

## Rozdział 2

# Podstawowy system agentowo-ewolucyjny optymalizacji wielokryterialnej (EMAS)

Idea wykorzystania w konstruowaniu metod obliczeniowych koncepcji wynikających bezpośrednio lub pośrednio z Darwinowskiej teorii ewolucji sięga roku 1948 kiedy to Turing wprowadził koncepcję „genetycznego lub ewolucyjnego wyszukiwania” [116, 118, 132, 208, 19]. Pierwsze praktyczne eksperymenty związane z zastosowaniem tej idei do optymalizacji przez ewolucję z wykorzystaniem komputera sięgają roku 1962 i eksperymentów Bremermanna. W ciągu tychże lat sześćdziesiątych i na początku lat siedemdziesiątych w ramach równolegle prowadzonych niezależnych prac wyodrębniono trzy główne grupy metod obliczeniowych, które zasadały się na wykorzystaniu w procesach obliczeniowych (wybranych) koncepcji i mechanizmów opisanej przez Darwina selekcji naturalnej i realizowanej w ten sposób ewolucji gatunków i ich ciągłego (coraz lepszego) dostosowywania się do (zmieniających się) warunków środowiska.

Metodami tymi były: zaproponowane przez D.J. Fogela, A.J. Owensa i M.J. Walsh programowanie ewolucyjne [118, 121, 122, 132, 208, 19], zaproponowane przez J.H. Hollanda algorytmy genetyczne [118, 143, 144, 132, 208, 19] oraz zaproponowane przez I.Rechenberga i H.P. Schwefela strategie ewolucyjne [118, 241, 132, 208, 19].

Metody te rozwijane były niezależnie aż do początku lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku, kiedy to uznano, iż stanowią one odmienne realizacje i implementacje wspólnej idei, którą zaczęto określać mianem obliczeń (algorytmów) ewolucyjnych [118, 207, 18, 20, 21, 115, 263]. Współcześnie do grupy tej zaliczane są także zaproponowane przez J.Koza metody określane mianem programowania genetycznego [118, 175, 176].

Mimo dużego potencjału drzemiącego w tych metodach oraz wielokrotnego, skutecznego ich stosowania do rozwiązywania trudnych problemów optymalizacji i przeszukiwania [118, 207, 18, 20, 21, 115, 132, 208, 19, 252] – w równie wielu przypadkach metody te nie sprostaly stawianym oczekiwaniom, a uzyskiwane rezultaty nie byly (w pełni) zadowalające. Wśród przyczyn takiego stanu rzeczy wymienić można m.in. [46]:

- scentralizowanie procesu ewolucyjnego, w którym proces selekcji oraz proces generacji nowych pokoleń sterowany jest jednym wspólnym algorytmem;
- ograniczenie podmiotów ewolucji do (układów) genów i pozbawienie ich jakiegokolwiek wpływu na proces ewolucji;

- nieuwzględnienie wśród stosowanych operatorów odpowiedników wszystkich, kluczowych z punktu widzenia ewolucji i zdolności adaptacyjnych organizmów, operacji i procesów obserwowanych w naturze;
- pozbawienie podmiotów ewolucji możliwości pobierania z otaczającego środowiska jakichkolwiek informacji i wiedzy oraz podejmowania na tej podstawie decyzji w celu zrealizowania (własnych) celów i zamierzeń;
- pozbawienie sztucznych systemów ewolucyjnych tak naturalnych i oczywistych własności obserwowanych w przyrodzie struktur biologicznych i społecznych jak: konkurencja, rywalizacja i współzawodnictwo czy kooperacja, współpraca i działania grupowe;
- znaczne zmniejszenie (czy wręcz uniemożliwienie) – z uwagi na ograniczoną liczbę i rodzaj stosowanych operatorów – możliwości definiowania bardziej złożonych (ale i bardziej skutecznych) algorytmów i metod obliczeniowych.

W konsekwencji, w literaturze podnoszony jest argument, iż klasycznie rozumiane algorytmy ewolucyjne przypominają bardziej metody dopasowania parametrów algorytmów do zadanych warunków niż rzeczywiste, twórcze poszukiwanie nowych rozwiązań. Mimo, iż wymienione ograniczenia są przez badaczy zauważane i podnoszone, to jednak stosowane cząstkowe i doraźne ich rozwiązania powodują, iż uzyskane algorytmy są niespójne a realizowany przez nie proces ewolucyjny staje się trudny do zinterpretowania i zanalizowania [46].

Niejako w odpowiedzi na tak definiowane ograniczenia metod ewolucyjnych rozpoczęto prace nad zdefiniowaniem metod obliczeniowych, które z jednej strony wykorzystywałyby idee i koncepcje wzorowane na procesach obserwowanych w naturze, ale które pozbawione byłyby wymienionych ograniczeń i stanowiłyby możliwie pełną analogię do tychże procesów i zjawisk.

Główny nacisk w prowadzonych badaniach położony został na poszukiwanie metod obliczeniowych, które byłyby metodami zdecentralizowanymi, w których globalne coraz lepsze dostosowywanie się populacji do warunków środowiska byłoby wynikiem nie tyle dokonywanych globalnie wyborów najlepszych osobników, lecz realizowanego na poziomie pojedynczego osobnika jego stopniowego dostosowywania się do określonych warunków. Wówczas osobnik stanowiłby nie tylko pasywny przedmiot (procesu) ewolucji, ale jednostkę aktywnie (i twórczo) w tym procesie uczestniczącą.

Oczywiście dążenie do uzyskania modelu obliczeniowego jak najlepiej oddającego procesy i zjawiska naturalne nie stanowiło celu samego w sobie. Przewidywano, iż zdecentralizowane i autonomiczne (sztuczne) systemy ewolucyjne charakteryzować się będą nowymi możliwościami i potencjałem. W wyniku prowadzonych badań zaproponowano koncepcję agentowych metod ewolucyjnych – a zatem metod polegających na wprowadzeniu procesów, zasad i mechanizmów doboru i selekcji naturalnej do populacji (autonomicznych) agentów [99, 47, 102, 166, 94, 219]<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Ograniczenia klasycznie rozumianych metod ewolucyjnych oraz możliwości jakie niesie za sobą zastosowanie operatorów i mechanizmów ewolucji do populacji (autonomicznych) agentów dostrzegane były także przez innych badaczy: [78, 45, 261, 262].

Zaproponowana koncepcja, wśród algorytmów i metod ewolucyjnych, postrzegana winna być jako odrębny nurt pozwalający na zrealizowanie zdefiniowanych postulatów, poprzez wykorzystanie z jednej strony zalet podejść ewolucyjnych, z drugiej zaś zalet podejścia agentowego.

Wypracowany paradygmat obliczeń agentowo-ewolucyjnych odznacza się następującymi, niezwykle istotnymi, z punktu widzenia ograniczeń klasycznych metod ewolucyjnych, cechami [46]:

- w procesie ewolucji i w wynikających z tego procesu przemianach uczestniczą autonomiczni, mogący podejmować decyzje i określone działania agenci a nie bierne, pasywne jednostki globalnie i centralnie sterowanej ewolucji ograniczone i zredukowane do roli (grup) genotypów;
- proces ewolucji ma charakter zdecentralizowany, a uczestniczący w nim agenci mogą tworzyć określone struktury społeczne i realizować określone strategie zachowań, oddziaływań i wzajemnych relacji;
- uczestniczący w procesie ewolucji agenci mogą obserwować środowisko, zachodzące w nim zmiany i podejmować stosownie do tych zmian określone decyzje i działania, co dodatkowo wzbogaca spektrum możliwości konstruowania w oparciu o zaproponowany paradygmat złożonych i skutecznych algorytmów i metod obliczeniowych.

Podsumowując, jak zaznaczono, podstawowym założeniem przyświecającym pracom nad systemami agentowo-ewolucyjnymi była idea zastosowania agenta jako podstawowej jednostki ewolucji a zatem wprowadzenie mechanizmów ewolucyjnych do środowiska agentowego (poddanie procesom ewolucyjnym populacji agentów). Efektem takich zabiegów może być otrzymanie systemu posiadającego zdolność samoczynnej adaptacji do warunków działania zarówno na poziomie poszczególnych komponentów (agentów) jak i ich struktury organizacyjnej [95, 220]. Proces ewolucyjny jest zatem prowadzony (zarządzany) przez populację autonomicznych agentów, reprezentujących jednostki ewolucji (osobniki) lub ich grupy (stada). Opracowana koncepcja posiada wszystkie zalety równoległego algorytmu ewolucyjnego pozwalając jednocześnie na dynamiczną adaptację systemu obliczeniowego do rozwiązywanego problemu [167].

