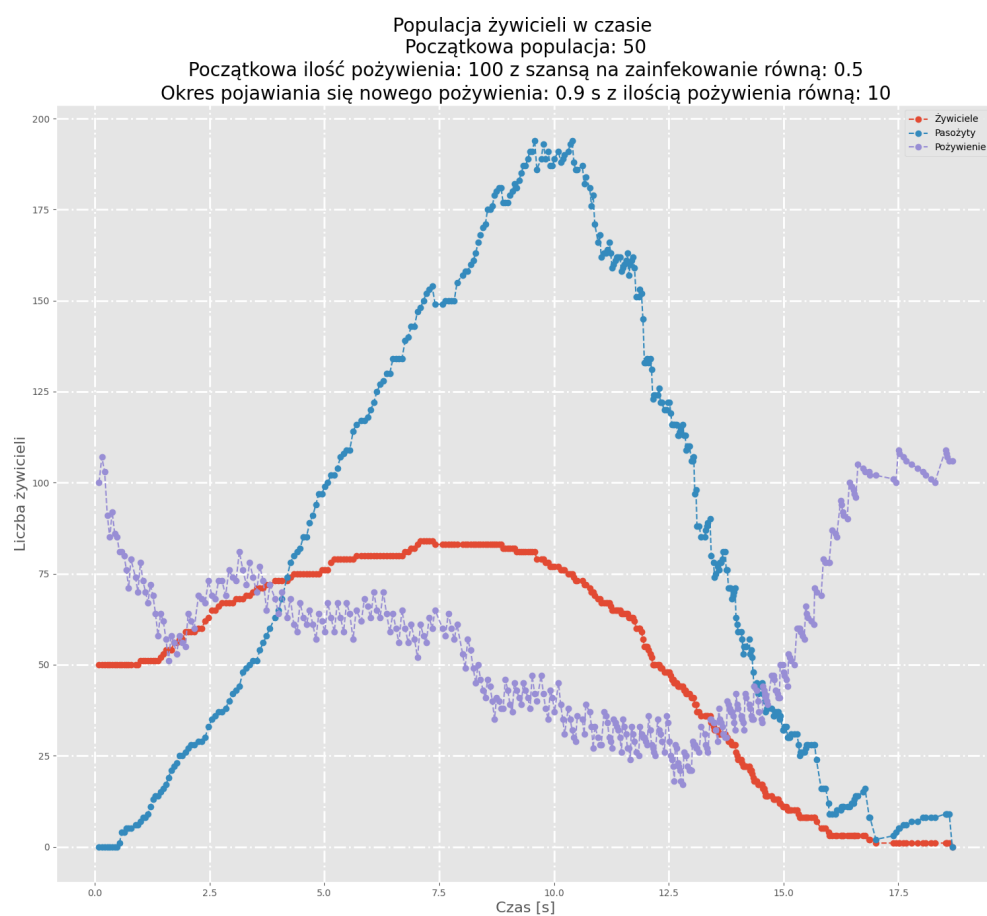
**Figure 3.** Populacja żywicieli w czasie - szansa na zainfekowanie 20%

Dwukrotne zwiększenie szansy na złapanie pasożyta praktycznie dwukrotnie zwiększyło  
 prędkość przyrostu liczby pasożytów. Gwałtowny wzrost pasożytów spowodował obniżenie liczby  
 osobników przy której populacja żywicieli zaczyna się stabilizować. Niestety ciągły wzrost populacji  
 pasożytów doprowadził do gwałtownego spadku populacji obu gatunków. Warto zwrócić uwagę  
 na złagodzenie tego spadku spowodowane zwiększeniem ilości dostępnego pożywienia. Populacja  
 pasożytów rośnie jednak szybciej niż populacja żywicieli co ostatecznie doprowadza do anihilacji obu  
 gatunków. Możemy jednak zauważyć, że do spokojnego koegzystowania oby gatunków wymagane  
 jest aby wzrost populacji pasożytów nie był większy niż wzrost populacji hostów.



**Figure 4.** Populacja żywicieli w czasie - szansa na zainfekowanie 30%

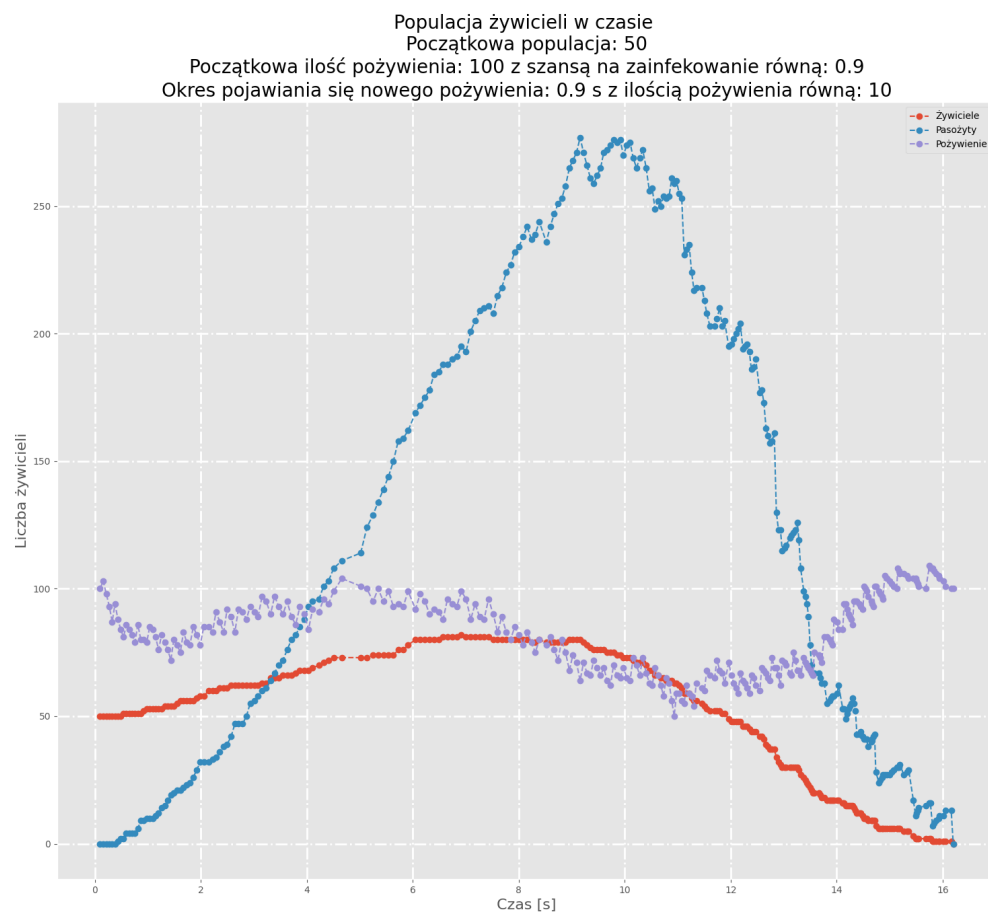
154 Przy kolejnym zwiększeniu szansy na zainfekowanie czas ponownie został skrócony o połowę.  
 155 Możemy również zauważyć, że zmniejszyły się duże wachania symulacji. Ciągłe zauważalne są  
 156 pojedyncze jednostki, które w końcowej fazie symulacji dobrze radzą sobie z przetrwaniem, dzięki  
 157 dużej ilości dostępnego pożywienia. Nie są one jednak w stanie odbudować populacji gdyż jest ich zbyt  
 158 mało, przez co szansa że się spotkają jest bardzo mała.



