

**Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

---

Katedra Informatyki



**PRACA MAGISTERSKA**

**PIOTR KOZŁOWSKI**

**PRZENOŚNY KLASTER OBLICZENIOWY OPARTY NA  
URZĄDZENIACH SOC**

PROMOTOR:  
dr hab. inż. Aleksander Byrski

Kraków 2015

### **OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY**

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZĄ PRACĘ DYPLOMOWĄ WYKONAŁEM OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE, I NIE KORZYSTAŁEM ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMNIENIONE W PRACY.

.....

PODPIS

**AGH**  
**University of Science and Technology in Krakow**

---

Department of Computer Science



**MASTER OF SCIENCE THESIS**

**PIOTR KOZŁOWSKI**

**MOBILE COMPUTING CLUSTER BASED ON SoC DEVICES**

SUPERVISOR:  
Aleksander Byrski Ph.D

Krakow 2015

Podziękowania...

## Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	7
1.1. Wstęp	7
1.2. Aktualny stan wiedzy	7
1.3. Cel pracy	8
<b>2. Charakterystyka rozpatrywanego problemu</b>	9
2.1. Urządzenia SoC	9
2.2. Cluster Computing	9
2.3. Obliczenia równoległe oraz rozproszone	9
2.4. Istniejące rozwiązania	9
<b>3. Opis rozwiązania</b>	10
3.1. Wykorzystane algorytmy	10
3.1.1. Algorytmy genetyczne	10
3.1.2. Master/slave	11
3.2. Użyte technologie	11
3.2.1. Scala	11
3.2.2. Akka	12
3.2.3. Rozszerzenia Akka	13
3.2.4. Raspberry Pi	14
3.2.5. MongoDB	14
3.2.6. Play Framework i AngularJS	14
3.2.7. Wykorzystane szablony	16
3.3. Platforma	16
3.3.1. Architektura (aktorzy?, schematy)	16
3.3.2. Komunikacja (protokół komunikacji, schematy)	16
3.3.3. Fault tolerance i supervision strategy	16
<b>4. Zastosowanie w praktyce</b>	17
4.1. Użycie	17
4.1.1. Monitoring	17
4.1.2. Implementacja algorytmów genetycznych	19
4.1.3. Problem Rastrigina	20
4.1.4. Dystrybucja	22
4.2. Wyniki testów	22
4.2.1. Wyniki obliczeń	22
4.2.2. Skalowalność	23
4.2.3. Wydajność	24
4.2.4. Narzut komunikacji	24

4.2.5. Zużycie energii.....	24
4.2.6. Koszty rozbudowy.....	24
<b>5. Podsumowanie .....</b>	<b>25</b>
5.1. Wnioski.....	25
5.2. Możliwości rozwoju .....	25
5.2.1. Wykorzystanie GPU.....	25
5.2.2. Inne algorytmy (lub modyfikacje algorytmu genetycznego) .....	25
5.2.3. Optymalizacja (systemu, bytecode’u, pod kątem SoC, tuning GC) .....	25
5.2.4. IoT .....	25
.1. Instrukcja uruchomienia platformy.....	28
.1.1. System.....	28
.1.2. Wymagana infrastruktura .....	28
.1.3. Skrypty .....	28
.1.4. Aplikacja .....	28

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Wstęp

Tematyka niniejszej pracy jest związana z przetwarzaniem równoległym w środowisku rozproszonym oraz algorytmami ewolucyjnymi. Obliczenia równoległe, systemy wysokiej dostępności oraz wielkiej skali są tematem bardzo aktualnym i wciąż powszechnie rozwijanym. Powstaje wiele urządzeń oraz systemów wieloprocessorowych zbudowanych w celu połączenia zasobów w jedną całość oraz wykorzystujących w maksymalnym stopniu ich moc obliczeniową. Zasoby te mogą być zlokalizowane lokalnie lub być rozproszone w różnych rejonach świata, czyli np. w sieci Internet. Przykładem mogą być takie projekty jak Hadoop lub Condor. Połączone zasoby mogą zostać wykorzystane do obliczeń o dużej skali (np. symulacji) i przyspieszenia krytycznych obliczeń (systemy obronne, loty kosmiczne, prognozy). Jak również są przydatne w przypadku przetwarzania dużej liczby rozproszonych danych i rozwiązywania trudnych problemów optymalizacji (przeszukiwania dużych przestrzeni rozwiązań np. w celu poszukiwania ekstremum). Do głównych obszarów zastosowań można zaliczyć też obliczenia naukowe prowadzone przez różne uniwersytety i inne ośrodki badawcze, które w dużym stopniu przyczyniają się do rośnięcia zapotrzebowania na takie rozwiązania oraz powstawanie nowych. We wcześniejszych latach ta tematyka napotykała różne bariery w rozwoju, takie jak zbyt mały rynek zbytu, spowodowany wysokimi kosztami utrzymania oraz realizacji architektury. Było również mniej rozwiązań tego typu oraz mniejsze zapotrzebowanie na nie. Klastry są bardziej elastycznym rozwiązaniem a co za tym idzie bardziej opłacalnym. Stały się zatem nową perspektywą, powszechnie już wykorzystywaną w dzisiejszych systemach. Możliwość użycia tego typu rozwiązań przez zwykłych użytkowników i mniejsze firmy, komercjalizacja, wykorzystanie w przemyśle i elastyczne formy handlu, np. sprzedaż zużytej mocy obliczeniowej w bardzo dużym stopniu przyczyniły się do popularyzacji tejże tematyki. Trwa ciągły rozwój technologii z tym związanych, mając na uwadze takie rzeczy jak wydajność i zapotrzebowanie na energię oraz łatwa dostępność. Wiele problemów nie zostało jeszcze rozwiązanych lub w wystarczającym stopniu zbadanych. Argumenty stojące za rozwojem tych technologii to m.in. rosnące zapotrzebowanie na moc obliczeniową, stosunek ceny do mocy obliczeniowej, bariery technologiczne rozwoju procesorów sekwencyjnych, dzielenie zasobów, skalowalność, komunikacja.

## 1.2. Aktualny stan wiedzy

Do tej pory zostało opracowanych kilka klastrów obliczeniowych z wykorzystaniem urządzeń SoC takich jak Raspberry Pi. Przykładem może być praca opisana w artykule Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster [39]. Powstało również kilka podobnych rozwiązań o których informacje można znaleźć na Internecie. Dostępnym okazało się wydanie czasopisma Informatica opisujące klaster obliczeniowy wykorzystujący telefony komórkowe, oraz rolę komunikacji i kilka różnych podejść bazujących na różnych architekturach systemu [35]. Dwa kolejne artykuły opisują klastry w których skład wchodzi urządzenia przenośne podłączone do sieci Internet lub połączone w szybkiej sieci lokalnej ukazały się na łamach ... [37, 47]. Poruszono tam także problem dynamicznego load-balancingu oraz zrównoleglania obliczeń. W artykule Adaptive clustering for mobile wireless networks [45] opisano samoorganizującą się, odporną na uszkodzenia składowych węzłów mobilną sieć oraz algorytmy z nią

związane, które są dosyć istotne w kontekście niniejszej pracy. W pracy Cluster Computing: A Mobile Code Approach [49] opisano klastery wysokiej wydajności wraz z jego architekturą oraz implementacją. Natomiast praca pt. DroidCluster: Towards Smartphone Cluster Computing - The Streets are Paved with Potential Computer Clusters [52] opisuje nowoczesne smartfony wchodzące w skład klastra obliczeniowego oraz temat Grid-Computing. Jak widać temat i problemy z nim związane znany jest od dosyć dawna. Natomiast wciąż jest aktualny i nadal brakuje skutecznych rozwiązań wszystkich problemów. Same urządzenia SoC zyskały swoją popularność dopiero w ostatnich latach, głównie za sprawą taniego mini komputera jakim jest Raspberry Pi. Większość powstałych rozwiązań bazuje na takich technologiach jak MPI oraz Hadoop, natomiast w niniejszej pracy autor skupi się na technologiach pracujących w wirtualnej maszynie Javy, co jeszcze bardziej zwiększy mobilność powstałej platformy.