Koncepcja zbudowania systemu, w którym ewoluujący agenci w sposób zdecentralizowany, autonomiczny i asynchroniczny byłoby w stanie coraz lepiej dostosowywać się do zadanych warunków środowiska (a dzięki temu dokonywać coraz lepszych przybliżeń rozwiązania postawionego zadania) wymaga wyposażenia agentów w odpowiednie mechanizmy. Przede wszystkim wymaga to wyposażenia agentów w umiejętność reprodukcji, której powinny towarzyszyć losowe zmiany dziedziczonych przez wygenerowanego agenta cech (mutacje, rekombinacje). Ponadto, koniecznym staje się wprowadzenie mechanizmów eliminacji agentów najgorzej spełniających pewne kryteria związane z realizowanymi zadaniami. Wynikiem tego jest asynchroniczny i zdecentralizowany proces, który, przy właściwym zdefiniowaniu mechanizmów selekcji, prowadzić powinien do samoczynnego osiągnięcia przez system pożądanego w aktualnej sytuacji stanu (konfiguracji).

Ze względu na naturę systemów agentowych oraz autonomię osobników (agentów) w agentowych obliczeniach ewolucyjnych nie jest możliwe wykorzystanie scentralizowanych mechanizmów sterowania przebiegiem procesów ewolucji. Nie jest

również możliwe zastosowanie żadnego ze znanych, z klasycznych algorytmów ewolucyjnych, mechanizmów selekcji. W wyniku prowadzonych badań zaproponowana została koncepcja sterowania procesami ewolucji w systemie wieloagentowym w oparciu o wyczerpywalne zasoby.

Opracowany mechanizm wymiany zasobów pomiędzy agentami oraz pomiędzy agentami a środowiskiem wymaga zdefiniowania w systemie pewnych zasobów, które opisują stan agentów z punktu widzenia ich przydatności w kontekście realizowanego zadania. W większości przypadków, wystarczającym okazało się wykorzystanie jednego zasobu, tzw. energii życiowej. Energia ta niezbędna jest osobnikom do wykonywania wszelkich czynności życiowych takich jak np. reprodukcja czy migracja w środowisku. Energia życiowa może być w posiadaniu zarówno osobników, jak i środowiska, a w konsekwencji dokonywanych w systemie przepływów tego zasobu, osobniki o wyższej wartości funkcji przystosowania otrzymują/gromadzą jej więcej.

Mechanizm ten służy zatem do realizacji procesu selekcji w ewolucyjnych systemach wieloagentowych – bowiem wyłącznie agenci, którym udało się zgromadzić energię życiową w ilości przekraczającej zdefiniowany próg uzyskują prawo do reprodukcji. Podobnie, mechanizm ten pozwala na eliminację ze środowiska agentów najgorzej przystosowanych z punktu widzenia rozwiązywanego zadania – bowiem agenci, których poziom posiadanej energii życiowej spada poniżej zdefiniowanego progu realizują akcję śmierci.

Koncepcja wymiany zasobów umożliwia również pośrednie sterowanie liczebnością populacji poprzez np. zwiększanie lub zmniejszanie dostępnej w systemie ogólnej ilości zasobu. Możliwe jest także pośrednie wpływanie na kierunek procesów ewolucyjnych, powstawanie nowych gatunków czy też podział na podpopulacje (nisze) w wyniku konkurencji o ograniczone zasoby. Koncepcja zasobów i ich wymiany umożliwia również modelowanie szeregu zjawisk biologicznych. Szczególnie istotne jest to, że wpływanie na przebieg procesów ewolucyjnych za pośrednictwem zasobów nie narusza autonomii osobników i zdecentralizowanej natury systemu wieloagentowego.

Podstawową inspiracją leżącą u podstaw prac badawczych nad modelami agentowo-ewolucyjnymi było poszukiwanie metod, które czerpiąc z koncepcji obliczeń ewolucyjnych pozbawione byłyby wad i ograniczeń dotychczas stosowanych tego typu algorytmów i metod. Biorąc pod uwagę przeprowadzane testy i eksperymenty, w wielu zróżnicowanych obszarach zastosowań, stwierdzić z pewnością należy, iż cel ten został osiągnięty, a zastosowanie do rozwiązywania postawionego problemu optymalizacyjnego jednego z wariantów podejścia agentowo-ewolucyjnego, miast jednego z klasycznych (nieagentowych) algorytmów ewolucyjnych, pozwoliło na znaczne zwiększenie efektywności oraz poprawę jakości uzyskiwanych rezultatów [165, 40, 42, 41, 92, 101, 100].

Stwierdzono, iż algorytmy ewolucyjne jako metody populacyjne, przetwarzają i w wyniku swojego działania otrzymują całe zbiory rozwiązań. Jednocześnie jako metody heurystyczne, mogą być stosowane do rozwiązywania problemów przeszukiwania i optymalizacji, dla których nie istnieją metody dokładne i są problemami o nieznanej charakterystyce<sup>2</sup>.

W przypadku ciągłej oraz kombinatorycznej jedno i wielomodalnej optymal-

---

<sup>2</sup>Stwierdzenie to potwierdzone zostało implementacjami kolejnych, wydajnych i efektywnych, ewolucyjnych algorytmów optymalizacji wielokryterialnej (m.in. uważanych powszechnie za referencyjne, omówionych odpowiednio w sekcjach 1.5.1 oraz 1.5.2 algorytmów SPEA2 oraz NSGA-II).

izacji jednokryterialnej, zastąpienie scentralizowanego procesu ewolucyjnego, zastosowanego do grupy osobników zredukowanych do roli reprezentantów materiału genetycznego, koncepcją ewoluujących agentów poprzez wprowadzenie mechanizmów selekcji naturalnej, doboru oraz rekombinacji do populacji autonomicznych agentów działających w sposób zdecentralizowany, rozproszony i rozumianych nie tylko jako pasywni uczestnicy zarządzanego procesu ewolucji, ale jako jego aktywni uczestnicy, zdolni do oddziaływania na siebie i środowisko, obserwowania zmian zachodzących w otaczającej rzeczywistości i podejmowania zależnych od tychże obserwacji działań i decyzji, przyniosło bardzo pozytywne efekty.

W tym kontekście postawiono pytanie: czy możliwe jest uzyskanie podobnych efektów po zastosowaniu paradygmatu obliczeń agentowo-ewolucyjnych do rozwiązywania zadań optymalizacji wielokryterialnej, a zatem, czy możliwe jest skonstruowanie w oparciu o paradygmat obliczeń agentowo-ewolucyjnych wydajnych i efektywnych narzędzi polioptymalizacji w sensie Pareto?

Odpowiedź na tak postawione pytanie stanowi zasadniczą kanwę prac prowadzonych w ramach niniejszej rozprawy. Zgodnie z postawioną we wstępie pracy tezą, odpowiedź ta jest pozytywna. Tzn. zgodnie z uzyskanymi w toku prowadzonych prac (a prezentowanymi w części w podrozdziałach 5.3 oraz 5.4) rezultatami, stwierdzić należy, że w oparciu o paradygmat obliczeń agentowo-ewolucyjnych możliwe jest skonstruowanie technik optymalizacji wielokryterialnej, które nie naruszając zdecentralizowanego modelu ewolucji tych systemów, w przypadku pewnych (klas) problemów, bądź w pewnych warunkach, wykazują się lepszą efektywnością od klasycznych (nieagentowych) ewolucyjnych technik optymalizacji wielokryterialnej.

W dalszej części rozdziału zaprezentowano kolejno: koncepcję (por. podrozdział 2.1) oraz sformalizowane opisy wybranych aspektów (por. podrozdziały 2.2, 2.3, 2.4, 2.5) podstawowego systemu agentowo-ewolucyjnego do optymalizacji wielokryterialnej EMAS.

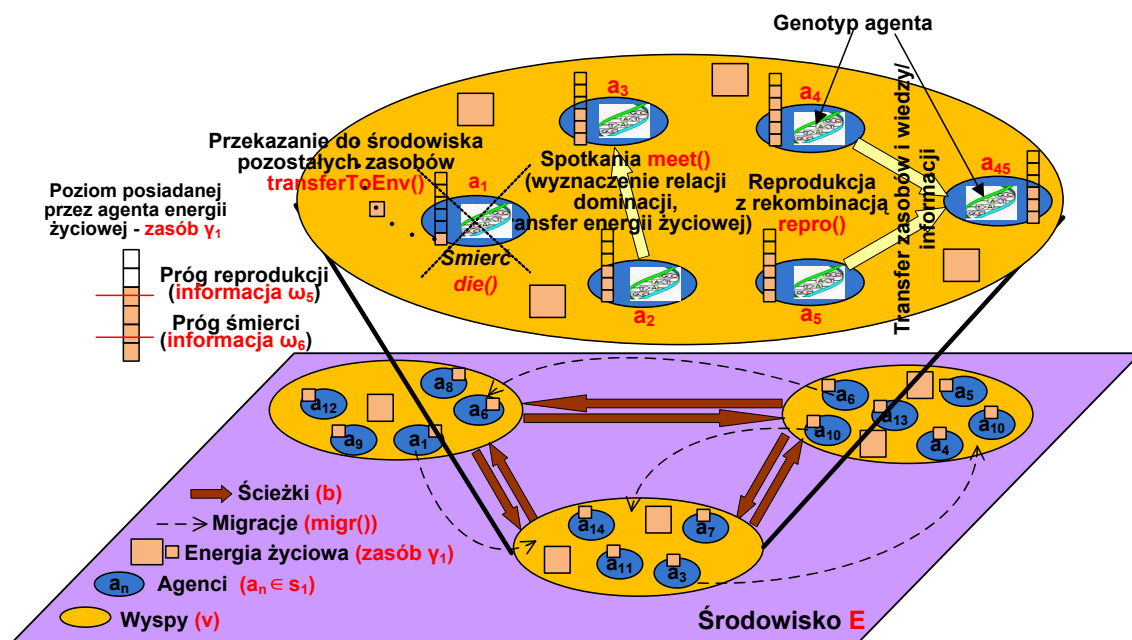
System ten stanowi bezpośrednio dostosowanie paradygmatu obliczeń agentowo-ewolucyjnych do rozwiązywania zadań optymalizacji wielokryterialnej i posłużył jako punkt wyjścia do dalszych modyfikacji i rozszerzeń, a zatem jako baza do zdefiniowania elitarnego systemu agentowo-ewolucyjnego do optymalizacji wielokryterialnej eEMAS (por. rozdział 3), oraz systemu agentowo-ewolucyjnego do optymalizacji wielokryterialnej z ograniczeniami conEMAS (por. rozdział 4).