**Figure 5.** Populacja żywicieli w czasie - szansa na zainfekowanie 50%

159 Na powyższym wykresie czas został skrócony drastycznie w porównaniu z poprzednimi  
 160 badaniami. Zwiększenie ilości jedzenia w późniejszej części symulacji nie powoduje już nawet  
 161 delikatnych odbić populacji żywicieli. Widoczna jest tylko intensyfikacja populacji pasożytów



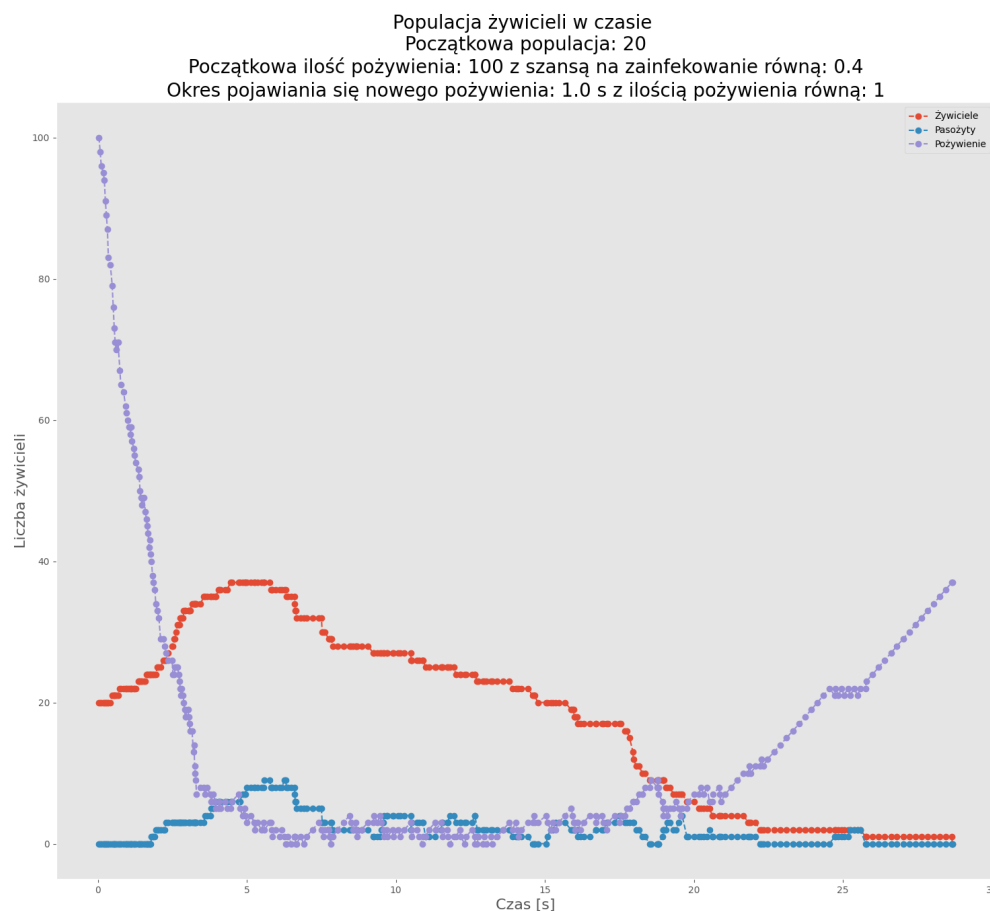


**Figure 6.** Populacja żywicieli w czasie - szansa na zainfekowanie 90%

Pomimo zwiększania szansy na zainfekowania aż o 40%, czas symulacji skrócił się nieznacznie. Najprawdopodobniej większość, osiągnęło już najkrótszy możliwy czas życia tej jednostki. Czas życia jednostki jest ograniczony od dołu przez wartość początkową energii oraz prędkość zbierania jedzenia jednostki. W momencie gdy każde jedzenie posiada w sobie pasożyta, czym więcej zje żywicieli tym szybciej umrze. Jego prędkość jest jednak ograniczona co bezpośrednio przekłada się na czas życia. Przy prawie pewnej szansie na złapanie pasożyta niewiele żywicieli daje radę się rozmnożyć. Łatwo możemy zauważyć wypłaszczanie się krzywej populacji żywicieli wraz ze wzrostem szansy na zainfekowanie.

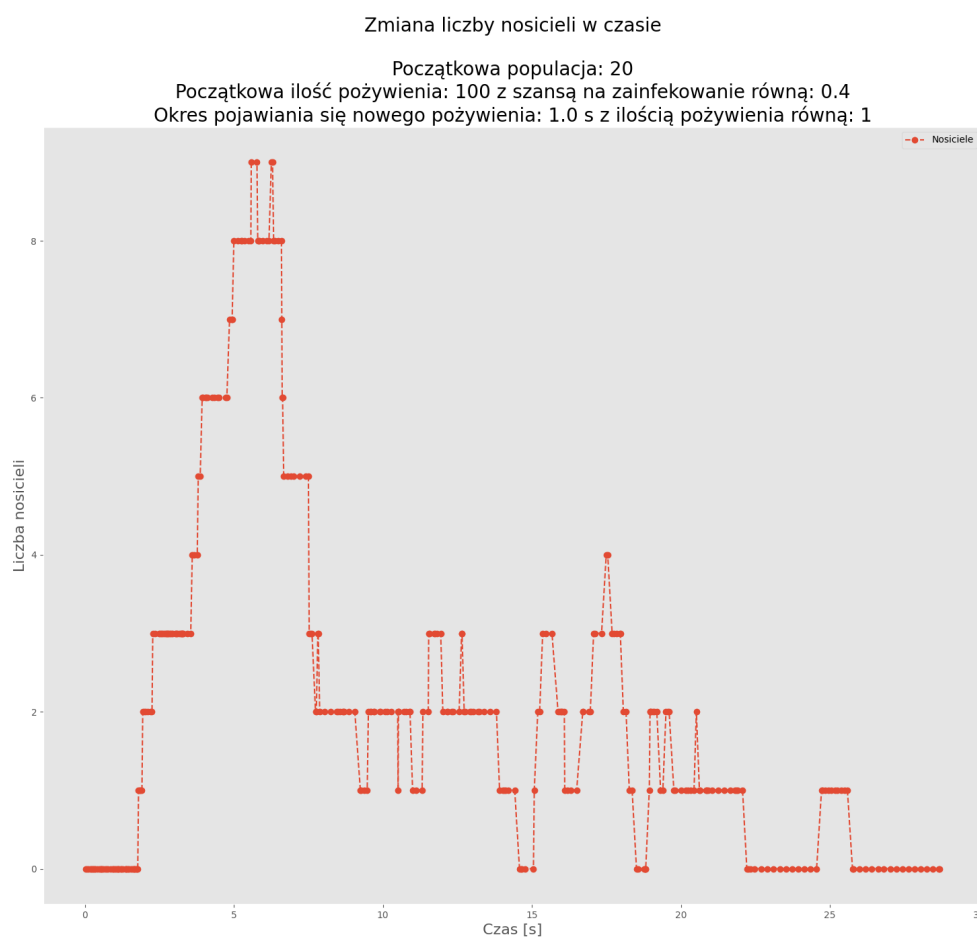
Kolejną z nich była zależność wielkości populacji żywicieli oraz pasożytów od szybkości pojawiania się pożywienia i ilości tego pożywienia. Zależność ta była badana dla ustalonej początkowej liczby pożywienia i populacji żywicieli równej odpowiednio 100 i 20, a także dla odpowiedniej ustalonej szansy tego, że pożywienie będzie zainfekowane pasożytem, równej 40%.

Poniżej przedstawiamy wykresy poszczególnych zależności, które udało nam się zaobserwować.