### 1.3. Cel pracy

Do celów niniejszej pracy należy nakreślenie możliwości zastosowania przenośnych klastrów obliczeniowych, przedstawienie problemów związanych z ich wykorzystaniem, zidentyfikowanie obszarów potencjalnych usprawnień oraz wykorzystanie przygotowanego klastra w celu rozwiązania trudnego problemu obliczeniowego. Jako część programistyczna niniejszej pracy, zostanie wykonana mobilna platforma łącząca możliwości urządzeń SoC, nadzorująca ich pracę oraz zarządzająca dostępną energią. Pod uwagę zostanie również wzięta odporność na uszkodzenia oraz łatwa zastępowalność urządzeń. Zostaną wykorzystane takie paradygmaty jak programowanie funkcjonalne oraz reaktywne, z wykorzystaniem technologii Scala oraz Akka wraz z podejściem równoległym. Jako część persystencji danych zostanie wykorzystana baza NoSQL w technologii MongoDB. Część kliencka zostanie zrealizowana w technologii REST/HTTP z użyciem frameworka Play oraz AngularJS. Zaprojektowana platforma będzie w stanie monitorować pracę klastra, "łączyć" komponenty w jedną całość czyli zarządzać komunikacją, być odporna na sytuację uszkodzenia jednego z elementów klastra oraz częściową utratę danych, maksymalnie wykorzystywać moc obliczeniową elementów klastra oraz zarządzać load balancingiem. Niniejsza praca będzie próbą wykorzystania urządzeń SoC do wykonywania wydajnych obliczeń prowadzonych w wirtualnej maszynie Javy oraz próbą odpowiedzi na pytanie czy jest możliwe zaprogramowanie komunikacji między elementami klastra w sieci Ethernet nie powodującej zbyt wielkiego narzutu przesyłu danych w stosunku do szybkości obliczeń. Praca będzie też próbą wykorzystania wirtualnej maszyny Javy oraz technologii wysokiego poziomu do wykonywania obliczeń dużej skali i sprawdzenie wydajności takich rozwiązań. Stworzenie samoorganizującej się oraz inteligentnej platformy będzie bardzo dużym wyzwaniem wkraczającym trochę w tematykę AI oraz Systemów Agentowych. Jeśli rozwiązanie wykorzystujące technologie przedstawione w niniejszej pracy będzie wystarczająco wydajne i odpowiednio skalowalne, ułatwi to w znacznym stopniu mobilność tego rozwiązania oraz rozwiąże potrzebę tworzenia nowych bibliotek z myślą o konkretnej platformie. Co za tym idzie większą część czasu i nakładów finansowych będzie można poświęcać na implementację rozwiązania samego problemu aniżeli na uruchomienie tej implementacji lub tworzenie rozwiązań pasujących do konkretnego sprzętu (architektury) lub systemu.



## **2. Charakterystyka rozpatrywanego problemu**

W poniższym rozdziale zarysowano kontekst problemów poruszanych w niniejszej pracy.

### **2.1. Urządzenia SoC**

### **2.2. Cluster Computing**

### **2.3. Obliczenia równoległe oraz rozproszone**

### **2.4. Istniejące rozwiązania**

## 3. Opis rozwiązania

Niniejszy rozdział zawiera charakterystykę rozwiązania stworzonego na potrzeby niniejszej pracy, przedstawiono tutaj najważniejsze wykorzystane algorytmy oraz omówiono w skrócie użyte technologie.

### 3.1. Wykorzystane algorytmy

W rozdziale opisano kilka algorytmów użytych podczas implementacji rozwiązania stworzonego na potrzeby niniejszej pracy.

#### 3.1.1. Algorytmy genetyczne

Algorytmy genetyczne zaliczają się do grupy algorytmów ewolucyjnych. Zostały opracowane przez Johna Hollanda w latach siedemdziesiątych i są inspirowane teorią ewolucji Darwina tudzież ewolucją biologiczną [40]. Istnieje wiele różnych prac traktujących o wykorzystaniu algorytmów genetycznych, różnych ich odmianach czy modyfikacjach oraz badaniu ich efektywności. Przykładem może być praca magisterska zawarta w pozycji [40] lub trochę starsza pozycja książkowa [42]. Opis implementacji algorytmów genetycznych można znaleźć w pozycji [51].

#### Pojęcia

- Gen - cecha mająca wpływ na jakość rozwiązania.
- Chromosom - indywiduum, osobnik prezentujący jedno z rozwiązań problemu, składa się z genów.
- Populacja - zbiór chromosomów, prezentuje zbiór wszystkich rozwiązań danego problemu.
- Migracja - wymiana osobników pomiędzy populacjami.
- Selekcja - algorytm wyboru osobników pozostałych w danej populacji.
- Krzyżowanie - tworzenie osobników potomnych w trakcie trwania ewolucji na podstawie innych, wybranych osobników - rodziców.
- Mutacja - modyfikacja osobnika z elementem losowości, mająca na celu próbę eksploracji nowych obszarów rozwiązań.
- Funkcja przystosowania (ang. fitness) - zwana też funkcją celu, określa jakość danego rozwiązania.
- Ewaluacja - wyliczenie wartości funkcji fitness dla każdego osobnika populacji czyli inaczej ocena jakości znalezionych rozwiązań.
- Ewolucja - powtarzający się cykl w trakcie którego następuje rozwój populacji oraz w skład którego wchodzi m.in. ewaluacja, selekcja, krzyżowanie, mutacja oraz migracja.
- Generacja - jeden cykl algorytmu.

### Model wyspowy

Jest to odmiana algorytmu genetycznego przystosowana do obliczeń równoległych oraz rozproszonych. Zamiast jednej dużej populacji rozważamy tutaj kilka podpopulacji zwanych wyspami. Każda wyspa może być traktowana jako osobna populacja, ponieważ ewolucja na niej zachodzi w izolacji od pozostałych wysp. Co pewien okres populacje znajdujące się na wyspach wymieniają się między sobą pewną ilością osobników w procesie migracji. Pozwala to przyspieszyć znajdowanie rozwiązania. Istotna jest tutaj topologia połączeń pomiędzy wyspami pozwalająca na wymianę osobników, metoda selekcji migrujących osobników, ich wielkość oraz odstęp pomiędzy kolejnymi migracjami. Badania różnych parametrów tego zjawiska można znaleźć m.in. w pracy [40].

### Zastosowanie

Algorytmy ewolucyjne sprawdzają się tam gdzie nie jest dobrze znana przestrzeń rozwiązań ale został określony sposób oceny jakości rozwiązania. Znajdują zastosowanie przy rozwiązywaniu problemów NP, np. problemu komiwojażera w którym trzeba znaleźć najkrótszą drogę łączącą wszystkie miasta tak aby odwiedzić każde miasto co najmniej raz. Innymi zastosowaniami mogą być poszukiwania ekstremów funkcji, których nie da się obliczyć analitycznie lub przeszukiwanie dużych przestrzeni rozwiązań jak np. w przypadku problemu grupowania. Algorytmy genetyczne są mniej zależne od wstępnej inicjalizacji oraz mniej skłonne do znajdowania rozwiązań lokalnych zamiast optymalnych [9, 40].

#### 3.1.2. Master/slave

Master/slave jest modelem komunikacji w którym jedno urządzenie lub proces zwane master kontroluje jedno lub więcej urządzeń lub procesów zwanych slave lub worker [23].

Ten model komunikacji może zostać wykorzystany w następujących przypadkach:

- gdy chcemy mieć jeden proces, tzw. single-point of responsibility, który podejmuje decyzje i koordynuje akcje w celu zachowania spójności w systemie,
- potrzebujemy zapewnić jeden punkt dostępu do zewnętrznego systemu,
- istnieje potrzeba stworzenia scentralizowanego serwisu, np. zajmującego się routingiem.