## 2.1. Koncepcja systemu

W przypadku modelu EMAS (podobnie jak w dalszych, omawianych w ramach niniejszej pracy modelach) przyjmuje się, iż agenci funkcjonują w ramach określonego środowiska.

Przyjętą w modelu EMAS strukturę środowiska zaprezentowano na rysunku 2.1. Jak widać, środowisko to charakteryzuje się określoną topologią: w tym przypadku przyjęto, iż środowisko składa się z (jednorodnych) wysp, pomiędzy którymi istnieje określona struktura połączeń. Każde połączenie to jednokierunkowa ścieżka umożliwiająca agentom przemieszczanie się pomiędzy wyspami. Z każdą ścieżką skojarzona jest wartość (waga ścieżki) reprezentująca „cenę”, jaką każdy agent musi ponieść za przemieszczenie się za jej pośrednictwem. Jak zaznaczono na rysunku 2.1, w podstawowym modelu EMAS przyjęto, iż pomiędzy każdą parą wysp zdefiniowano dwa





Rysunek 2.1. Struktura i zarys koncepcji systemu EMAS

jednokierunkowe połączenia – po jednym dla każdego z kierunków.

W ramach poszczególnych wysp funkcjonują agenci realizując kolejne kroki życia, rozumiane jako ciągi realizowanych przez agentów akcji i strategii (szczegółowo, akcje i strategie dostępne dla agentów modelu EMAS omówiono przedstawiając sformalizowany opis tego modelu – por. odpowiednio podrozdział 2.3 oraz 2.4).

Z każdym agentem skojarzony jest określony (zmieniający się w czasie w kolejnych stanach systemu) poziom energii życiowej, stanowiącej jedyny zasób warunkujący możliwość działania agenta, jego zdolność do przetrwania w środowisku czy możliwość reprodukcji. W wyniku realizowanych działań agent może stracić lub zyskać określoną ilość energii. W systemie zdefiniowano progi energetyczne warunkujące możliwe lub obligatoryjne schematy zachowania agenta w zależności od ilości posiadanej przez niego energii życiowej. W przypadku podstawowego modelu EMAS, określono tzw. (energetyczny) próg śmierci oraz (energetyczny) próg reprodukcji. Jeżeli poziom posiadanej przez agenta energii życiowej spada poniżej progu śmierci agent ginie, a w konsekwencji: przestaje być obecny w populacji, przestaje uczestniczyć w procesach zachodzących w środowisku, nie ma także od tej chwili wpływu na te procesy – innymi słowy, po wykonaniu akcji śmierci, do wykonania której agent zobligowany jest zawsze, ilekroć poziom posiadanej przez niego energii życiowej spada poniżej progu śmierci, jest on usuwany z systemu (por. agent  $a_1$  z rysunku 2.1).

Drugim określonym w podstawowym modelu EMAS progiem energetycznym jest próg reprodukcji. W kolejnych krokach życia agent może podjąć decyzję o realizacji reprodukcji – aby jednak było to możliwe, poziom posiadanej przez agenta energii życiowej musi przewyższać próg reprodukcji. Agent podczas „narodzin” uzyskuje określony początkowy poziom energii życiowej, pochodzącej albo od agentów rodzicielskich (w przypadku realizacji reprodukcji) albo otrzymywany bezpośrednio ze środowiska (np. podczas inicjalizacji systemu). Poziom ten jest oczywiście niższy od

progu reprodukcji i wyższy od progu śmierci.

Istotnym mechanizmem określającym przepływy zasobów pomiędzy agentami modelu EMAS (powodującym zatem, iż agent może uzyskiwać w trakcie swojego życia kolejne ilości zasobów i w konsekwencji uzyskać prawo do reprodukcji, lub też je tracić tak, iż ich poziom może okazać się niższy od zdefiniowanego progu śmierci, w konsekwencji czego agent usuwany jest z systemu) jest mechanizm spotkań (por. także interakcje pomiędzy agentem  $a_2$  i agentem  $a_3$  z rysunku 2.1). W każdym kroku życia agent dokonuje wyboru partnera i wraz z nim realizuje strategię spotkania. W modelu EMAS podstawowym elementem tej strategii (por. także algorytm 2) jest porównanie, z punktu widzenia relacji dominacji, reprezentowanych przez agentów rozwiązań. Jeżeli w wyniku takiego porównania okazuje się, iż jeden z agentów biorących udział w spotkaniu jest dominowany (w sensie słabej relacji dominacji Pareto – por. definicja 1.2) wówczas oddaje on agentowi dominującemu określoną ilość posiadanej przez siebie energii życiowej. W ten sposób, agenci reprezentujący wartościowe, z punktu widzenia postawionego celu optymalizacyjnego, rozwiązania w kolejnych spotkaniach będą (z większym prawdopodobieństwem) okazywali się agentami dominującymi, a zatem (z większym prawdopodobieństwem) będą w konsekwencji otrzymywali kolejne porcje energii życiowej – co w rezultacie doprowadzi do sytuacji, w której agent zgromadzi taką ilość energii życiowej, która przewyższać będzie zdefiniowany próg reprodukcji, dzięki czemu będzie on mógł rozpocząć realizację aktywności związanych z reprodukcją. Takie zachowanie agenta, biorąc pod uwagę jego jakość, będzie korzystne także dla całej populacji z punktu widzenia zbieżności do rozwiązania postawionego problemu – oczekuje się bowiem, że agenci powstałi w wyniku reprodukcji (realizowanej przecież przez agentów, którzy byli w stanie zgromadzić wystarczającą ku temu ilość energii – a zatem w toku kolejnych spotkań musieli oni okazać się reprezentantami lepszych rozwiązań niż spotykani przez nich inni agenci) mogą reprezentować (jeszcze) bardziej wartościowy element poszukiwanego rozwiązania.

Innymi słowy, agenci dominujący, w rozumieniu słabej relacji dominacji, z punktu widzenia optymalizowanego problemu będą uzyskiwali energię życiową od agentów słabszych, będą zatem uzyskiwali prawo do reprodukcji, w wyniku której mogą zostać wytworzeni agenci stanowiący jeszcze lepsze (elementy) przybliżenia poszukiwanego rozwiązania. W takim przypadku, agenci ci ponownie będą częściej dominowali spotykanych agentów, w konsekwencji będą uzyskiwali od dominowanych partnerów kolejne kwanty energii, a zatem uzyskają prawo do reprodukcji, w wyniku której może powstać agent o jeszcze lepszym przystosowaniu etc.

Oczywiście mechanizm ten powoduje określone (negatywne) lustrzane konsekwencje dla agentów zdominowanych. Jeśli agent reprezentuje z punktu widzenia postawionego problemu rozwiązanie mało wartościowe, w kolejnych spotkaniach będzie się on okazywał agentem zdominowanym, a zatem będzie zmuszony do oddawania w kolejnych spotkaniach określonych kwantów energii. W konsekwencji, poziom posiadanej przez niego energii życiowej może spaść poniżej progu śmierci, co spowoduje jego wyeliminowanie z populacji.

W modelu EMAS agent może otrzymać/uzyskać energię w następujących sytuacjach:

- wszyscy tworzeni przez środowisko – na etapie inicjalizacji systemu, bądź później w trakcie jego działania – agenci otrzymują określoną ilość zasobu

bezpośrednio ze środowiska;

- agent tworzony w systemie w wyniku reprodukcji uzyskuje określony poziom energii życiowej, w wyniku jej transferu od agentów rodzicielskich (por. algorytm 3 oraz rysunek 2.1);
- agent uzyskuje określoną ilość energii od innego agenta przy okazji spotkań realizowanych w każdym kroku życia, jeśli tylko agent ten dominuje (w sensie relacji dominacji) spotkanego agenta (por. algorytm 2 oraz rysunek 2.1).