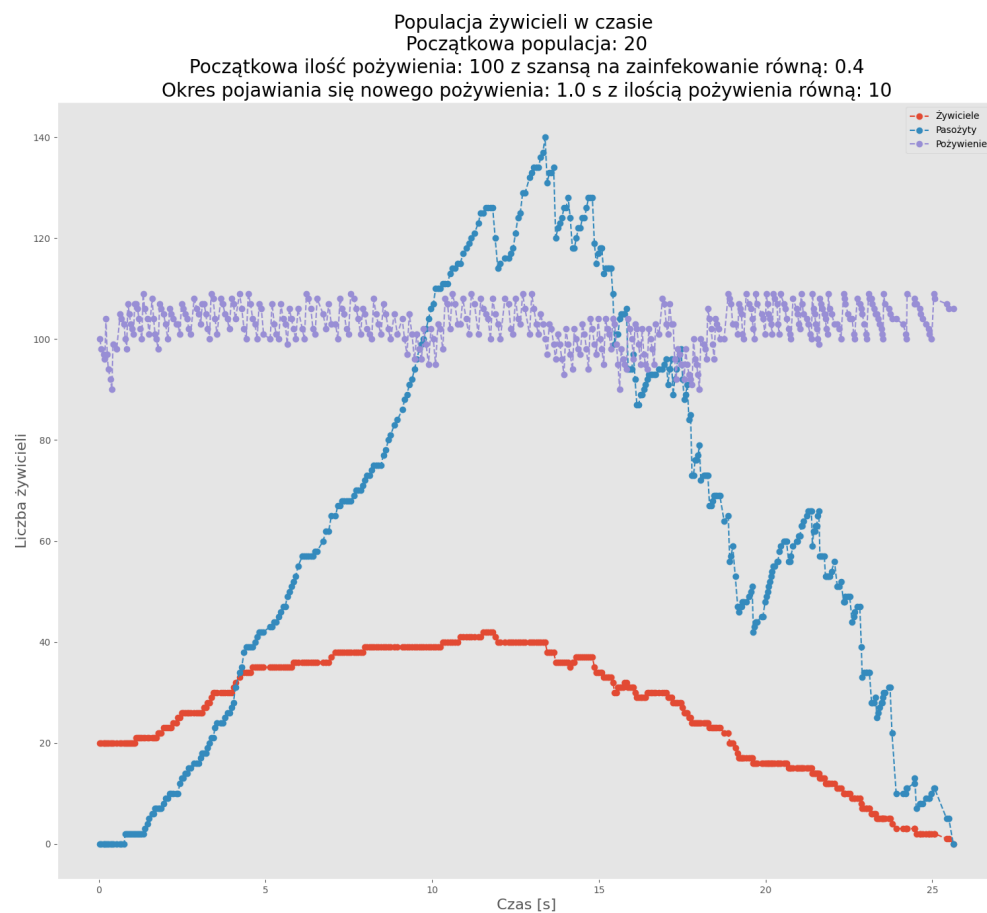
**Figure 7.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co jedną sekundę w liczbie 1 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

Można zauważyć, że liczba pożywienia maleje bardzo szybko, natomiast liczba żywicieli wzrasta maksymalnie dwukrotnie i stopniowo spada. Liczba pasożytów przy tej ilości dostępnego pożywienia jest dosyć mała - to jednak wystarcza aby powoli unicestwić populację żywicieli.



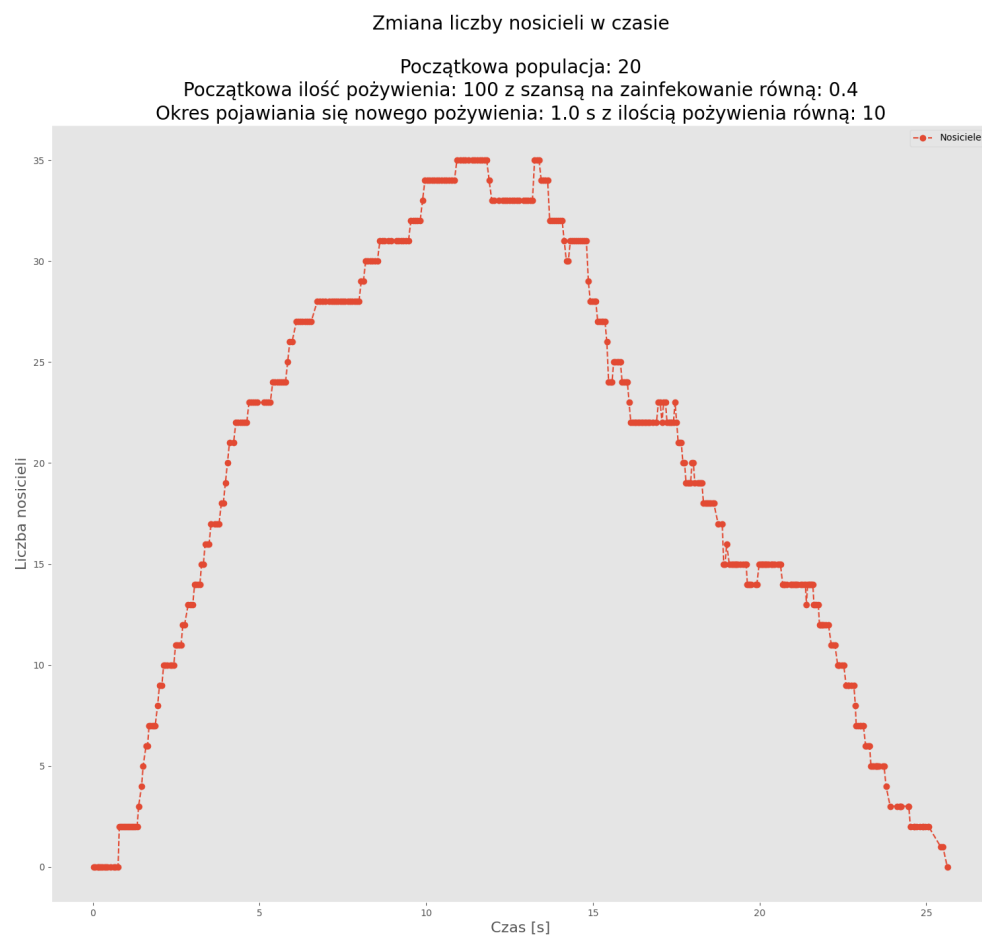
**Figure 8.** Zmiana liczby nosicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co jedną sekundę w liczbie 1 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

Liczba nosicieli rośnie bardzo szybko do pewnego poziomu, z którego stopniowo spada wraz z wymieraniem populacji żywicieli. Osiąga ona jednak maksymalnie 25% maksymalnej liczby żywicieli, co i tak wystarczyło, aby żywiele wymierali dość szybko.