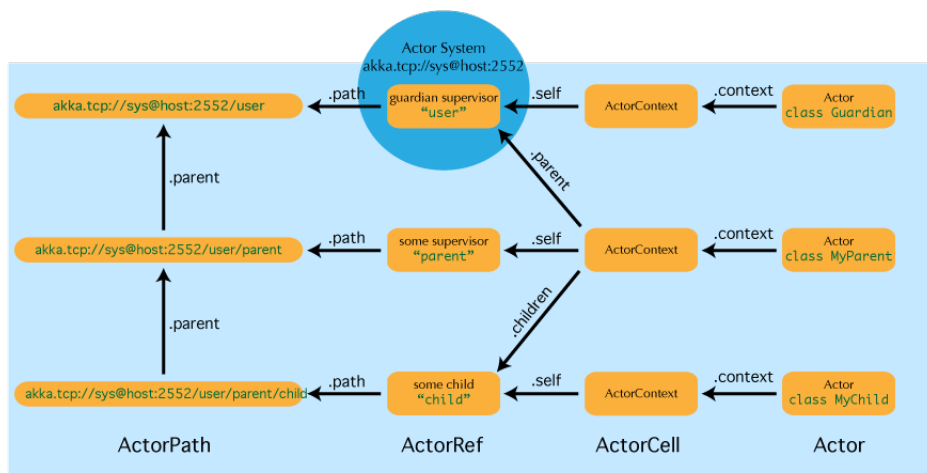
Rozwiązanie to ma niestety również kilka wad, jak na przykład istnieje niebezpieczeństwo utworzenia tzw. wąskiego gardła co może spowodować problemy z wydajnością lub tzw. single-point of failure. Jeśli urządzenie/proces posiadające rolę master ulega awarii, powinniśmy w jakiś sposób obsłużyć taką sytuację, np. poprzez ponowne wystartowanie procesu/urządzenia z rolą master aby zapewnić poprawne i niezawodne działanie komunikacji. Sytuacje takie mogą wprowadzić pewne opóźnienia w procesie odzyskiwania sprawności systemu [17].

## 3.2. Użyte technologie

Podrozdział przedstawia krótką charakterystykę oraz uzasadnienie wykorzystanych technologii.

### 3.2.1. Scala

Do stworzenia platformy na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano język Scala. Głównym aspektem przemawiającym na korzyść tego języka jest to, że do jego działania wystarczy maszyna wirtualna Javy. Jest to język obiektowy podobnie jak Java ale łączy również zalety języków funkcyjnych, które w ostatnim czasie stają się coraz bardziej popularne. Język ten jest stworzony aby umożliwić elegancko i zwięźle programować. Mimo że jest językiem dynamicznie typowanym zapewnia tzw. type safety [33]. Wprowadza również wiele innowacji oraz ciekawych rozwiązań do konstrukcji języka jak np. case class, currying, zagnieżdżanie funkcji, dsl, tail recursion, słowo kluczowe lazy czy trait, konstrukcja podobna



Rysunek 3.1: Relacja między kilkoma pojęciami identyfikującymi aktorów w systemie [1]

do interfejsu z języka Java ale mogąca posiadać częściową implementację. Scala preferuje obiekty immutable. Scala obsługuje funkcje wyższego rzędu oraz pozwala zwięźle definiować funkcje anonimowe, kładzie również duży nacisk na skalowalność. Dodatkową zaletą tego języka jest to, iż jest on w pełni kompatybilny z językiem Java, co oznacza że możemy w nim używać biblioteki lub frameworki stworzone dla Javy bez żadnych dodatkowych deklaracji. Ostatecznie program napisany w Scali jest kompilowany do kodu bajtowego Javy [36, 38, 15, 46]. Według autora niniejszej pracy do wad tego języka należy m.in. to, że niektóre instrukcje można wyrazić na wiele różnych sposobów co utrudnia czytelność kodu oraz zwiększa trudność nauki tej technologii.

### 3.2.2. Akka

Jednym z kluczowych frameworków wykorzystanych w niniejszej pracy jest Akka. Akka jest projektem Open Source na licencji Apache 2. Posiada wersję przeznaczoną dla języka Java jak również dla języka Scala. Projekt Akka mimo stosunkowo niedługiej obecności na rynku jest gotowy do zastosowań produkcyjnych. Cechuje się obecnością wielu interesujących z punktu widzenia niniejszej pracy rozszerzeń, które zostały opisane w jednym z następnych podrozdziałów, wyczerpującej dokumentacji oraz dużej i aktywnej społeczności rozwijającej ten produkt a także wsparciem komercyjnych firm. Akka używa modelu aktorowego aby zwiększyć poziom abstrakcji i rozdzielić logikę biznesową od niskopoziomowego zarządzania wątkami oraz operacjami I/O [43, 14].

Podstawowym bytem w technologii Akka są aktorzy. Aktor zapewnia wysokopoziomą abstrakcję dla lepszej współbieżności oraz zrównoleglenia operacji. Jest on lekkim, wydajnym, sterowanym zdarzeniami procesem, który komunikuje się z innymi aktorami za pomocą asynchronicznych wiadomości przechowywanych w skrzynkach odbiorczych. Aktor enkapsuluje pewien stan i zachowania, które realizują określone zadania. Więcej informacji na temat koncepcji aktorów w projekcie Akka można znaleźć w pozycji [14].

Każdy aktor w systemie może być identyfikowany na kilka różnych sposobów pozwalających na komunikację między nimi. Różnicę między kilkoma z nich przedstawiono na rysunku 3.1. Więcej informacji na ten temat można znaleźć w pozycji [1].

Aktorzy działają w obrębie systemu zwanego Actor System opisanego w pozycji [2]. System aktorowy można traktować jako pewną strukturę z zaalokowaną pulą wątków, stworzoną w ramach jednej logicznej aplikacji. Konfiguracją puli wątków zajmuje się Akka. Pewne ustawienia mogą być zmienione w pliku *application.conf*, który jest głównym plikiem konfiguracyjnym systemu aktorowego. System aktorowy zarządza dostępnymi zasobami i może mieć uruchomione miliony aktorów, instancja każdego z aktorów zajmuje około 300 bajtów pamięci.

Akka framework dostarcza wszystkich zalet programowania reaktywnego [27] oraz zapewnia między innymi:

- współbieżność, dzięki zaadaptowaniu modelu aktorowego, programista może zatem skupić się na logice biznesowej zamiast zajmować się problemami współbieżności,
- skalowalność, asynchroniczna komunikacja pomiędzy aktorami dobrze skaluje się w systemach multiprocessorowych,
- odporność na błędy, framework Akka zapożyczył koncept i technologie z języka Erlang, co pozwoliło wykorzystać model *let it crash* [ODNOSNIK] do zapewnienia sprawnego działania systemu i skrócenia jego niedostępności,
- architekturę sterowaną zdarzeniami,
- transakcyjność,
- ujednolicony model programowania dla potrzeb programowania wielowątkowego oraz obliczeń rozproszonych,
- Akka wspiera zarówno API języka Java jak i języka Scala [43].

Zastosowania projektu Akka są bardzo szerokie, można je znaleźć chociażby w następujących dziedzinach:

- analiza danych,
- bankowość inwestycyjna,
- ecommerce,
- symulacje,
- media społecznościowe.

Systemy w których potrzebujemy uzyskać wysoką przepustowość oraz małe opóźnienie są dobrym kandydatem do wykorzystania frameworka Akka [14].

### 3.2.3. Rozszerzenia Akka

#### Akka Cluster

Jest to najbardziej istotne rozszerzenie z punktu widzenia niniejszej pracy. Została na nim oparta komunikacja pomiędzy urządzeniami działającymi w obrębie klastra.

#### TODO's

Członkostwo, gossip, failure detector, seed nodes, Membership Lifecycle, diagram stanów

Dołączanie do klastra.

Opuszczanie klastra, automatic downing.

Subskrybowanie zdarzeń klastra.

Role węzłów.

Failure detector.

Metryki (Sigar) i może wspomnieć o load balancingu na podstawie metryk?

[4, 3]

### Cluster Singleton

Cluster Singleton jest rozszerzeniem projektu Akka zapewniającym jedną instancję aktora danego typu w obrębie klastra lub w obrębie węzłów z wybraną rolą. Został wykorzystany do zaimplementowania modelu master/slave opisanego w poprzednim podrozdziale. Rozszerzenie to dostarcza implementacji menedżera, który pozwala zarządzać instancjonowaniem aktora-singletona. Dostęp do działającej instancji jest możliwy z każdego urządzenia działającego w klastrze i odbywa się przez aktora pośrednika, tzw. proxy [17].