W podstawowym modelu EMAS agent traci energię życiową w następujących sytuacjach:

- w wyniku realizacji reprodukcji agent przekazuje część posiadanej przez siebie energii do wykreowanego agenta potomnego (wykreowanych agentów potomnych) (por. algorytm 3 oraz rysunek 2.1);
- jeśli w trakcie realizacji spotkania agent jest zdominowany przez partnera spotkania, wówczas transferuje do niego część posiadanej przez siebie energii życiowej (por. algorytm 2 oraz rysunek 2.1);
- w wyniku realizacji migracji pomiędzy wyspami agent przekazuje do środowiska energię życiową w ilości równej wadze przypisanej do ścieżki, przy użyciu której agent migracji tej dokonuje (por. algorytm 1). Mechanizm migracji omówiony będzie szerzej w dalszej części pracy (w szczególności por. omówienie modelu eEMAS).

Należy zauważyć, że wzajemne relacje pomiędzy określonymi progami energetycznymi, definiują niejako poziom tolerancyjności, bądź też restrykcyjności środowiska (systemu) wobec agentów, którzy okazali się agentami zdominowanymi. Można zatem powiedzieć, iż zdefiniowany mechanizm to nie tylko realizacja rozproszonego i zdecentralizowanego ale także tzw. miękkiego procesu selekcji, w konsekwencji którego agenci, którzy okazali się być agentami zdominowanymi nadal mogą pozostać w systemie dając nadzieję na to, iż mogą być oni potencjalnie protoplastami bardzo wartościowych rozwiązań. Co równie istotne, z punktu widzenia prezentowanych w podrozdziałach 5.3 oraz 5.4 rezultatów przeprowadzonych badań eksperymentalnych, może okazać się, iż (niektórzy) agenci zdominowani zostali wyłącznie w wyniku zmieniających się warunków środowiska (jego zaszumienia). Po wyeliminowaniu bądź ustaniu zaburzeń, agenci ci okazać się mogą reprezentantami bardzo wartościowych rozwiązań (bądź też ogniwami prowadzącymi do ich uzyskania).

Podstawowy, realizowany cyklicznie, od narodzin aż do zakończenia działania systemu, bądź też śmierci agenta, krok jego życia, w modelu EMAS składa się z czterech elementów (por. algorytm 4):

- weryfikacji poziomu posiadanej przez agenta energii życiowej i w razie takiej konieczności realizacji akcji śmierci;
- realizacji migracji pomiędzy wyspami środowiska (i w konsekwencji przekazania określonej ilości energii życiowej do środowiska);



- realizacji spotkań z innymi agentami (i w konsekwencji transferowaniu pomiędzy nimi energii życiowej);
- realizacji reprodukcji (i w konsekwencji transferowaniu do osobników potomnych informacji oraz zasobów).

Jak stwierdzono wcześniej, realizacja akcji śmierci następuje „niezależnie” od woli agenta zawsze, ilekroć poziom posiadanej przez niego energii życiowej spada poniżej progu śmierci (por. algorytm 4 oraz agent  $a_1$  z rysunku 2.1).

Podobnie, w każdym kroku życia (por. algorytm 4), agenci mogą podjąć decyzje związane z realizacją migracji do innej wyspy środowiska. W podstawowym modelu EMAS decyzja taka podejmowana jest w sposób losowy, bez analizowania przez agentów dodatkowych uwarunkowań. W modelu tym, także wybór wyspy docelowej odbywa się poprzez wskazanie dowolnej, losowo wybranej wyspy spośród wszystkich wysp, do których zgodnie z przyjętą topologią środowiska agent może migrować (istnieją w systemie odpowiednie ścieżki) znajdując się w określonej wyspie.

Kolejną, realizowaną w każdym kroku życia aktywnością agenta jest realizacja spotkań z innymi agentami. Jak wspomniano, spotkania te stanowią podstawowy element warunkujący i definiujący przepływy zasobów życiowych pomiędzy agentami, a w konsekwencji, jest to podstawowy element wskazywania w środowisku agentów lepszych i gorszych (z punktu widzenia rozwiązywanego problemu).

W modelu EMAS, wybór agenta jako partnera spotkania odbywa się w sposób losowy: agent przystępujący do realizacji strategii spotkań wskazuje spośród wszystkich agentów zlokalizowanych w określonym stanie systemu na tej samej wyspie (węźle) środowiska, losowo wybranego agenta określając go jako (potencjalnego) partnera spotkania. Wskazany agent, staje się rzeczywistym partnerem spotkania po zaakceptowaniu otrzymanego żądania/prośby współuczestniczenia w spotkaniu. W modelu EMAS przyjęto, iż żądania związane z realizacją spotkań agent akceptuje zawsze i bezwarunkowo (por. akcja *acceptMeet()* modelu formalnego EMAS – podrozdział 2.3).

Ostatnią, inicjowaną w każdym kroku życia przez agenta modelu EMAS, aktywnością (por. algorytm 4) jest realizacja strategii reprodukcji. Szczegółowo, aktywność ta omówiona została w podrozdziale 2.4 jako realizacja strategii *repro()* – por. algorytm 3.

Jak zostało wcześniej zaznaczone, agent modelu EMAS może przystąpić do realizacji reprodukcji wyłącznie, jeśli poziom posiadanej przez niego w danej chwili energii życiowej przewyższa próg reprodukcji. Wybór partnera reprodukcji odbywa się w sposób losowy spośród wszystkich agentów zlokalizowanych na tej samej wyspie (węźle środowiska). Wskazany agent może zaakceptować wybór, o ile poziom posiadanej także przez niego energii życiowej przewyższa próg reprodukcji.

W wyniku reprodukcji tworzeni są dwaj agenci potomni. Utworzeni potomkowie otrzymują od rodziców zasoby życiowe, a ponadto, poza materiałem genetycznym, odziedziczają oni po rodzicach informacje/wiedzę o środowisku, wiedzę o populacji oraz o zasadach i warunkach (prze)życia w danym środowisku. Innymi słowy, osobniki potomne korzystają z wiedzy i doświadczenia zgromadzonego (przez pokolenia) przez rodziców (przodków), a zatem zyskują wiedzę o tym, kiedy mogą/warto podjąć decyzję o realizacji strategii związanych z reprodukcją, kiedy należy podjąć decyzję związaną z realizacją akcji śmierci, czy wreszcie, co to oznacza, że warunki

w określonym środowisku (określonej wyspie) są niesprzyjające i należy podjąć decyzję o migracji do innego środowiska (innej wyspy).

Poza aktywnościami inicjowanymi przez agenta w każdym kroku życia, może przejawiać on aktywności wynikające z otrzymania żądań współuczestniczenia w aktywnościach inicjowanych przez innych agentów.

W przypadku ogólnym, występujący w systemie agenci mogą reprezentować różne gatunki, a w ramach tych gatunków różne płcie, a schemat zachowania agenta może zależeć (być warunkowany) przynależnością do określonego gatunku czy płci. W podstawowym modelu EMAS przyjęto, iż wszyscy agenci reprezentują ten sam gatunek oraz tę samą płć, a w konsekwencji przejawiane przez agentów możliwe aktywności oraz schemat ich realizacji są jednorodne dla wszystkich agentów występujących w tym modelu<sup>3</sup>.

Jak wspomniano, przy okazji realizacji niektórych aktywności (np. migracje, śmierć), agenci oddają (w części) posiadane zasoby (energię życiową) do (wyspy/węzła) środowiska. Jeżeli w węźle zgromadzone zostaną wystarczające ilości zasobów, węzeł ten tworzy nowego agenta uzbrajając go w materiał genetyczny (losowo) oraz zasoby (zdefiniowane w systemie wartości początkowe) tak, jak ma to miejsce na etapie inicjalizacji systemu.

Sformalizowany opis podstawowego modelu EMAS – struktury jego środowiska, obecnych w nim zasobów, informacji, rodzajów agentów oraz dostępnych i realizowanych przez nich aktywności, a także realizowany cyklicznie krok życia agentów modelu EMAS, ich procesy życiowe, czy wreszcie przyjęty schemat działania całego systemu przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

## 2.2. Model architektury systemu

System EMAS może zostać opisany następująco:

$$EMAS = \langle E, S \rangle \quad (2.1)$$

gdzie:

- $E$  – środowisko systemu EMAS;
- $S = \langle s_1, \dots, s_J \rangle$  – gatunki agentów ewoluujących w środowisku EMAS.

Środowisko określane jest topologią definiowaną poprzez graf skierowany z funkcją kosztu, związaną z każdą krawędzią grafu. a zatem:

$$E = \langle V, B \rangle \quad (2.2)$$

gdzie:

- $V$  – zbiór wierzchołków grafu (wysp środowiska);

---

<sup>3</sup>Mimo, iż w podstawowym modelu EMAS wszyscy agenci reprezentują ten sam gatunek oraz tę samą płć, aby nie utracić ogólności rozważań i dochować spójności konstrukcji modelu formalnego dla wszystkich omawianych systemów, na poziomie opisu formalnego modelu EMAS prezentowanego w podrozdziałach 2.2 do 2.5 wyraźnie uwzględniono obecność w systemie gatunków i płci agentów.

- $B$  – zbiór krawędzi grafu.

Zbiór krawędzi  $B$  definiowany jest następująco:

$$B = \{\langle u, v, c \rangle : u, v \in V \wedge u \neq v \wedge c \in \mathbb{R}^+ \cup \{0\}\} \quad (2.3)$$

gdzie:

- $u, v$  – węzły grafu;
- $c$  – wspomniany nieujemny koszt/waga związana z krawędzią grafu.