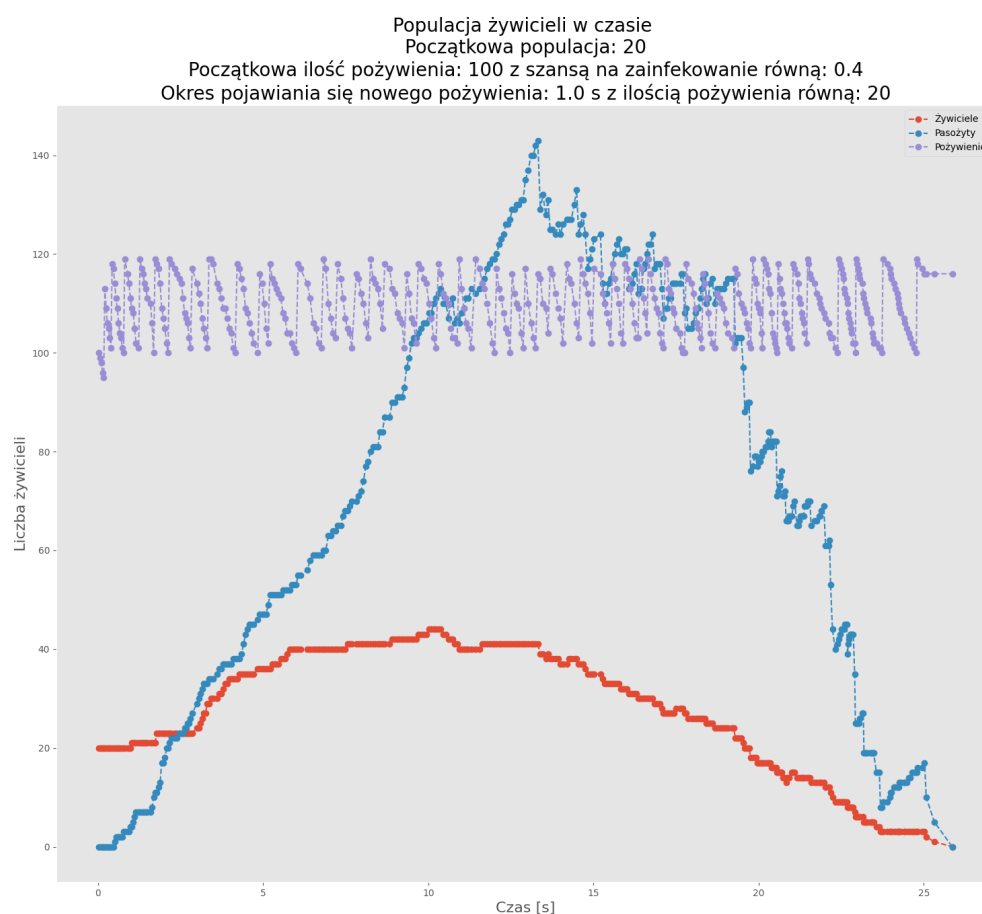
**Figure 9.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co jedną sekundę w liczbie 10 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%

Ta zależność różni się od poprzedniej większą liczbą pojawiającego się pożywienia co jedną sekundę - liczba pożywienia utrzymuje się przez większość czasu na dość stabilnym poziomie, natomiast liczba pasożytów jest wtedy bardzo duża, gdyż populacja żywicieli może na początku rozwijać się dość stabilnie. Zmienia się to w momencie osiągnięcia równej granicy populacji żywicieli dla takiej konfiguracji, która wynosi niecałe 50 - prawie dwa i pół raza więcej niż ich początkowa liczba. Po przekroczeniu tej liczby ilość pożywienia zaczyna maleć, podobnie jak liczba pasożytów i żywicieli, prowadząc do ostatecznego wymarcia populacji żywicieli.



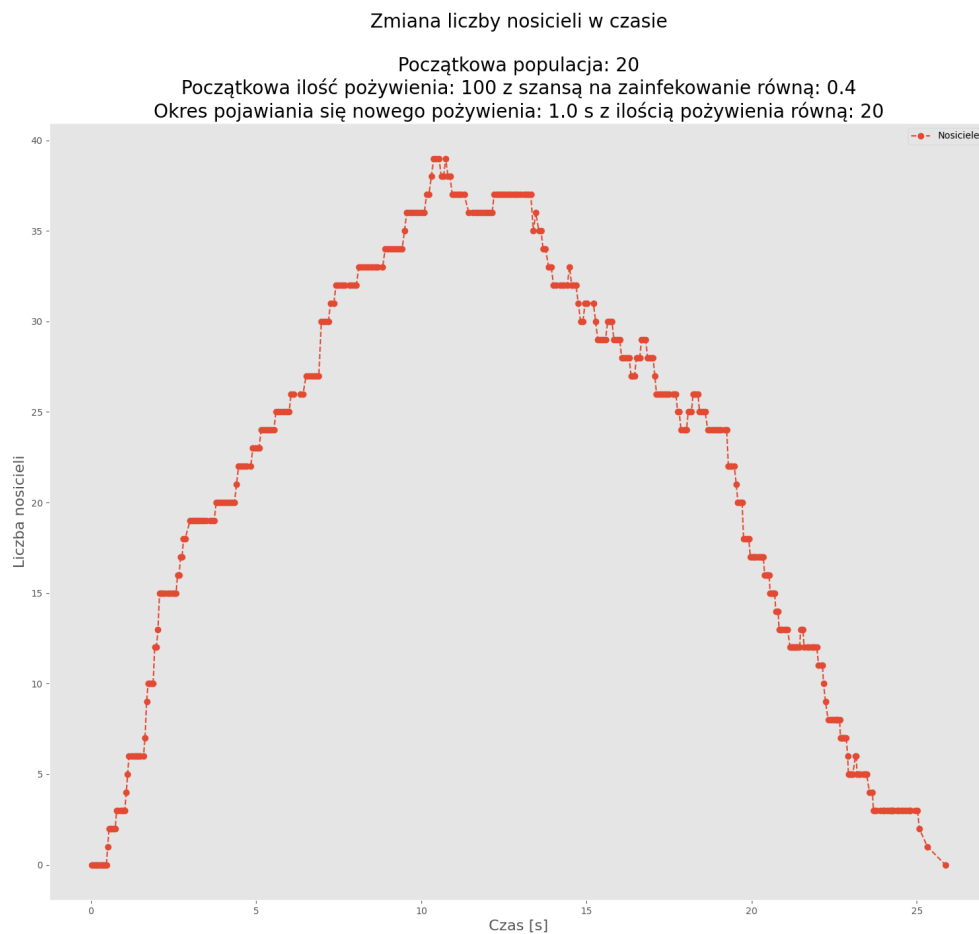
**Figure 10.** Zmiana liczby nosicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co jedną sekundę w liczbie 10 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

W tym przypadku liczba nosicieli jest bardzo duża - w pewnym momencie właściwie wszyscy żyjący żywicieli są również nosicielami. Jednak duża liczba dostępnego pożywienia umożliwia żywicielom długie przetrwanie i dopiero znaczna ilość pasożytów przyczynia się do stopniowego wymierania populacji żywicieli.



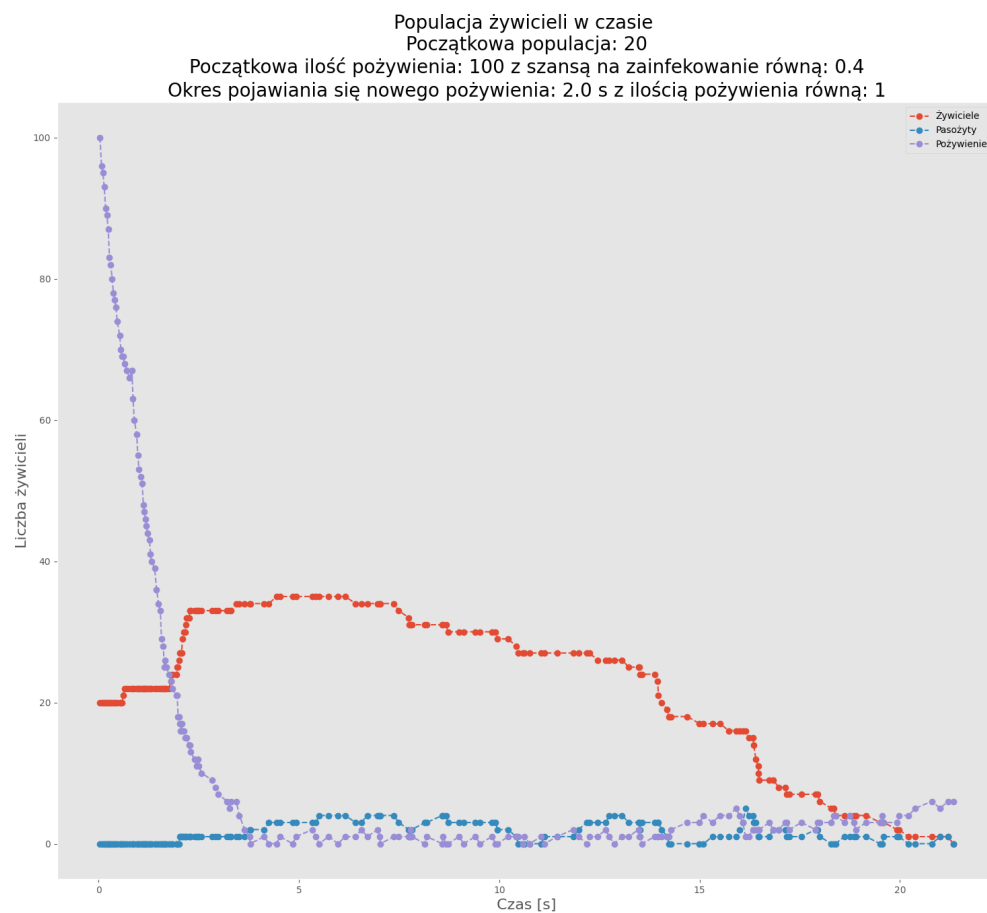
**Figure 11.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co jedną sekundę w liczbie 20 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%