### Distributed Publish Subscribe in Cluster

Kolejne rozszerzenie projektu Akka, które umożliwia komunikację między aktorami bez posiadania informacji na których konkretnie urządzeniach poszczególni aktorzy są uruchomieni, czyli lokacja aktora jest transparentna z punktu widzenia komunikacji. Dostarcza aktora-mediatora który zarządza rejestracją innych aktorów do konkretnych kanałów komunikacji którymi są zainteresowani. Zachowanie to, można porównać z subskrypcją RSS [ODNOSNIK]. Wiadomość opublikowana w danym kanale dotrze do wszystkich aktorów którzy zostali w nim uprzednio zarejestrowani. Rozszerzenie to pozwala również wysłać wiadomość do jednego lub więcej aktorów pasujących do określonego wzorca. W niniejszej pracy zostało wykorzystane do przesyłania wyników zadania do klienta oraz do realizacji migracji populacji w implementacji algorytmów genetycznych [11].

### Akka Persistence

Rozszerzenie Akka persistence pozostała na zapisywanie stanów aktorów w bazie danych. Pozwala to na odtworzenie stanu aplikacji w przypadku awarii i zapewnia w pewnym stopniu niezawodność działania systemu [6]. Dostępnych jest wiele różnych dodatków dedykowanych dla konkretnych implementacji serwerów bazodanowych. W niniejszej pracy wykorzystano dodatek przeznaczony do pracy z bazą MongoDB [7].

### 3.2.4. Raspberry Pi

Do testów platformy stworzonej na potrzeby niniejszej pracy wykorzystano jedno z urządzeń SoC [30] jakim jest Raspberry Pi model B. Jest to urządzenie stworzone przez fundację non-profit oparte na architekturze ARM.

Na rysunku ... przedstawiono schemat urządzenia.

Tabela ... zawiera specyfikację urządzenia.

### 3.2.5. MongoDB

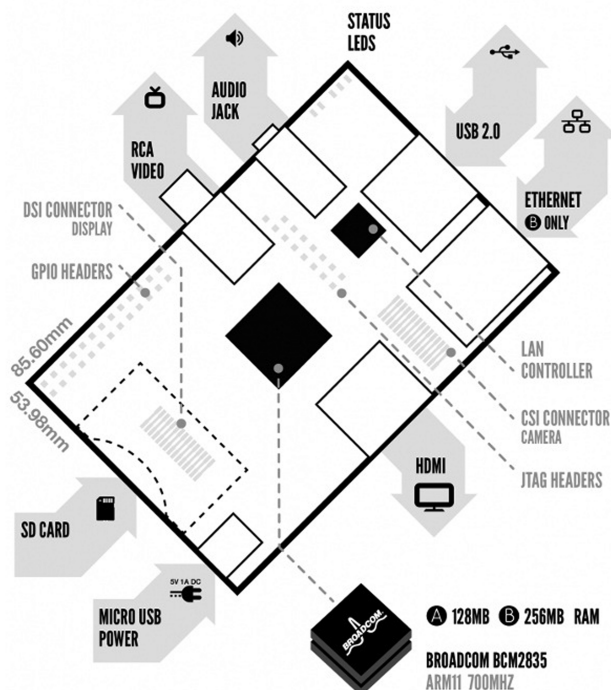
MongoDB jest bazą NoSQL, opartą na dokumentach typu JSON, co pozwala na elastyczność oraz przejrzystość w przechowywaniu danych. Jest to technologia Open Source. Jako, że jest to baza NoSQL posiada ona elastyczny schemat danych. Wspiera replikację oraz sharding [ODNOSNIK] a także map reduce. Technologia ta została wykorzystana ze względu na jej łatwe użycie, dobrą skalowalność oraz wydajność przy wykorzystaniu stosunkowo niewielkich zasobów [13].

Kolejnymi argumentami przemawiającymi na korzyść tej technologii są łatwa dostępność dokumentacji oraz integracja z innymi technologiami wykorzystanymi w niniejszej pracy.

### 3.2.6. Play Framework i AngularJS

Technologie Play framework oraz AngularJS zostały wykorzystane do przygotowania aplikacji webowej będącej interfejsem klienta, dzięki któremu może sterować on działaniem platformy, monitorować ją oraz oglądać wyniki obliczeń.

Play framework jest to technologia server-side, działająca zarówno z językiem Java jak i Scala. Integruje ona komponenty oraz API potrzebne do stworzenia aplikacji webowej. Bazuje on na lekkiej, bezstanowej architekturze, niskim zużyciu zasobów, wysokiej skalowalności oraz programowaniu reak-



Rysunek 3.2: Schemat Raspberry Pi model B

Tablica 3.1: Specyfikacja urządzenia [18]

Parametr	Model B
SoC:	Broadcom BCM2835
CPU:	700 MHz ARM1176JZF-S core
GPU:	Broadcom VideoCore IV, OpenGL ES 2.0, 1080p30 h.264/MPEG-4 AVC high-profile decode
Pamięć:	512 MB (współdzielona przez GPU)
Porty USB 2.0:	2 (za pomocą zintegrowanego koncentratora USB)
Wyjścia wideo:	Composite RCA, HDMI
Wyjścia dźwięku:	3.5 mm jack, HDMI
Nośnik danych:	złącze kart SD / MMC / SDIO
Połączenia sieciowe:	10/100 Ethernet (RJ45)
Pozostałe łącza:	8 x GPIO, UART, szyna I <sup>2</sup> C , szyna SPI z dwoma liniami CS, +3.3 V, +5 V, masa
Zasilanie:	700 mA (3.5 W)
Źródło zasilania:	5 V przy pomocy złącza MicroUSB, ewentualnie za pomocą złącza GPIO
Wymiary	85.60 × 53.98 mm
Obsługiwane systemy operacyjne:	Debian GNU/Linux, Fedora, Arch Linux i wiele z rodziny UNIX

tywnym. Wykorzystuję komunikację protokołu HTTP oraz pozwala na implementację serwisów w technologii REST [ODNOSNIK]. Play framework zapewnia również wsparcie dla technologii WebSocket wykorzystanej w niniejszej pracy oraz łatwą integrację z frameworkiem Akka [16, 50].

AngularJS jest to technologia stworzona z użyciem języka JavaScript i wspierana przez Google. Rozszerza możliwości HTML oraz CSS oraz pozwala tworzyć tzw. SPA (ang. Single Page Applications). W niniejszej pracy wykorzystano ją do prezentowania informacji odebranych z aplikacji serwerowej oraz interakcji z użytkownikiem za pomocą przeglądarki internetowej [12, 41].

### 3.2.7. Wykorzystane szablony

Platforma Typesafe w której skład wchodzi technologie wykorzystane w niniejszej pracy, takie jak Play framework, Akka oraz Scala dostarcza bardzo wyczerpującą dokumentację wraz z wieloma przykładami oraz szablonami na licencji Public Domain.

Rozwiązanie stworzone na potrzeby niniejszej pracy bazowało początkowo na dwóch szablonach, pierwszy zawierał przykład monitoringu urządzeń podłączonych do klastra natomiast drugi dystrybucję zadań pomiędzy urządzeniami [24, 32].

## 3.3. Platforma

Niniejszy podrozdział omawia wybrane aspekty stworzonej platformy, takie jak architektura, protokoły komunikacji oraz odporność na awarię.

### 3.3.1. Architektura (aktorzy?, schematy)

ClusterSingletonManager  
ClusterSingletonProxy [17]  
DistributedPubSubMediator [11]  
Master,  
Worker,  
WorkExecutor,  
MasterWorkerProtocol,  
FrontendActor,  
MetricsActor,  
MonitorActor,

### 3.3.2. Komunikacja (protokół komunikacji, schematy),

Protokół Gossip [25]  
Work Pulling Pattern [34]

### 3.3.3. Fault tolerance i supervision strategy

(choc może wystarczy opis tego w rozdziale poświęconym akka cluster?) [8, 21, 31]



## 4. Zastosowanie w praktyce

Rozdział ten przedstawia sposoby wykorzystania rozwiązania stworzonego na potrzeby niniejszej pracy, jego możliwości oraz wyniki testów.