Odległość pomiędzy dwoma węzłami (dwoma wyspami) definiowana jest jako długość najkrótszej ścieżki pomiędzy nimi w danym grafie topologii środowiska.

Wierzchołek grafu (wyspa środowiska)  $v \in V$  definiowany jest jako trójka:

$$v = \langle A^v, \Gamma^v, \Omega^v \rangle \quad (2.4)$$

gdzie:

- $A^v$  – zbiór agentów zlokalizowanych w węźle  $v$ ;
- $\Gamma^v$  – zasoby dostępne w węźle  $v$ ;
- $\Omega^v$  – informacje dostępne (dla agentów) w węźle  $v$ . W podstawowym modelu EMAS,  $\Omega^v = \langle \omega_1^v, \omega_2^v \rangle$ , co oznacza, że agenci mogą uzyskać z węzła  $v$  grafu (w którym aktualnie się znajdują) dwa typy informacji: listę wszystkich węzłów powiązanych z węzłem  $v$  (informacja  $\omega_1^v$ ), listę wszystkich agentów zlokalizowanych w węźle  $v$  (informacja  $\omega_2^v$ ), a zatem:

$$\omega_1^v = \{u : u \in V \wedge \langle v, u, c \rangle \in B\} \quad (2.5)$$

oraz

$$\omega_2^v = \{a : a \in A^v\} \quad (2.6)$$

Agenci migrują pomiędzy węzłami, realizując akcję śmierci, są wprowadzani do systemu poprzez realizację reprodukcji bądź przez środowisko w ramach dostępnych zasobów. Dlatego też „obsada” węzłów/wysp środowiska – czyli zbiór  $A^v$  – jest elementem dynamicznym, określanym jednoznacznie w chwili  $t$ .

W konsekwencji, elementem dynamicznym (zmiennym w czasie) jest także zawartość informacji  $\Omega^v$  dostępnych w węźle (w szczególności zmienia się zawartość informacji  $\omega_2^v$ ). Wreszcie, w wyniku akcji agentów (śmierci, migracji) zmienne w czasie są także ilości zasobów ( $\Gamma^v$ ) dostępnych w węźle w danej chwili  $t$ .

Tak więc, wszystkie trzy elementy definicji (2.4) są elementami dynamicznymi, określanymi jednoznacznie w chwili  $t$ . Elementy te określają zatem stan węzła w chwili  $t$ , a w konsekwencji stan środowiska  $E$  oraz stan całego systemu EMAS w chwili  $t$ .

W ramach niniejszego oraz kolejnych podrozdziałów mimo, iż przedstawiony model definiuje stan systemu w danej chwili  $t$ , z uwagi na czytelność zapisu, zrezygnowano z indeksowania elementów modelu zmienną czasu  $t$ . Wyjątek stanowią przypadki, gdy było to niezbędne do zdefiniowania relacji czasowych pomiędzy elementami modelu.

Gatunki systemu EMAS (w podstawowym modelu EMAS występuje jeden gatunek agentów  $s_1$ , a zatem  $J = 1$  oraz  $S = \langle s_1 \rangle$ )<sup>4</sup> definiowane są jako trójka:

$$s_j = \langle X^{s_j}, Z^{s_j}, \Theta^{s_j} \rangle \quad (2.7)$$

gdzie:

- $X^{s_j} = \langle x_1, \dots, x_K \rangle$  – płcie wyróżniane w ramach gatunku agentów  $s_j$ ;
- $Z^{s_j}$  – zbiór akcji dostępnych dla agentów z gatunku  $s_j$ ;
- $\Theta^{s_j}$  – zbiór strategii, które mogą być realizowane przez agentów gatunku  $s_j$ .

Płcie, w podstawowym modelu EMAS definiowane są jako trójka<sup>5</sup>:

$$x_k = \langle A^{x_k}, Z^{x_k}, \Theta^{x_k} \rangle \quad (2.8)$$

gdzie:

- $A^{x_k} = \{a_1, \dots, a_\Lambda\}$  – zbiór agentów należących do płci  $x_k$  gatunku  $s_j$ ;
- $Z^{x_k}$  – zbiór akcji dostępnych dla agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$ . W modelu EMAS  $Z^{x_k} = Z^{s_j}$ , a zatem zbiór akcji dostępnych dla agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  jest tożsamy i ograniczony do akcji dostępnych dla gatunku  $s_j$ . Jak widać, na poziomie płci agentów w modelu EMAS nie są wprowadzane żadne dodatkowe akcje, a zatem zbiór akcji charakterystycznych  $\hat{Z}^{x_k}$  dostępnych wyłącznie dla agentów płci  $x_k$  w ramach gatunku  $s_j$  jest zbiorem pustym:  $\hat{Z}^{x_k} = \emptyset$ ;
- $\Theta^{x_k}$  – zbiór strategii, które mogą być realizowane przez agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$ . Podobnie jak w przypadku akcji, w modelu EMAS,  $\Theta^{x_k} = \Theta^{s_j}$ , czyli zbiór strategii dostępnych dla agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  jest tożsamy i ograniczony do zbioru strategii dostępnych dla gatunku  $s_j$ , nie wprowadzając odrębnych strategii na poziomie płci agentów. w konsekwencji zbiór strategii charakterystycznych  $\hat{\Theta}^{x_k}$  dostępnych wyłącznie dla agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  jest zbiorem pustym:  $\hat{\Theta}^{x_k} = \emptyset$ .

Agent  $a$  definiowany jest jako piątka:

$$a = \langle Gn^a, \Gamma^a, \Omega^a, Z^a, \Theta^a \rangle \quad (2.9)$$

gdzie:

- $Gn^a$  – genotyp agenta  $a$ . Przyjęto, iż schemat kodowania genotypu nie jest integralną częścią modelu EMAS, pozostawiając użytkownikowi możliwość zastosowania różnorodnych jego realizacji;
- $\Gamma^a$  – zasoby posiadane i wykorzystywane przez agenta  $a$ ;

<sup>4</sup>Mimo, iż w systemie EMAS występuje jeden gatunek agentów, z uwagi na chęć zachowania spójności z pozostałymi modelami prezentowanymi w dalszej części pracy, zdecydowano się na wyraźne wyróżnienie gatunku agenta także w modelu EMAS.

<sup>5</sup>Mimo, iż w systemie EMAS występuje jedna płeć agentów, z uwagi na chęć zachowania spójności z pozostałymi modelami prezentowanymi w dalszej części pracy, zdecydowano się na wyraźne wyróżnienie płci agenta także w modelu EMAS.

- $\Omega^a$  – informacje posiadane i wykorzystywane przez agenta podczas realizacji przez niego określonych akcji czy strategii;
- $Z^a$  – zbiór akcji dostępnych dla agenta  $a$ . W modelu EMAS zbiór akcji agenta  $a$  należącego do płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  jest tożsamy ze zbiorem akcji dostępnych dla wszystkich agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  – innymi słowy, w modelu EMAS na poziomie agenta nie są wprowadzane żadne specyficzne dla niego akcje, a zatem  $Z^a = Z^{x_k}$ , zaś zbiór akcji charakterystycznych  $\hat{Z}^a$  dostępnych wyłącznie dla agenta  $a$ , w ramach reprezentowanej przez niego płci, jest zbiorem pustym:  $\hat{Z}^a = \emptyset$ ;
- $\Theta^a$  – zbiór (składających się z akcji) strategii realizowanych przez agenta  $a$ . W modelu EMAS zbiór strategii  $\Theta^a$  dostępnych dla agenta  $a$  płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  jest tożsamy i ograniczony do zbioru strategii dostępnych dla wszystkich agentów płci  $x_k$  gatunku  $s_j$  – innymi słowy, agent  $a$  nie dysponuje żadnymi specyficznymi i dostępnymi wyłącznie dla niego strategiami, a zatem  $\Theta^a = \Theta^{x_k}$ , zaś zbiór strategii charakterystycznych  $\hat{\Theta}^a$  dostępnych wyłącznie dla agenta  $a$ , w ramach reprezentowanej przez niego płci, jest zbiorem pustym:  $\hat{\Theta}^a = \emptyset$ .

W systemie EMAS występuje jeden zasób – jest to tak zwana energia życiowa (ang. *life energy*) –  $\gamma_1$ . W konsekwencji, zarówno dowolny węzeł topologii środowiska  $v$ , jak i dowolny agent  $a$  systemu EMAS może posiadać (i w przypadku agenta wykorzystywać) także wyłącznie zasób  $\gamma_1$ . A zatem:

$$\Gamma^v = \langle \gamma_1^v \rangle \wedge \Gamma^a = \langle \gamma_1^a \rangle \quad (2.10)$$

gdzie:

- $\gamma_1^v$  – energia życiowa posiadana (w danej chwili) przez węzeł  $v$  środowiska;
- $\gamma_1^a$  – energia życiowa posiadana (w danej chwili) przez agenta  $a$ .

Dla agenta  $a$ , posiadanie lub brak zasobu  $\gamma_1^a$  (w określonej ilości) warunkuje jego możliwe aktywności w danym momencie czasu.