Konfiguracja ta przedstawia jedną z najszybszych dostępnych konfiguracji dla pojawiającego się pożywienia - 20 jednostek co sekundę. Nie ma jednak dużych różnic pomiędzy tą konfiguracją, a poprzednią - żywiciele mieli szansę trochę dłużej się rozwijać, ich maksymalna ilość to podobnie jak poprzednio około 50 sztuk. Nastąpił jednak moment, kiedy mogło nastąpić odrodzenie populacji, gdyż nastąpił chwilowy wzrost liczby żywicieli, jednak przytłaczająca większość pasożytów przy całym czas dostatniej liczbie pożywienia zdecydowała o wymarcu cywilizacji.



**Figure 12.** Zmiana liczby nosicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co jedną sekundę w liczbie 20 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

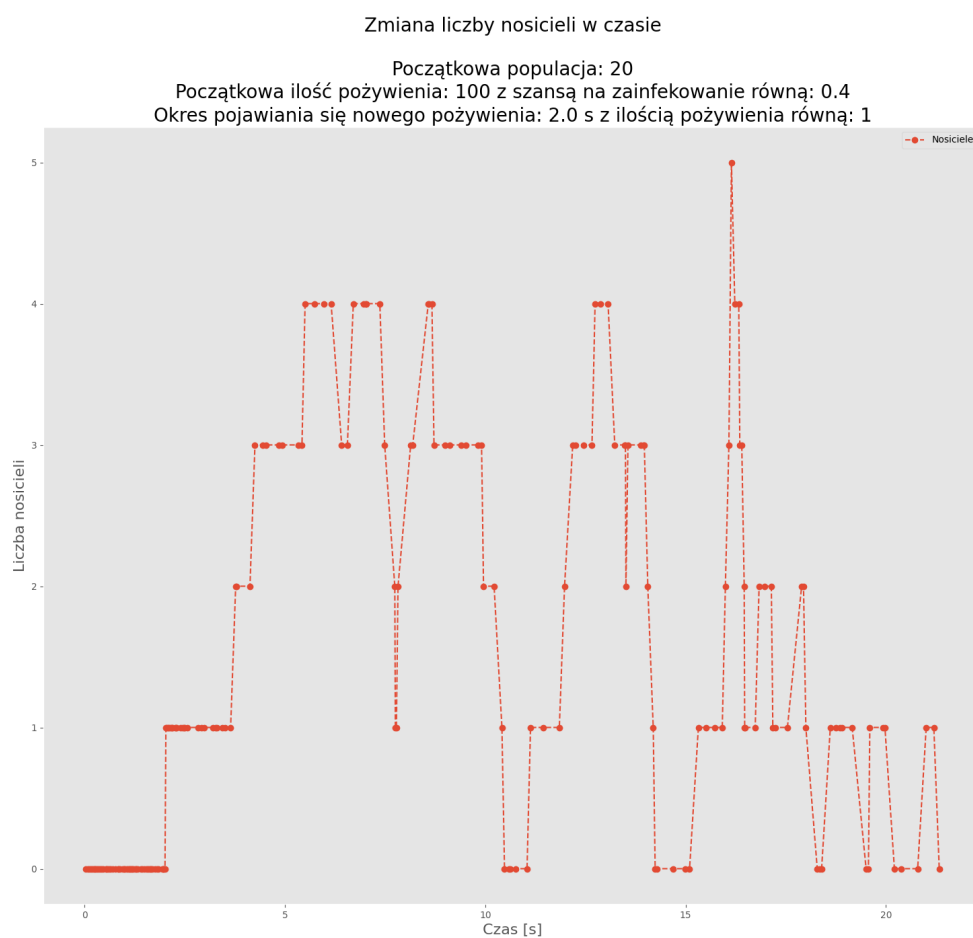
Podobnie jak w poprzednim przypadku, dzięki dużej liczbie pożywienia utrzymuje się duża liczba nosicieli - większe spożycie pozwala im przetrwać dłużej, dlatego też liczba nosicieli w szczycie osiąga rozmiar prawie równy całkowitej liczbie żywicieli. Również podobnie jak w poprzednim przypadku, prowadzi to do stopniowego wymierania żywicieli.



**Figure 13.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co dwie sekundy w liczbie 1 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%

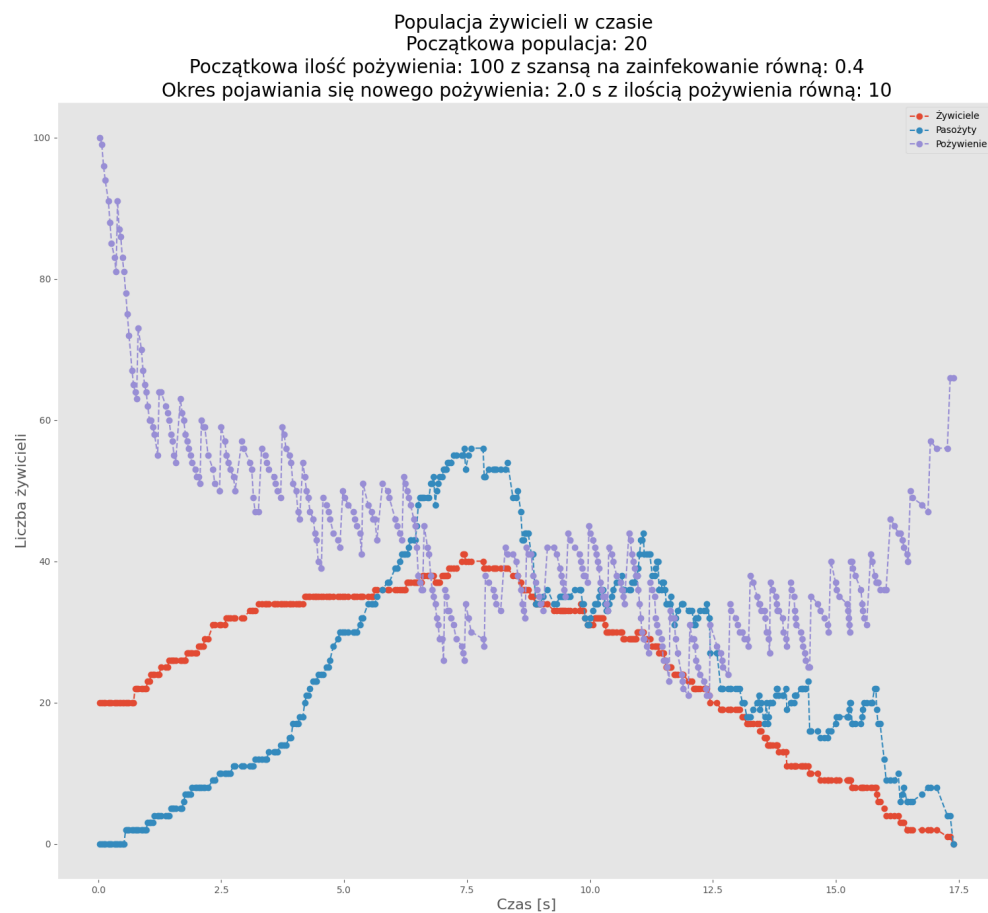
Można zauważyć, że dla pożywienia rzadziej pojawiającego się populacja żywicieli ma szansę przetrwać dłużej - wynika to z faktu mniejszej liczby pasożytów. Ale nawet dla tak małej ilości pożywienia wystarczy tak naprawdę jeden pasożyt, który po pewnym czasie doprowadzi do śmierci żywiciela i tak populacja ulegnie wymarciu.