### 4.1. Użycie

W niniejszym podrozdziale opisano wykorzystanie stworzonej platformy w praktyce, sposób jej użycia oraz zasady działania a także wyniki zaimplementowanych rozwiązań.

#### 4.1.1. Monitoring

Na rysunku 4.1 przedstawiono interfejs klienta prezentujący obecny stan klastra. Wylistowano na nim również listę urządzeń pracujących w klastrze, z uwzględnieniem aktywnego mastera, adresu IP wraz z portami, dostępność urządzenia oraz kilka metryk, m.in. zużycie CPU oraz pamięci RAM.

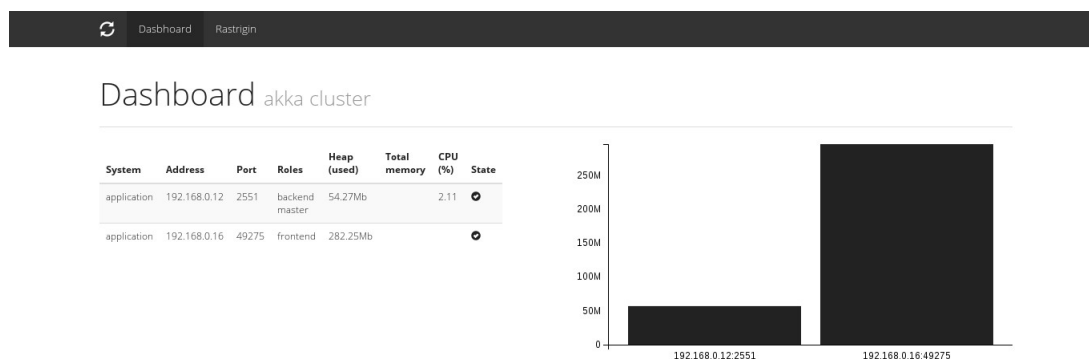
Stan klastra propagowany jest za pomocą protokołu Gossip opisanego w poprzednim rozdziale. Jeżeli jakieś urządzenie nie odpowiada przez określony czas w wyniku np. problemów z siecią, jest ono uznawane jako niedostępne, czyli nie może już przyjmować żadnych zadań ale może jeszcze powrócić do pracy w klastrze jeżeli odzyska sprawność w ciągu najbliższych kilku sekund. Jeżeli nie, w takim przypadku jest ono usuwane z listy urządzeń pracujących w klastrze. Po usunięciu urządzenia z klastra nie może ono dołączyć ponownie do klastra dopóki aplikacja uruchomiona na tym urządzeniu nie zostanie zrestartowana. Pozwala to zapobiec sytuacji, gdy w trakcie problemów z siecią, dane urządzenie odłączy się na chwilę od klastra aktywując własnego mastera a następnie po powrocie do klastra będą aktywne dwa masterzy. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku gdy urządzenie utraci kontakt z pozostałymi urządzeniami, nie może ono z pewnością stwierdzić co było przyczyną awarii i zakłada, że jest jedynym urządzeniem w klastrze. W trakcie awarii urządzenia podczas wykonywania obliczeń dzięki występowaniu migracji opisanej w jednym z kolejnych podrozdziałów nie tracimy wszystkich wyników pracy a jedynie te uzyskane od poprzedniej migracji.

Stan mastera jest zapisywany w bazie danych, co pozwala na jego odtworzenie w przypadku awarii urządzenia z aktywnym masterem. Do bazy danych persystowane są zserializowane zdarzenia zgodnie ze wzorcem Event Sourcing opisanym w pozycjach [19, 20]. Zdarzenia te odzwierciedlają stan przyjętego zadania.

Listę zdarzeń oraz ich opis przedstawiono w tabeli 4.1.

Dla przykładu, jeżeli klient zadał zadanie i zmieniło ono stan na WorkAccepted (czyli zostało zaakceptowane ale nie przesłane jeszcze do żadnego workera) a w tym samym czasie nastąpiła jakaś awaria przerywająca pracę mastera kolejna instancja mastera zostanie aktywowana na innym urządzeniu i odtworzy stan mastera, który uległ awarii, co oznacza, że klient nie będzie musiał ponownie rozpoczynać zadania, lecz jego poprzednio rozpoczęte zadanie zostanie przekazane do realizacji do wolnego workera.

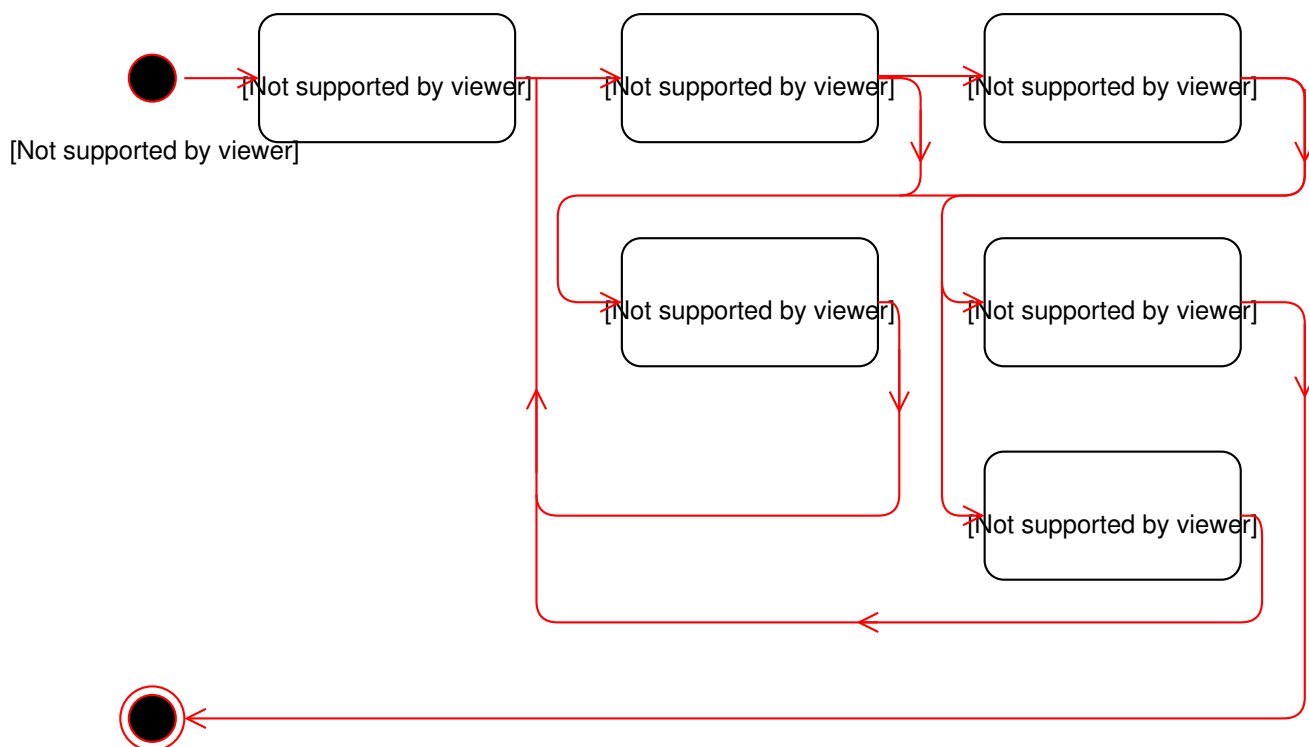
Diagram prezentujący dopuszczalne zmiany stanów zadania przedstawiono na rysunku 4.2.



Rysunek 4.1: Podgląd stanu klastra.

Tablica 4.1: Lista zdarzeń sterujących stanem zadania.

Nazwa stanu	Opis
<b>WorkAccepted</b>	Stan zadania po wysłaniu go przez klienta oraz przyjęciu przez mastera.
<b>WorkStarted</b>	Stan zadania po przyjęciu go przez workera.
<b>WorkInProgress</b>	Stan zadania w trakcie trwania obliczeń, przechowujący częściowe wyniki zadania.
<b>WorkCompleted</b>	Stan zadania po zakończeniu obliczeń, przechowujący końcowe wyniki.
<b>WorkerFailed</b>	Stan zadania zakończonego niepowodzeniem.
<b>WorkerTimedOut</b>	Stan zadania ustawiany jeśli worker pracujący nad danym zadaniem nie odeśle wyników w określonym czasie.