W podstawowym, przyjętym jako punkt odniesienia, modelu EMAS, dla każdego agenta  $a$  dostępnych jest osiem ( $M = 8$ ) informacji:

$$\Omega^a = \langle \omega_1^a, \omega_2^a, \dots, \omega_8^a \rangle \quad (2.11)$$

Poszczególne informacje definiowane są następująco:

- $\omega_1^a$  – węzły, do których agent  $a$  może migrować w określonym stanie systemu;
- $\omega_2^a$  – informacja o innych agentach zlokalizowanych w danej chwili (danym stanie systemu) w tym samym węźle środowiska (wyspie), co agent  $a$ ;
- $\omega_3^a$  – informacja o gatunku, do którego przynależy agent  $a$ ;
- $\omega_4^a$  – informacja o płci agenta  $a$ ;
- $\omega_5^a$  – próg reprodukcji. Agent  $a$  może podjąć decyzję o reprodukcji, jeśli poziom jego energii życiowej – zasób  $\gamma_1$  przekracza poziom progu reprodukcji, którego wartość dostępna jest jako informacja  $\omega_5^a$ ;



- $\omega_6^a$  – próg śmierci. Agent  $a$  umiera, jeśli poziom jego energii życiowej spada poniżej lub zrównuje się z progiem śmierci. Wartość progu śmierci dostępna jest dla agenta  $a$  jako informacja  $\omega_6^a$ ;
- $\omega_7^a$  – informacja na temat początkowego (otrzymywanego przez nowo utworzonego agenta) poziomu energii życiowej. Jednocześnie informacja ta definiuje, ile zasobów osobniki rodzicielskie powinny przekazać osobnikom potomnym podczas realizacji strategii reprodukcji;
- $\omega_8^a$  – informacja odnośnie ilości energii życiowej, która – bądź której wielokrotność – transferowana jest pomiędzy agentami, lub pomiędzy agentami a środowiskiem, podczas realizacji wybranych strategii czy akcji (w szczególności strategii spotkań).

### 2.3. Akcje agentów

Kluczowym elementem definiującym możliwe zachowania agentów są dostępne dla agentów akcje oraz strategie. Akcje mogą być postrzegane jako aktywności „atomowe” realizowane niezależne od „woli” agenta, podczas gdy strategie to bardziej złożone aktywności, składające się z ciągów akcji oraz elementów decyzyjnych warunkujących (w zależności od woli agenta) zakres i charakter realizowanej strategii.

Zbiór akcji  $Z^{s_1}$  dostępnych dla agentów gatunku  $s_1$  podstawowego modelu EMAS definiowany jest następująco:

$$Z^{s_1} = \{die, transfer, transferToEnv, create, mut, move, checkDomination, seekMeet, seekRepro, seekMigr, acceptMeet, acceptRepro\} \quad (2.12)$$

Podczas definiowania akcji oraz strategii, w dalszej części rozważań, jeżeli nie wyspecyfikowano inaczej, przyjęto, iż:  $a_i$  to dowolny agent płci  $x_1$ , gatunku  $s_1$  modelu EMAS definiowany następująco:

$$a_i = \langle Gn^{a_i}, \Gamma^{a_i}, \Omega^{a_i}, Z^{a_i}, \Theta^{a_i} \rangle$$

gdzie:

- $Gn^{a_i} = [gn_1^{a_i}, \dots, gn_G^{a_i}]$  – genotyp agenta  $a_i$ ;
- $\Gamma^{a_i} = \langle \gamma_1^{a_i} \rangle$  – zasoby agenta  $a_i$ ;
- $\Omega^{a_i} = \langle \omega_1^{a_i}, \omega_2^{a_i}, \dots, \omega_8^{a_i} \rangle$  – informacje posiadane przez agenta  $a_i$ ;
- $Z^{a_i} = Z^{x_1} = Z^{s_1}$  – zbiór akcji dostępnych dla agenta  $a_i$ ;
- $\Theta^{a_i} = \Theta^{x_1} = \Theta^{s_1}$  – zbiór strategii dostępnych dla agenta  $a_i$ .

Indeks  $i$  w powyższych równaniach użyty został w celu rozróżnienia agentów biorących udział w realizacji określonej akcji czy strategii, nie zaś w celu wskazania określonych agentów występujących w systemie. Ponieważ akcje i strategie definiowane poniżej są akcjami i strategiami, w której biorą udział jeden lub dwaj agenci należy przyjąć, iż  $i = \{1, 2\}$ .

Przy powyższych oznaczeniach i założeniach, poniżej przedstawiona została formalna specyfikacja dostępnych dla agentów, w podstawowym modelu EMAS, akcji (elementów zbioru  $Z^{s_1}$  – por. równanie (2.12)):

- *die* – oznacza akcję śmierci agenta. Formalnie akcja  $die(a_1)$  agenta  $a_1$  może zostać zapisana jako:  $die(a_1) \Rightarrow \{\{A^1\} \rightarrow \{A^1\} \setminus \{a_1\}; \{A^u\} \rightarrow \{A^u\} \setminus \{a_1\}\}$ , gdzie:  $A^1$  to zbiór agentów płci  $x_1$  gatunku  $s_1$ , zaś  $A^u$  to zbiór agentów zlokalizowanych w tym samym węźle topologii środowiska co agent  $a_1$ ;
- *transfer* – akcja ta umożliwia agentom transfer zasobów pomiędzy sobą. Rozważając agentów  $a_1, a_2$  oraz określoną ilość  $\Delta\gamma_n$  wykorzystywanego przez agentów  $a_1, a_2$  zasobu  $\gamma_n$  (ponieważ w tym miejscu definiowane są akcje dostępne dla agentów należących do płci  $x_1$  gatunku  $s_1$  zasobem tym może być wyłącznie zasób  $\gamma_1$  – energia życiowa), wówczas akcja  $transfer(a_1, a_2, \Delta\gamma_n)$  definiowana jest następująco:  $transfer(a_1, a_2, \Delta\gamma_n) \Rightarrow \{\gamma_n^{a_1} = \gamma_n^{a_1} + \Delta\gamma_n, \gamma_n^{a_2} = \gamma_n^{a_2} - \Delta\gamma_n\}$ ;
- *transferToEnv* – akcja ta umożliwia agentom transfer zasobów do (węzła) środowiska. Rozważając agenta  $a_1$ , węzeł  $u \in V$  topologii środowiska oraz określoną ilość  $\Delta\gamma_n$  wykorzystywanego przez agenta  $a_1$  zasobu  $\gamma_n$  (ponieważ w tym miejscu definiowane są akcje dostępne dla agentów należących do płci  $x_1$  gatunku  $s_1$  zasobem tym może być wyłącznie zasób  $\gamma_1$  – energia życiowa), wówczas akcja  $transferToEnv(a_1, u, \Delta\gamma_n)$  definiowana jest następująco:  $transferToEnv(a_1, u, \Delta\gamma_n) \Rightarrow \{\gamma_n^{a_1} = \gamma_n^{a_1} - \Delta\gamma_n, \gamma_n^u = \gamma_n^u + \Delta\gamma_n\}$ ;
- *create* – akcja ta umożliwia agentowi ( $a_1$ ) wraz z partnerem (agentem  $a_2$ ), co zapisywane jest jako  $create(a_1, a_2)$ , na stworzenie agentów potomnych  $a_{12}$  oraz  $a_{21}$ . Podczas realizacji akcji *create* w oparciu o genotypy agentów rodzicielskich, w wyniku operacji krzyżowania, definiowane są genotypy agentów potomnych. Przyjęto, iż schemat operacji krzyżowania nie jest integralną częścią modelu EMAS, pozostawiając użytkownikowi możliwość zastosowania różnorodnych jego realizacji (od krzyżowania uśredniającego, po schemat Simulated Binary Crossover) i jako taki nie zostanie w tym miejscu zdefiniowany;
- *mut* – akcja ta umożliwia agentowi  $a_1$ , co zapisywane jest jako  $mut(a_1)$ , wprowadzenie mutacji do swojego genotypu. Podobnie jak w przypadku operacji krzyżowania, także schemat realizacji mutacji nie jest integralną częścią modelu EMAS i jako taki, nie zostanie w tym miejscu zdefiniowany. Podejście takie pozostawia swobodę doboru określonego schematu w zależności od preferencji i potrzeb użytkownika;
- *move* – akcja ta opisuje zmianę lokalizacji agenta  $a_1$  z węzła  $u$  do węzła  $v$  topologii środowiska ( $u, v \in V$ ), co zapisywane jest jako  $move(a_1, u, v)$ . Akcja ta definiowana jest następująco:  $move(a_1, u, v) \Rightarrow \{\{A^u\} \rightarrow \{A^u\} \setminus \{a_1\}; \{A^v\} \rightarrow \{A^v\} \cup \{a_1\}\}$ ;
- *checkDomination*( $a_1, a_2$ ) – akcja ta umożliwia sprawdzenie agentowi  $a_1$ , czy dominuje agenta  $a_2$ , czy agent  $a_1$  jest dominowany przez agenta  $a_2$ , czy też, czy agenci  $a_1$  oraz  $a_2$  są wzajemnie niezdominowani;