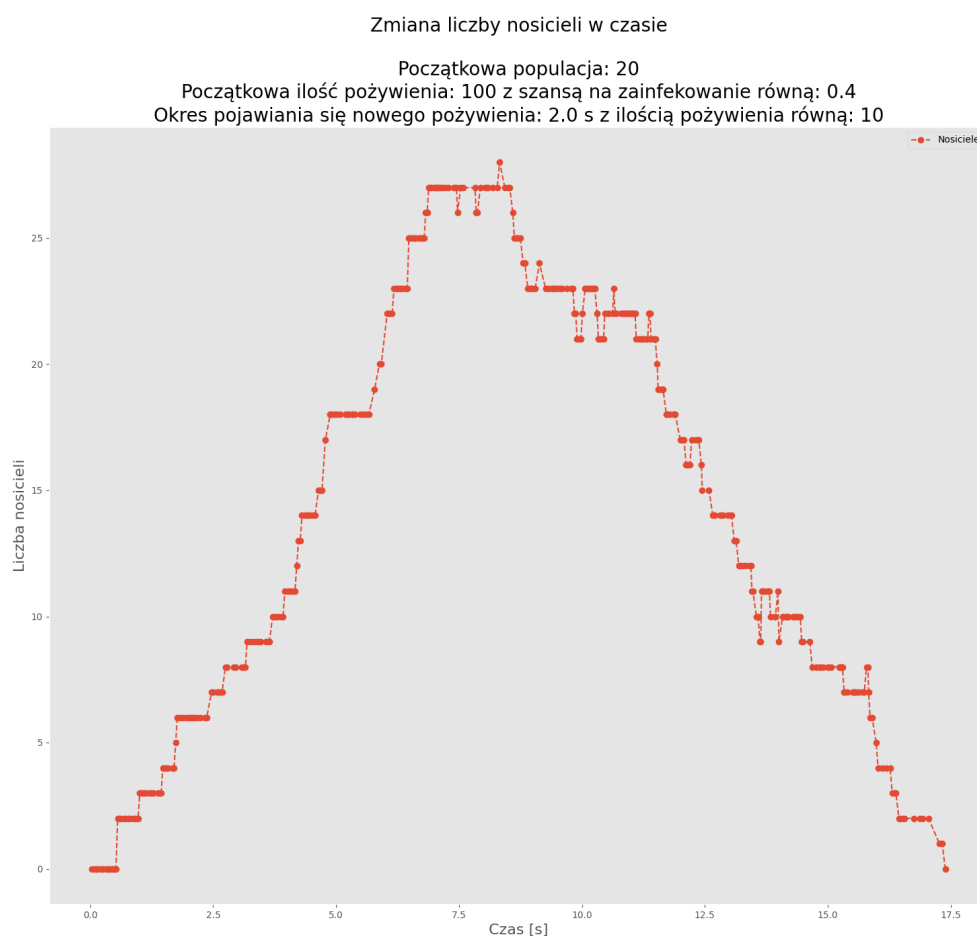
**Figure 14.** Zmiana liczby nosicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co dwie sekundy w liczbie 1 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

Można zauważyć nagłe i duże skoki w ilości nosicieli - wynika to z faktu dostępnej małej ilości pożywienia i przez to dość szybko następującego procesu wymierania populacji żywicieli.



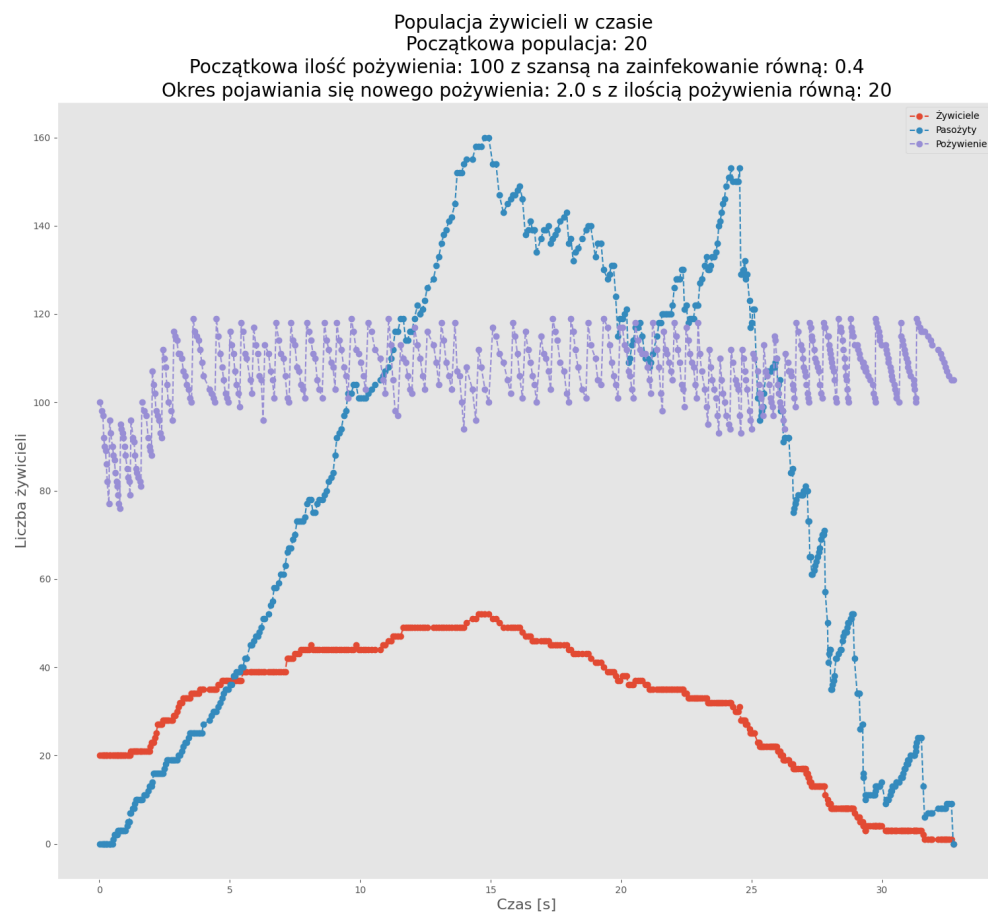
**Figure 15.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co dwie sekundy w liczbie 10 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

Dla tej konfiguracji populacja żywicieli ma okazję rosnać dosyć szybko i stabilnie, jednak ilość pożywienia sukcesywnie maleje i w ten sposób coraz więcej pasożytów znajduje się w ciałach żywicieli - prowadzi to do stopniowego pomniejszania się populacji żywicieli - nawet stopniowo powiększająca się liczba pożywienia nie może zmienić tego faktu, gdyż pasożytów jest już zbyt dużo.