Rysunek 4.2: Przejścia pomiędzy stanami zadania.

#### 4.1.2. Implementacja algorytmów genetycznych

Rozwiązanie stworzone na potrzeby niniejszej pracy przetestowano dzięki zaimplementowaniu algorytmów genetycznych w odmianie wyspowej opisanych w poprzednim rozdziale.

Implementacja ta, została oparta na implementacji algorytmów genetycznych przedstawionej w książce *Scala for Machine Learning* [48] oraz dostosowana do optymalizacji funkcji ciągłej.

**Opisać w jakis sposób została dostosowana, jak wygląda ewolucja (schemat blokowy), populacja, chromosom, gen.**

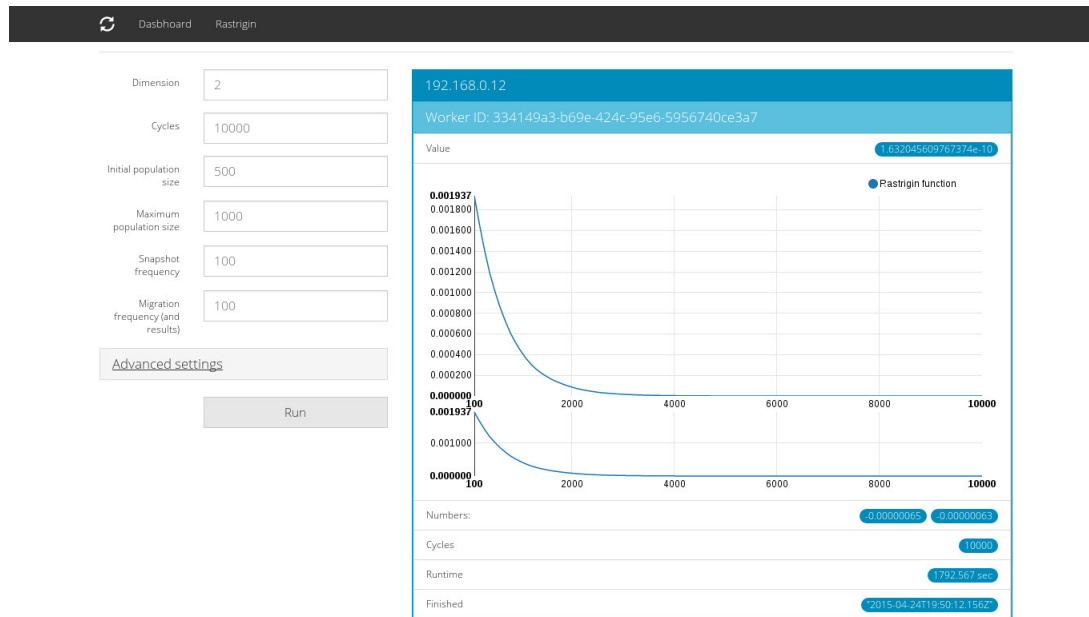
Zadanie jest konfigurowane parametrami przedstawionymi w tabeli 4.1.

Migracja polega na wybraniu pewnej ilości najlepszych osobników populacji oraz wysłaniu ich do innego węzła klastra, odbywa się ona co określoną liczbę cykli konfigurowalną w parametrach zadania. Zaimplementowano dwa rodzaje wyboru węzła do którego wysyłani są migrujący osobniki. Pierwszy to jest wybór losowy węzła a drugi metodą round-robin, czyli wysyłanie migrującej części populacji

Tablica 4.2: Parametry zadania.

Nazwa parametru	Opis
<b>Dimension</b>	Wymiar optymalizowanej funkcji ciągłej.
<b>Cycles</b>	Maksymalna ilość cykli ewolucji.
<b>Initial population size</b>	Początkowy rozmiar populacji (podczas krzyżowania i mutacji liczba osobników populacji zostaje wzrasta).
<b>Maximum population size</b>	Maksymalny rozmiar populacji.
<b>Snapshot frequency</b>	Częstotliwość persystowania wyników obliczeń (w tym przypadku osobników populacji). *
<b>Migration frequency</b>	Częstotliwość występowania migracji. *
<b>Mutation parameter</b>	Parametr mutacji, określa wpływ mutacji na geny.
<b>Migration factor</b>	Procent migrującej populacji.

\* częstotliwość jest określana przez ilość cykli



Rysunek 4.3: Problem Rastrigina.

na zmianę do każdego kolejnego węzła [28]. Migracja odbywa się bez użycia mastera, do jej działania wykorzystano rozszerzenie frameworka Akka o nazwie *Distributed Publish Subscribe in Cluster* opisane w poprzednim rozdziale.

Inicjalizacja populacji odbywa się w każdym węźle klastra osobno. W przypadku problemu Rastrigina opisanego w kolejnym rozdziale, początkowa populacja składa się z osobników zainicjalizowanych losowymi liczbami z przedziału  $[-5.12, 5.12]$ .

Na rysunku ... zaprezentowano wygląd interfejsu użytkownika pozwalającego na podgląd wyników rozpoczętych zadań oraz rozpoczęcie nowych. Widoczne jest tutaj każde urządzenie wykonujące obliczenia, identyfikowane po adresie IP oraz ID workera. Każde zadanie oraz worker identyfikowane są dodatkowo unikalnymi identyfikatorami.

Wyniki prezentowane są w czasie rzeczywistym przy użyciu technologii WebSocket [26]. Dla każdego zadania rysowany jest wykres przedstawiający wartość funkcji Rastrigina zmieniającą się w trakcie trwania ewolucji, czyli w kolejnych cyklach algorytmu. Wykres narysowano za pomocą biblioteki D3.js [10].

### 4.1.3. Problem Rastrigina

Implementacja algorytmów genetycznych opisana w poprzednim podrozdziale została wykorzystana do znalezienia minimum funkcji Rastrigina.

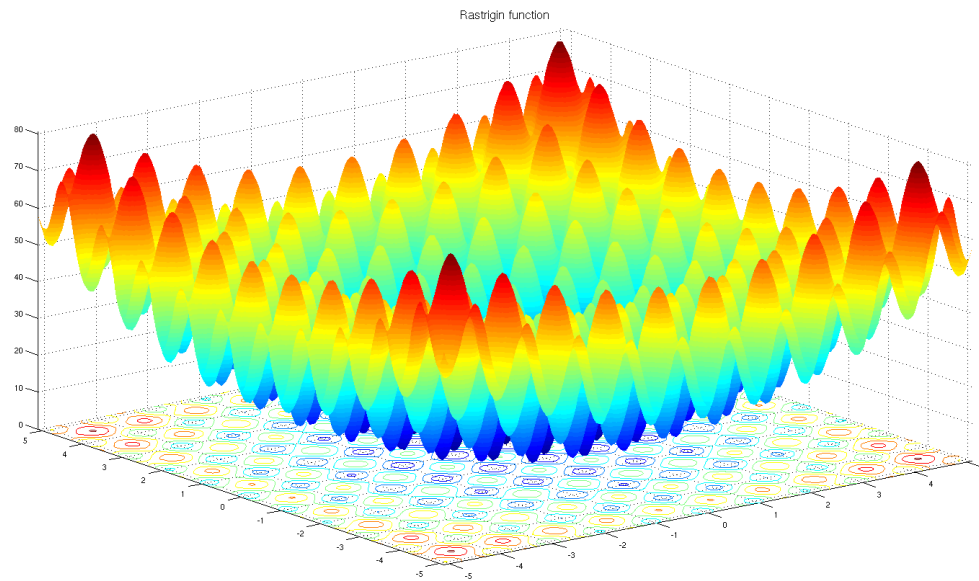
Funkcja Rastrigina jest funkcją niewypukłą. Ze względu na to, że posiada wiele minimów lokalnych oraz jedno globalne dla  $x = 0$ ,  $f(x) = 0$ , bywa trudna w optymalizacji, ponieważ algorytmy optymalizacyjne, mogą utknąć w którymś z lokalnych minimów, tracąc szansę na znalezienie minimum globalnego. Funkcja ta często znajduje zatem zastosowanie jako funkcja testująca algorytmy optymalizacyjne. Została ona również użyta jako problem testowy w niniejszej implementacji algorytmów genetycznych.