- *seekMeet* – akcja ta umożliwia agentom poszukiwanie partnerów do realizacji spotkań. W wyniku realizacji tej akcji agent  $a_1$  wskazuje na potencjalnego partnera strategii spotkań – agenta  $a_2$ . Agent  $a_2$  staje się rzeczywistym partnerem spotkania agenta  $a_1$  dopiero po zaakceptowaniu agenta  $a_1$  przez agenta  $a_2$ , a zatem po zakończeniu sukcesem realizacji akcji *acceptMeet*( $a_2, a_1$ ). W modelu EMAS przyjęto, iż agent  $a_1$  poszukuje partnerów spotkań w sposób losowy – a zatem agent losuje partnera spotkania spośród agentów zlokalizowanych w tym samym węźle i wysyła do wylosowanego potencjalnego partnera żądanie/prośbę dokonania spotkania;
- *seekRepro* – akcja ta umożliwia agentom poszukiwanie partnerów do reprodukcji. W podstawowym modelu EMAS poszukiwanie partnera do realizacji strategii reprodukcji realizowane jest w sposób losowy tzn. poprzez wylosowanie przez agenta  $a_1$  partnera reprodukcji spośród agentów zlokalizowanych w tym samym węźle topologii (wyspie), w którym zlokalizowany jest agent  $a_1$ . W wyniku realizacji tej akcji, agent  $a_1$  wskazuje na potencjalnego partnera strategii reprodukcji – agenta  $a_2$ . Agent  $a_2$  staje się rzeczywistym partnerem reprodukcji agenta  $a_1$  dopiero po zaakceptowaniu agenta  $a_1$  przez agenta  $a_2$  – a zatem po zakończeniu sukcesem realizacji akcji *acceptRepro*( $a_2, a_1$ );
- *seekMigr* – akcja ta umożliwia agentom wskazanie celu migracji w ramach wysp definiujących środowisko modelu EMAS (węzłów grafu topologii środowiska  $E$ ). W modelu EMAS przyjęto, iż docelowy węzeł migracji (węzeł  $v$ ) agent wybiera w danej chwili w sposób losowy, spośród wszystkich węzłów, do których zgodnie z przyjętą topologią środowiska agent może dokonać migracji znajdując się w węźle  $u$  (a zatem, spośród wszystkich węzłów dostępnych w danej chwili jako informacja  $\omega_1^{a_1}$ );
- *acceptMeet* – akcja ta pozwala agentowi ( $a_1$ ) na zaakceptowanie innego agenta (np. agenta  $a_2$ , co zapisywane jest jako *acceptMeet*( $a_1, a_2$ )) jako partnera spotkania. W podstawowym modelu EMAS przyjęto, iż agent  $a_1$  zawsze i bezwarunkowo akceptuje agenta  $a_2$  jako partnera spotkania, o ile oczywiście agent  $a_1$  otrzyma od agenta  $a_2$  stosowne żądanie/zaproszenie realizowane za pośrednictwem akcji *seekMeet*;
- *acceptRepro* – akcja ta pozwala agentowi ( $a_1$ ) na zaakceptowanie innego agenta (np. agenta  $a_2$ , co zapisywane jest jako *acceptRepro*( $a_1, a_2$ )) jako partnera reprodukcji. W podstawowym modelu EMAS przyjęto, iż agent  $a_1$  po otrzymaniu od agenta  $a_2$  prośby/żądania udziału w reprodukcji, dokonuje jej akceptacji (a zarazem zgody na udział razem z agentem  $a_2$  w realizacji reprodukcji – co zapisywane jest poniżej symbolicznie jako *accept*( $a_2$ )), jeśli tylko poziom energii życiowej agenta  $a_1$  jest wyższy od jego progu reprodukcji – a zatem od wartości zapisanej jako informacja  $\omega_5^{a_1}$ . Akcja ta zatem może zostać zdefiniowana następująco: *acceptRepro*  $\Rightarrow \{if \gamma_1^{a_1} \geq \omega_5^{a_1} \text{ then } accept(a_2)\}$ .

## 2.4. Strategie agentów

Zbiór strategii  $\Theta^{s_1}$  gatunku  $s_1$  podstawowego modelu EMAS obejmuje następujące strategie:

$$\Theta^{s_1} = \{migr, meet, repro\} \quad (2.13)$$

gdzie:

- *migr* – strategia ta pozwala agentom na realizację migracji pomiędzy wyspami środowiska (węzłami  $v \in V$  środowiska  $E$ ). Przystępując w kroku życia do realizacji tej strategii, agent (np. agent  $a_1$ ) podejmuje decyzję, czy jest zainteresowany w danej chwili (danym stanie systemu) zmianą lokalizacji, czy też nie. Jeśli agent chce dokonać migracji, dokonuje on (z wykorzystaniem akcji *seekMigr*) wyboru wyspy stanowiącej cel migracji. Następnie, jeśli agent posiada wystarczającą ilość zasobów, z wykorzystaniem akcji *transferToEnv* oddaje do środowiska (węzła  $u$ ) energię życiową w ilości równej wadze  $c_{uv}$  przypisywanej do ścieżki łączącej węzeł  $u$  z węzłem  $v$  środowiska – a zatem realizowana jest akcja  $transferToEnv(a_1, v, \Delta_{c_{uv}}\gamma_1)$ <sup>6</sup>. Następnie, przy użyciu akcji  $move(a_1, u, v)$ , dokonuje on zmiany lokalizacji z węzła, w którym znajduje się aktualnie – węzła  $u$ , do wybranego węzła docelowego – węzła  $v$ . Wreszcie, na podstawie informacji  $\omega_1^v$  oraz  $\omega_2^v$  węzła, do którego dokonana została migracja, agent dokonuje uaktualnienia własnych informacji  $\omega_1$  (lista węzłów, do których agent może dokonać migracji) oraz  $\omega_2$  (lista agentów zlokalizowanych w tym samym węźle środowiska), a zatem prawdziwe są następujące równania:  $\omega_1^{a_1} = \omega_1^v$  oraz  $\omega_2^{a_1} = \omega_2^v$ . Poszczególne kroki strategii migracji w sposób algorytmiczny zapisane zostały jako algorytm 1;

---

### Algorytm 1 Strategia migracji w modelu EMAS: $migr(a_1 \in s_1)$

---

```

1: if  $a_1$  chce dokonać zmiany lokalizacji then
2:    $Island\ v := seekMigr(a_1)$ ;
3:   if  $\gamma_1^{a_1} > \omega_6^{a_1} + c_{uv}$  then
4:      $transferToEnv(a_1, u, \Delta_{c_{uv}}\gamma_1)$ ; {Gdzie  $u$  to wezeł/wyspa w ktorej agent  $a_1$ 
       znajdował się dotychczas}
5:      $move(a_1, u, v)$ ;
6:      $\omega_1^{a_1} := \omega_1^v$ ;  $\omega_2^{a_1} := \omega_2^v$ ;
7:   end if
8: end if

```

---

- *meet* – strategia ta związana jest z realizowaniem przez agentów „spotkań”. W podstawowym modelu EMAS występuje jeden gatunek, a w ramach niego jedna płeć ewoluujących agentów – a zatem w modelu tym realizowana jest jedna wspólna dla wszystkich agentów strategia spotkań. Podczas realizacji strategii spotkań agent  $a_1$  podejmuje decyzję, czy w danej chwili (danym

---

<sup>6</sup>Zapis  $\Delta_{c_{uv}}\gamma_1$  oznacza, iż transferowany jest zasób  $\gamma_1$  w ilości równej wadze  $c$  przypisanej do ścieżki łączącej węzły  $u$  oraz  $v$  grafu środowiska.

stanie systemu) jest zainteresowany zrealizowaniem spotkania z innym agentem. Jeśli tak jest, agent  $a_1$  (z wykorzystaniem akcji *seekMeet*) dokonuje selekcjonowania (potencjalnego) partnera spotkania (agenta  $a_2$ ). W przypadku akceptacji żądania realizacji spotkania przez agenta  $a_2$  (co schematycznie zapisane zostało w kroku 3 algorytmu 2), spotkanie pomiędzy agentami jest realizowane. Proces ten, a zatem spotkanie pomiędzy agentami  $a_1$  oraz  $a_2$  i związane z tym faktem potencjalne przepływy zasobów i uaktualnienia informacji, można opisać następująco: przez agenta inicjującego spotkanie przeprowadzana jest akcja *checkDomination*( $a_1, a_2$ ). Następnie, jeśli zgodnie z tą akcją agent  $a_1$  dominuje agenta  $a_2$  ( $a_1 \succ a_2$ ) wówczas wykonywana jest akcja *transfer*( $a_1, a_2, \Delta_{\omega_8^{a_2}} \gamma_1$ )<sup>7</sup>, natomiast jeśli to agent  $a_2$  dominuje agenta  $a_1$  ( $a_2 \succ a_1$ ), wówczas wykonywana jest akcja *transfer*( $a_2, a_1, \Delta_{\omega_8^{a_1}} \gamma_1$ ). Strategia spotkań podstawowego modelu EMAS w sposób algorytmiczny zapisana została jako algorytm 2;

---

**Algorytm 2** Strategia spotkań w modelu EMAS: *meet*( $a_1 \in s_1$ )

---

```

1: if  $a_1$  chce zrealizować spotkanie z innym agentem then
2:   Agent  $a_2 := \text{seekMeet}(a_1)$ ;
3:   if acceptMeet( $a_2, a_1$ ) then
4:     checkDomination( $a_1, a_2$ );
5:     if  $a_1 \succ a_2$  then
6:       transfer( $a_1, a_2, \Delta_{\omega_8^{a_2}} \gamma_1$ );
7:     end if
8:     if  $a_2 \succ a_1$  then
9:       transfer( $a_2, a_1, \Delta_{\omega_8^{a_1}} \gamma_1$ );
10:    end if
11:  end if
12: end if

```

---

- *repro* – strategia reprodukcji podobnie jak strategia spotkań dostępna jest dla wszystkich agentów modelu EMAS, jednak jej szczegóły realizacyjne mogą być uzależnione od gatunku oraz płci agentów biorących w niej udział. Ponieważ w podstawowym modelu EMAS występuje jeden, wspólny dla wszystkich agentów, gatunek oraz jedna ich płeć, w tym przypadku definiowana jest jedna, wspólna dla wszystkich ewoluujących w ramach EMAS agentów, strategia reprodukcji.