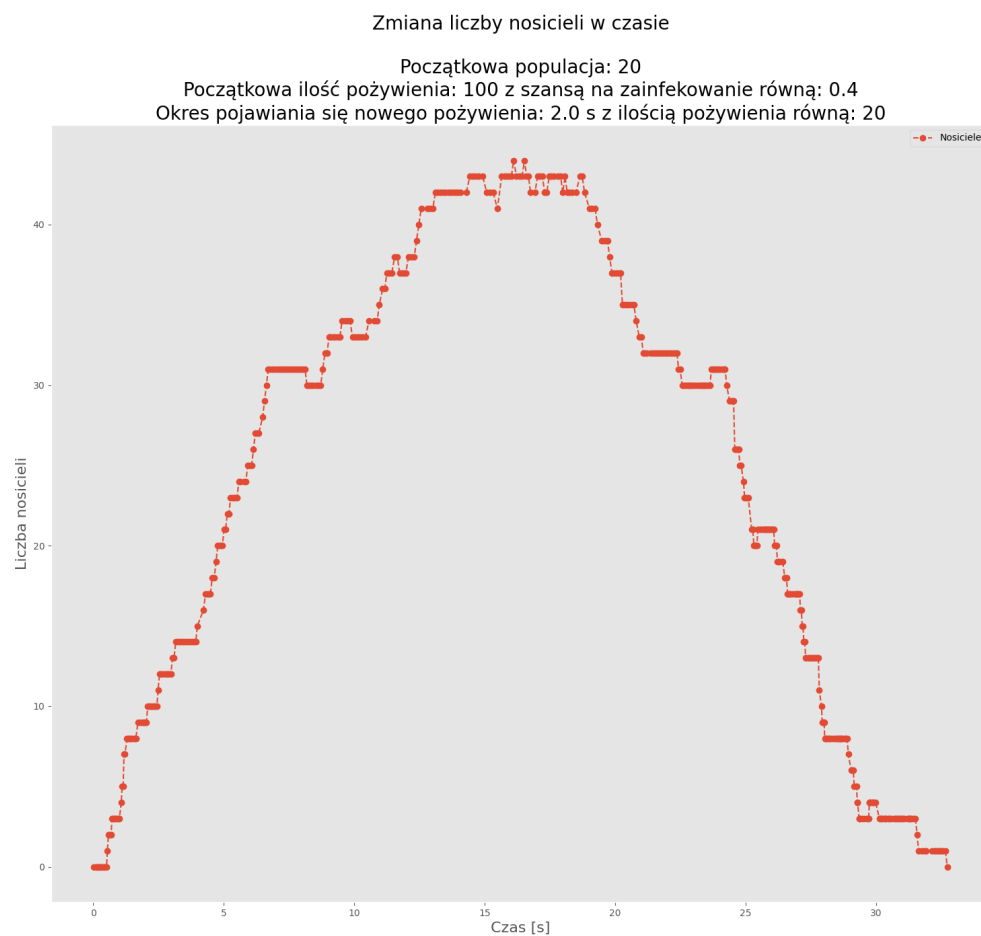
**Figure 16.** Zmiana liczby nosicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co dwie sekundy w liczbie 10 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

212 Powyższy wykres zmiany żywicieli w czasie wiąże ze sobą cechy dwóch różnych konfiguracji  
 213 - występują zarówno dość duże skoki liczby nosicieli, jak i dość duża ich liczba bliska całkowitej  
 214 liczbie wszystkich żywicieli. Wynika to z faktu, że przez różne okresy czasu występują nadmiary  
 215 lub niedobory pożywienia w symulowanym środowisku, przez co gdy nastąpi niedobór pożywienia,  
 216 populacja żywicieli zaczyna systematycznie maleć, prowadząc do ich wymarcia.



**Figure 17.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co dwie sekundy w liczbie 20 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

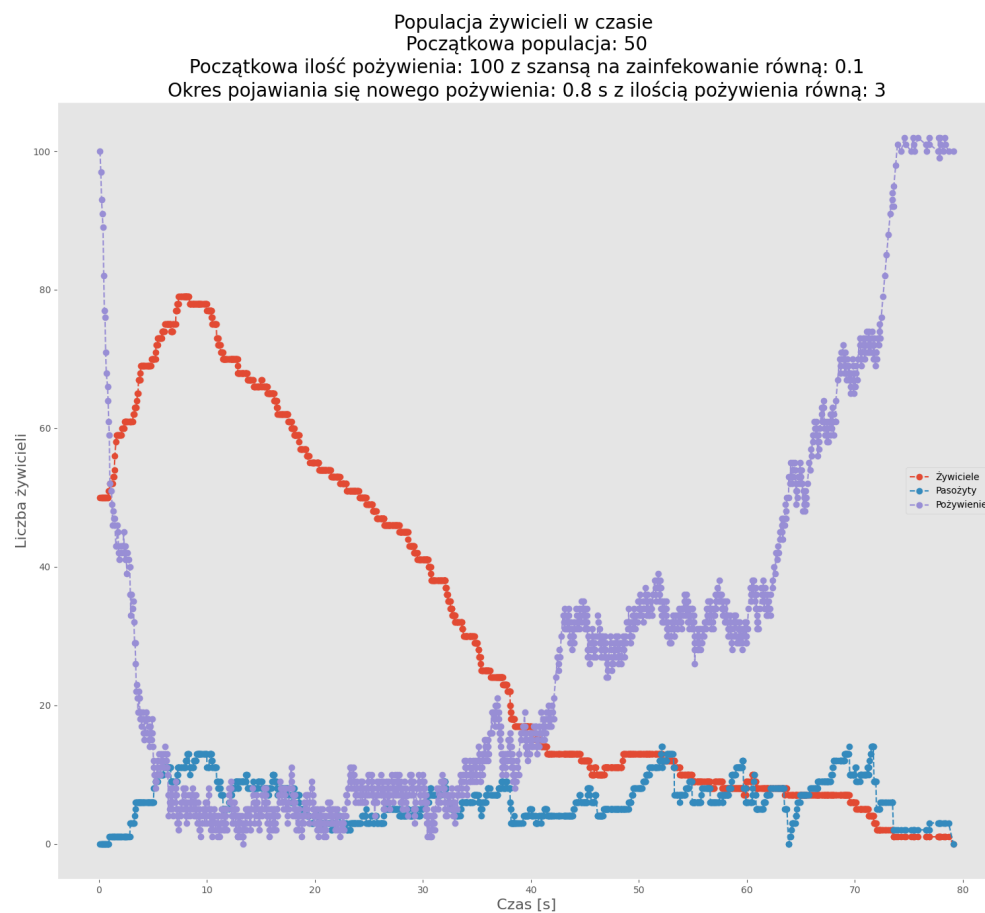
Można zauważyć, że podobnie jak w poprzednich przypadkach zbyt duża liczba pożywienia w stosunku do liczby żywicieli prowadzi do stopniowego wymierania populacji - nie inaczej jest też i w tym przypadku, gdyż zbyt dużo pasożytów znajduje się w pożywieniu.



**Figure 18.** Zmiana liczby nosicieli w czasie - początkowa populacja równa 20, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co dwie sekundy w liczbie 20 przy szansie bycia zainfekowanym równą 40%.