Wzór funkcji Rastrigina przedstawiono poniżej

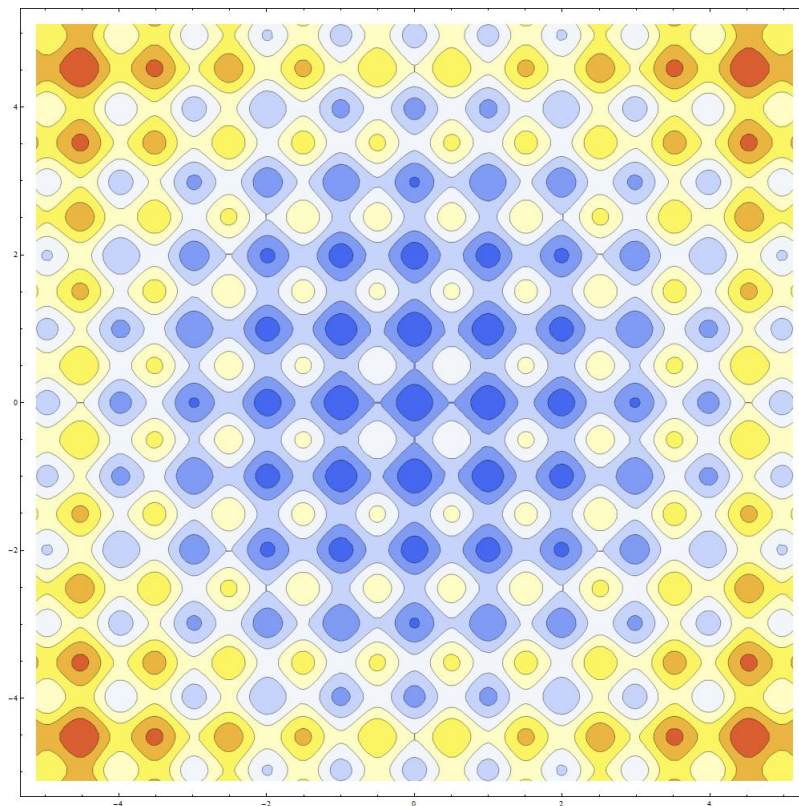
$$f(x) = An + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)], \quad (4.1)$$

gdzie  $A = 10$ ,  $x_i \in [-5.12, 5.12]$  a  $n$  oznacza wymiar funkcji [44].

Wykres funkcji Rastrigina przedstawiono na rysunkach ...



Rysunek 4.4: Wykres funkcji Rastrigina 3D [22].



Rysunek 4.5: Wykres funkcji Rastrigina 2D [22].

#### 4.1.4. Dystrybucja

Do łatwej dystrybucji platformy na inne urządzenia wykorzystano dodatek projektu Akka o nazwie Microkernel oraz rozszerzenie Sbt o nazwie sbt-native-packager.

Akka Microkernel oraz sbt-native-packager dostarczają mechanizmu archiwizowania, dzięki któremu można udostępniać aplikację jako pojedynczy plik, bez potrzeby uruchamiania lub instalowania dodatkowych aplikacji, dostarczania zależności lub ręcznego tworzenia skryptów startowych. Pozwala również na wystartowanie systemu aktorowego używając klasy z metodą statyczną main [5, 29].

Umożliwia to łatwą instalację platformy na różnych urządzeniach klastra. Dzięki temu aby uruchomić platformę na danym urządzeniu wystarczy aby posiadało ono zainstalowany system wraz z wirtualną maszyną Javy oraz archiwum z platformą, które po rozpakowaniu pozwala uruchomić aplikację za pomocą jednego skryptu wykonywalnego. Żadne dodatkowe oprogramowanie nie jest wymagane.

## 4.2. Wyniki testów

Do przeprowadzenia testów zostało wykorzystanych kilka urządzeń Raspberry Pi. Jako problem testowy wykorzystano optymalizację wielowymiarowej funkcji Rastrigina opisanej w poprzednim podrozdziale.

### 4.2.1. Wyniki obliczeń

Ze względu na ograniczoną precyzję obliczeń nie udało się uzyskać wyniku równego poszukiwanemu minimum, czyli  $f(x) = 0$ .

Najlepsze uzyskane wyniki oscylowały w okolicach  $2e - 30$ .

Do obliczeń wykorzystano typ Double, który w języku Scala cechuje się podwójną precyzją, zapisaną na 64 bitach [46].

Na poniższych wykresach przedstawiono wyniki oraz czasy ich uzyskania w zależności od różnych ustawień początkowych zadania.

Rozważono tutaj problem dla jednego urządzenia w celu porównania go z bardziej istotnym przypadkiem dla celów niniejszej pracy a mianowicie wielu urządzeń pracujących w klastrze, który rozważono w następnym podrozdziale poświęconemu skalowalności rozwiązania.

Na rysunku ... przedstawiono wykres wartości funkcji Rastrigina 2D gdzie wsp. mutacji wynosi 0.2 a całkowita ilość cykli 10 000. Aby zwiększyć czytelność wykresu użyto skali logarytmicznej.

Na wykresie uwzględniono również różne maksymalne wielkości populacji, co zaznaczono innym kolorem.

Wykres na rysunku ... pokazuje, że w początkowych cyklach ewolucji populacji gdy osobniki nie są jeszcze dobrze rozwinięci kolejne rozwiązania znajduwane są wolniej. Szybkość znajdowania nowych rozwiązań przyspiesza wraz ze wzrostem ilości cykli oraz wzrostem wielkości populacji.

Na rysunku ... przedstawiono wykres wartości funkcji dla większego wsp. mutacji wynoszącego 0.4.

**TODO** spróbować zmieścić różne współczynniki mutacji na jednym wykresie, z różnymi odcieniami danego koloru a drugi wykres zrobić dla 8 wymiarów.

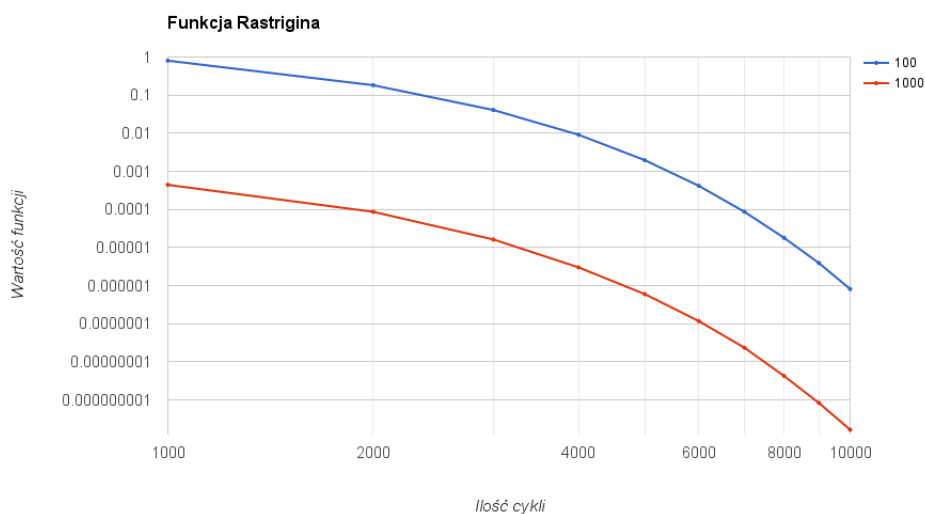
Powtorzyć dla 0.4.

Powtorzyć dla 0.8.

Podsumowując zauważono, że większy współczynnik mutacji przyspiesza znajdowanie rozwiązań.

Podczas przeprowadzania testów w klastrze pracowały dwa typy urządzeń Raspberry Pi, model B oraz B plus, który jest nowszy od modelu B oraz posiada większą ilość zainstalowanej pamięci RAM [18].