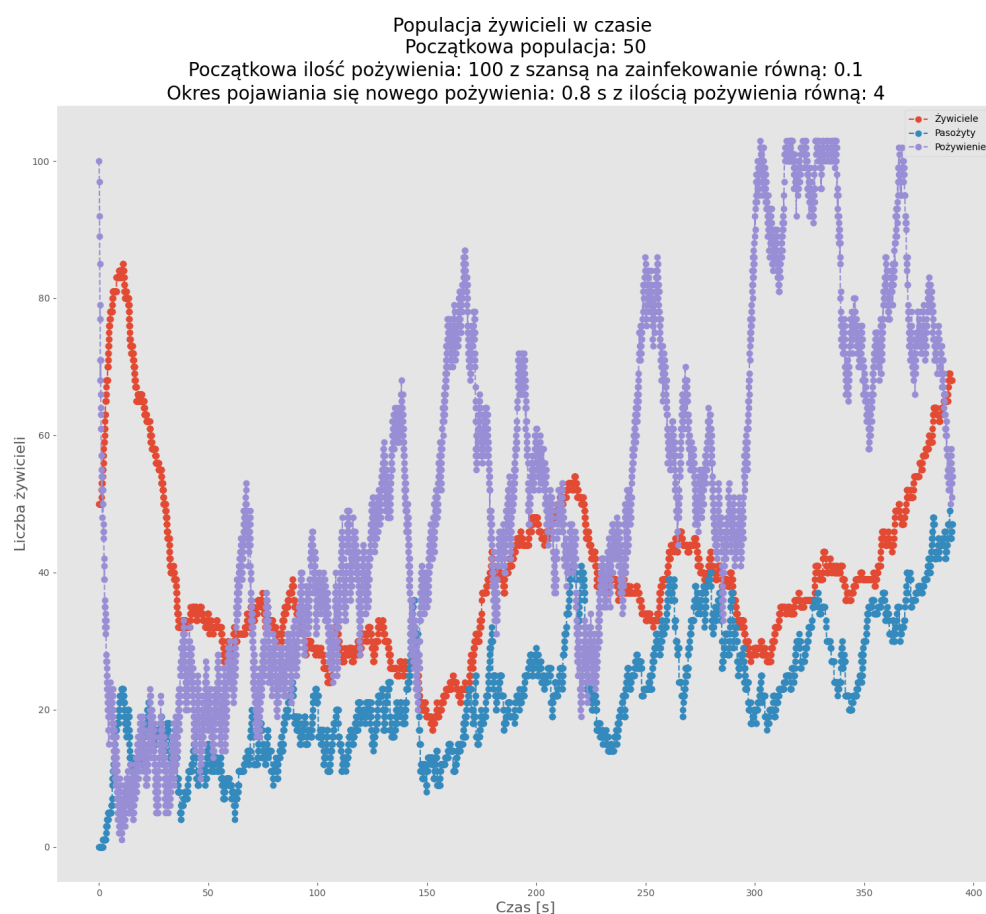
Podobnie jak na wykresie populacji żywicieli w czasie, tak tutaj przez pewien czas utrzymuje się pewna dość stała liczba nosicieli, jednak po pewnym czasie ogromna liczba pasożytów zaczyna brać górę nad żywicielami i populacja zaczyna bardzo stopniowo wymierać. Proces ten jest nieuchronny, ale jest dość dobrze wstrzymywany przez bardzo dostatnią ilość pożywienia.

Kolejnym celem było wyznaczenie minimalnej konfiguracji, dla której symulacja będzie trwać wiecznie - minimalnej pod względem pojawiającego się pożywienia przy ustalonej szansie na posiadanie pasożyta równej 10%



**Figure 19.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 50, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co 0.8 sekundy w liczbie 3 przy szansie bycia zainfekowanym równą 10%.

Można zaobserwować systematyczną konsumpcję pożywienia i chwilowy wzrost populacji, poprzedzający późniejszy stopniowy spadek w liczbie żywicieli i ostateczne wymarcie populacji. Okres życia populacji był dość długi, lecz niewystarczająca liczba pożywienia nie wystarczyła, aby zdrowych osobników było wystarczająco do przeżycia populacji - nawet mała liczba pasożytów wystarczyła do rozpoczęcia procesu zagłady populacji.



**Figure 20.** Populacja żywicieli w czasie - początkowa populacja równa 50, liczba pożywienia równa 100, pożywienie pojawiające się co 0.8 sekundy w liczbie 4 przy szansie bycia zainfekowanym równą 10%.

Dla powyższej konfiguracji można zauważyć cykliczne wzrosty i spadki w liczbie populacji żywicieli, prowadzące jednak do ostatecznego się jej powiększania - mimo dość dużych wahań w liczbie populacji żywicieli na początku trwania symulacji, populacji udało się przeżyć i stopniowo powiększać - pozwoliło to też lepiej gospodarować pożywieniem - populacja zdołała przeżyć, a przy tym pozwoliło to na utrzymanie większej ilości pożywienia mimo braku zmiany tempa jego pojawiania się.

## 6. Wnioski

W projekcie udało się przedstawić bezpośrednie zależności między żywicielami oraz pasożytami. Ważną cechą naszej symulacji jest możliwość reprodukcji ważnej dla obu gatunków warunków pozwalających na koegzystencję. Pasożyt żeruje na żywicielu ale nie chce doprowadzić do jego śmierci gdyż oznaczałoby to również jego koniec. Symulacja w bardzo obrazowy sposób pokazuje w jaki sposób liczebność obydwóch populacji wpływa na siebie. Zauważalna jest tendencja sprawiająca, że zbyt gwałtowny wzrost populacji pasożytów prowadzi do szybkiej i nieuniknionej anihilacji obu gatunków. Ważnym czynnikiem w badaniach było również pożywienie. Warto zauważyć, że nawet przy jego nieograniczonej ilości każde z badań rozpoczynało się gwałtownym wzrostem obu populacji zakończonym chwilową stabilizacją spowodowaną fizycznymi ograniczeniami żywicieli. Tak samo jak w prawdziwym świecie mogliśmy zaobserwować wyjałowienie środowiska spowodowane dominacją gatunku oraz powolne odradzanie zasobów wraz z jego wymieraniem.

Odpowiednie manipulowanie konfiguracjami świata symulacji pozwoliło na zauważenie różnych tendencji i zgromadzenie odpowiednich danych, które pozwoliły na sformułowanie konstruktywnych wniosków. Warto podkreślić, że symulacja pozwoliła na znalezienie konfiguracji środowiska, dla której symulacja mogłaby trwać wiecznie i odbywałoby się to przy optymalnej ilości pożywienia pozwalając na systematyczny rozwój populacji żywicieli przy jednoczesnej dużej ilości pasożytów, tak aby obie populacje mogły cieszyć się życiem.

Dużo zależności znanych z rzeczywistości zostało potwierdzonych i zaobserwowanych w stworzonej przez nas symulacji. Można zatem podsumować przeprowadzone eksperymenty i badania jako udane.

## 7. Kod źródłowy

Kod źródłowy projektu znajduje się pod adresem: <https://github.com/jakubowiczish/host-parasite-simulation>

## Referencje

1. Science Direct. [http://www.personal.psu.edu/users/p/j/pjh18/downloads/184\\_Hudson\\_2006\\_Healthy\\_ecosystem\\_is\\_infected\\_TREE.pdf](http://www.personal.psu.edu/users/p/j/pjh18/downloads/184_Hudson_2006_Healthy_ecosystem_is_infected_TREE.pdf).
2. Parazytologia. <http://parasite.org.au/para-site/introduction/introduction-essay.html>.
3. Scientific reports. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-24627-1>.
4. Adaptation. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC53943/>.
5. Pygame. <https://www.pygame.org/>.
6. Pymunk. <http://www.pymunk.org/en/latest/>.
7. Przenoszenie pasożytów. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2992712/>.

© 2021 by the authors. Submitted to *Appl. Sci.* for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).