Dostępna w urządzeniach pamięć RAM ma dość duży wpływ na czas obliczeń. Czas uzyskiwany przez nowszy model urządzenia, który posiada więcej pamięci był około 30% (**sprawdzić ile dokładnie**) lepszy.



Rysunek 4.6: Całkowity czas wykonania ... Znaleziony punkt ..., wartość funkcji ...

Rysunek 4.7: Całkowity czas wykonania ... Znaleziony punkt ..., wartość funkcji ...

#### 4.2.2. Skalowalność

Kolejnymi dwoma parametrami konfiguracyjnymi zadanie są współczynnik migracji oraz częstość jej występowania.

Mają one bezpośredni wpływ na skalowalność platformy. Współczynnik migracji podawany jest w zakresie 0..100 i oznacza procent migrującej populacji. Natomiast parametr określający częstość występowania migracji wyznacza co ile cykli następuje migracja. Jego wartość może wynosić zero, wtedy migracja nie występuje lub jakiś ułamek maksymalnej liczby cykli.

Bez występowania migracji osobników pomiędzy wyspami (węzłami klastra), teoretycznie mogłaby zaistnieć sytuacja, gdy pomimo pracy kilku urządzeń w klastrze, każde z nich uzyskałoby takie same wyniki w zbliżonym czasie, co oznaczałoby, że równie dobrze, obliczenia mogłyby być przeprowadzane tylko na jednym urządzeniu, bo wzrost liczby urządzeń nie wpłynął znacząco na szybkość znajdujących wyników.

Dzięki zastosowaniu migracji, gdy do klastra zostaje włączone nowe urządzenie i zaczyna wykonywać obliczenia, to po odebraniu osobników migrujących z innej wyspy, którzy z dużym prawdopodobieństwem będą zawierać lepszej jakości rozwiązania aniżeli nowo zainicjalizowani osobnicy na aktualnej wyspie, ewolucja takiej wyspy zostaje przyspieszona. Przy wysokiej częstości migracji oraz dużym procencie migrującej populacji istnieje ryzyko, że wyspy zostaną zdominowane przez osobników o podobnych cechach, co może prowadzić do odnalezienia jedynie lokalnego minimum zamiast minimum globalnego.

**Tutaj chciałbym pokazać jaki jest wpływ migracji oraz jej parametrów na wyniki obliczeń porównując wyniki w poprzedniego podrozdziału uzyskane dla jednego urządzenia..**

Wykres ... Na wykresie przedstawiono innym kolorem różną częstość migracji dla 10% migrującej populacji.

4 urządzenia, 2 wymiary.

4 urządzenia 8 wymiarów.

Powtorzyć dla 20% migrującej populacji.

40%.

### 4.2.3. Wydajność

Średnie zużycie pamięci RAM oraz obciążenie procesora w trakcie wykonywania obliczeń (w zależności od różnych ustawień początkowych) oraz w stanie bezczynności.

### 4.2.4. Narzut komunikacji.

Częstość wykonywania zapisów do bazy, przesyłania wyników częściowych do klienta oraz wpływ wielkości populacji.

Pozostałym parametrem konfigurującym zadanie jest częstość przesyłania wyników częściowych do klienta oraz ich persystencja.

### 4.2.5. Zużycie energii

Tabela przedstawiająca średnie zużycie energii przez kilka modeli Raspberry Pi w trakcie wykonywania obliczeń oraz w stanie bezczynności.

### 4.2.6. Koszty rozbudowy

Krótką analizą kosztów rozbudowy klastra, biorąc pod uwagę ceny urządzeń SoC oraz faktyczny przyrost wydajności uzyskany przy zakupie kolejnego urządzenia.



## **5. Podsumowanie**

W poniższym rozdziale zostało zawarte podsumowanie niniejszej pracy. Opisane zostały wnioski oraz nakreślono możliwości dalszego rozwoju.

### **5.1. Wnioski**

### **5.2. Możliwości rozwoju**

Rozwiązanie stworzone na potrzeby niniejszej pracy posiada kilka ciekawych aspektów, których rozwój mógłby być kontynuowany. W niniejszym podrozdziale zostało opisanych kilka z nich.

#### **5.2.1. Wykorzystanie GPU**

#### **5.2.2. Inne algorytmy (lub modyfikacje algorytmu genetycznego)**

#### **5.2.3. Optymalizacja (systemu, bytecode'u, pod kątem SoC, tuning GC)**

#### **5.2.4. IoT**

## Bibliografia

- [1] Actor references, paths and addresses.
- [2] Actor systems.
- [3] Akka cluster specification.
- [4] Akka cluster usage.
- [5] Akka microkernel.
- [6] Akka persistence.
- [7] Akka persistence mongo.
- [8] Akka remoting.
- [9] Algorytm genetyczny.
- [10] D3.js.
- [11] Distributed publish subscribe in cluster.
- [12] Dokumentacja angularjs.
- [13] Dokumentacja bazy mongodb.
- [14] Dokumentacja frameworka akka dla języka scala.
- [15] Dokumentacja języka scala.
- [16] Dokumentacja play framework dla języka scala.
- [17] Dokumentacja projektu akka cluster singleton.
- [18] Dokumentacja raspberry pi.
- [19] Event sourcing.
- [20] Event sourcing pattern.
- [21] Fault tolerance.
- [22] Funkcja rastrigina.
- [23] Master/slave.
- [24] Play akka cluster sample.
- [25] Protokół gossip.

- [26] Protokół websocket - rfc6455.
- [27] Reactive manifesto.
- [28] Round-robin.
- [29] Sbt native packager plugin.
- [30] Soc.
- [31] Supervision.
- [32] Template akka distributed workers.
- [33] Type safety.
- [34] Work pulling pattern.
- [35] An international journal of computing and informatics. *Informatica*, 23, 1999.
- [36] T. Alexandre. *Scala for Java Developers*. Packt Publishing, 2014.
- [37] K. B. An introduction to cluster computing using mobile nodes. *Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET)*, 2009.
- [38] D. M. Bruce Eckel. *Atomic Scala*. Mindview LLC, Crested Butte, CO, 2013.
- [39] S. J. Cox. Iridis-pi: a low-cost, compact demonstration cluster. *Cluster Computing*, Czerwiec 2014.
- [40] M. Dudek. Badanie efektywności wielopopulacyjnego algorytmu ewolucyjnego. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 2009.
- [41] A. Freeman. *Pro AngularJS*. Apress, 2014.
- [42] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Styczeń 1989.
- [43] M. K. Gupta. *Akka Essentials*. Packt Publishing, 2012.
- [44] D. S. H. Mäzhlenbein and J. Born. The parallel genetic algorithm as function optimizer. *Parallel Computing*, 17:619–632, 1991.
- [45] C. R. Lin. Adaptive clustering for mobile wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006.
- [46] L. S. Martin Odersky and B. Venners. *Programming in Scala, Second Edition*. Artima, Grudzień 2010.
- [47] M. A. M. Mohamed. Cluster computing with mobile nodes: A case study. *Distributed and Object Systems Lab, Department of CS & E, Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India*.
- [48] P. R. Nicolas. *Scala for Machine Learning*. Packt Publishing, Grudzień 2014.
- [49] R.B.Patel and M. Singh. Cluster computing: A mobile code approach. *Department of Computer Engineering, M.M. Engineering College, Mullana-133203, Haryana, India*, 2006.
- [50] J. Richard-Foy. *Play Framework Essentials*. Packt Publishing, 2014.
- [51] D. WHITLEY. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4:65–85, 1994.
- [52] L. Wolf. Droidcluster: Towards smartphone cluster computing - the streets are paved with potential computer clusters. *Technische Universitat Braunschweig, Institute of Operating Systems and Computer Networks*.

## **Dodatek A**

### **.1. Instrukcja uruchomienia platformy**

#### **.1.1. System**

#### **.1.2. Wymagana infrastruktura**

#### **.1.3. Skrypty**

#### **.1.4. Aplikacja**

##### **Moduły**

**Api, model danych**

**Backend**

**Frontend**

**Boot**

**Konfiguracja**

**Uruchomienie**