Przystępując w danym kroku do realizacji strategii reprodukcji agent (np. agent  $a_1$ ) podejmuje decyzję, czy w danej chwili (stanie systemu) chce podjąć się realizacji reprodukcji, czy też nie. Jeśli tak jest, agent dokonuje sprawdzenia, czy poziom posiadanej przez niego energii życiowej jest większy niż omawiany wcześniej próg reprodukcji. Jeśli poziom energii życiowej agenta przekracza ten próg, wówczas przystępuje on do realizacji reprodukcji.

W pierwszej kolejności (z wykorzystaniem akcji *seekRepro*) agent wskazuje na partnera reprodukcji (agenta  $a_2$ ). Po zaakceptowaniu wskazania do udziału w procesie reprodukcji przez agenta  $a_2$  (co symbolicznie zaznaczono w kroku 4 algorytmu 3) dwaj agenci-rodzice (agenci  $a_1$  oraz  $a_2$ ) tworzą z wykorzystaniem

---

<sup>7</sup>Zapis  $\Delta_{\omega_8^{a_2}} \gamma_1$  oznacza, iż transferowany jest zasób  $\gamma_1$  w ilości zapisanej jako informacja  $\omega_8$  agenta  $a_2$ .



akcji *create* dwóch agentów potomnych (agent  $a_{12}$  oraz agent  $a_{21}$ ).

W dalszej kolejności (z wykorzystaniem akcji *mut*) może dojść do losowych zmian w utworzonych przez agentów rodzicielskich genotypach agentów potomnych.

Obecność nowych agentów odnotowywana jest przez środowisko (i wszystkich agentów zlokalizowanych w określonym węźle środowiska). W modelu EMAS przyjęto, iż reprodukcja odbywa się wyłącznie pomiędzy agentami zlokalizowanymi w tym samym węźle środowiska, a lokalizacja agentów potomnych jest taka sama, jak lokalizacja agentów rodzicielskich. W wyniku zatem realizacji strategii reprodukcji prawdziwe jest:  $A^u \rightarrow A^u \cup \{a_{12}, a_{21}\}$  (gdzie  $u \in V$  to węzeł środowiska, w którym zlokalizowani są agenci rodzicielscy  $a_1$  oraz  $a_2$  i w konsekwencji, w którym zlokalizowani są bezpośrednio po kreacji agenci potomni  $a_{12}$  oraz  $a_{21}$ )<sup>8</sup>.

Następnie, na podstawie wiedzy (informacji) agentów rodzicielskich, agenci potomni określają swoją wiedzę (informacje) na temat najważniejszych aspektów środowiska i warunków funkcjonowania w nim. Agenci potomni pozyskują od agentów rodzicielskich informację o swojej lokalizacji w strukturze świata agentów modelu EMAS, prawdziwe są zatem następujące przepływy informacji:  $\omega_1^{a_{12}} := \omega_1^{a_1}$ ;  $\omega_1^{a_{21}} := \omega_1^{a_1}$ .

Agenci potomni uzyskują także od agentów rodzicielskich informację na temat agentów zlokalizowanych w danej chwili (stanie systemu) w tym samym węźle środowiska  $u$ . Prawdziwe są zatem następujące przepływy informacji:  $\omega_2^{a_{12}} := \omega_2^{a_1} \cup \omega_2^{a_2}$ ;  $\omega_2^{a_{21}} := \omega_2^{a_1} \cup \omega_2^{a_2}$ .

Podczas realizacji strategii reprodukcji determinowana jest także płeć oraz gatunek agentów potomnych  $a_{12}$  oraz  $a_{21}$ . W modelu EMAS obecny jest wyłącznie jeden gatunek oraz jedna płeć agentów, strategia reprodukcji realizowana jest zatem pomiędzy agentami tej samej płci oraz tego samego gatunku, a tworzeni agenci potomni należą do tego samego gatunku oraz płci – jednakże informację o tym uzyskują od agentów rodzicielskich. W wyniku realizacji strategii reprodukcji prawdziwe są zatem następujące przepływy informacji:  $\omega_3^{a_{12}} := \omega_3^{a_1}$ ;  $\omega_3^{a_{21}} := \omega_3^{a_1}$ ;  $\omega_4^{a_{12}} := \omega_4^{a_1}$ ;  $\omega_4^{a_{21}} := \omega_4^{a_1}$ . Dodatkowo, fakt obecności nowych agentów określonej płci odnotowywany jest przez środowisko, prawdziwe jest zatem:  $A^1 \rightarrow A^1 \cup \{a_{12}, a_{21}\}$  (gdzie  $A^1$  to zbiór agentów płci  $x_1$  gatunku  $s_1$ )<sup>9</sup>.

W opisywanym tutaj, podstawowym modelu EMAS przyjęto założenie, iż realizacja strategii reprodukcji jest możliwa, jeśli poziom energii życiowej agenta przekracza tzw. próg reprodukcji. Wartość tego progu przekazywana jest agentom potomnym przez agentów rodzicielskich. Podczas realizacji strategii reprodukcji, analizowanego podstawowego modelu EMAS, prawdziwe są zatem następujące przepływy informacji:  $\omega_5^{a_{12}} := (\omega_5^{a_1} + \omega_5^{a_2})/2$ ;  $\omega_5^{a_{21}} := (\omega_5^{a_1} + \omega_5^{a_2})/2$ .

Podobnie, agenci potomni otrzymują od agentów rodzicielskich informa-

---

<sup>8</sup>Mimo, iż nie jest to aktywność realizowana przez agentów, fakt uaktualnienia stanu węzła środowiska stanowi integralną część procesu reprodukcji, dlatego też został on odnotowany zarówno w powyższym opisie, jak i w algorytmicznym zapisie strategii reprodukcji (por. krok 7 algorytmu 3).

<sup>9</sup>Mimo, iż nie jest to aktywność realizowana przez agentów, fakt uaktualnienia stanu płci modelu EMAS stanowi integralną część procesu reprodukcji, dlatego też został on odnotowany zarówno w powyższym opisie, jak i w algorytmicznym zapisie strategii reprodukcji (por. krok 7 algorytmu 3.)

cje związane z tym, kiedy muszą podjąć decyzję o realizacji akcji śmierci. Prawdziwy jest zatem także następujący przepływ informacji:  $\omega_6^{a_{12}} := (\omega_6^{a_1} + \omega_6^{a_2})/2$ ;  $\omega_6^{a_{21}} := (\omega_6^{a_1} + \omega_6^{a_2})/2$ .

Tworzone osobniki potomne otrzymują od agentów rodzicielskich nie tylko zasoby ale także informacje o poziomie otrzymanych zasobów – znajomość początkowego poziomu posiadanej energii życiowej pozwala agentowi na względną ocenę, w dowolnym momencie życia, aktualnej sytuacji „energetycznej” w odniesieniu do swojej sytuacji początkowej. Tym samym, agenci potomni otrzymują od agentów rodzicielskich informacje ile energii życiowej powinni oni przetransferować do swoich potomków (a zatem agenci w każdej chwili życia mogą ocenić jak kosztowna może się okazać realizacja strategii reprodukcji). Innymi słowy, agenci potomni otrzymują (dziedziczą) od agentów rodzicielskich informację na temat początkowego poziomu energii życiowej – stanowiącą informację  $\omega_7$ , a zatem prawdziwy jest następujący przepływ informacji:  $\omega_7^{a_{12}} := (\omega_7^{a_1} + \omega_7^{a_2})/2$ ;  $\omega_7^{a_{21}} := (\omega_7^{a_1} + \omega_7^{a_2})/2$ .

Wreszcie, agenci potomni dziedziczą od agentów rodzicielskich także informacje o ilości energii życiowej, która (lub której wielokrotność) transferowana jest pomiędzy agentami podczas realizacji wybranych akcji i/lub strategii (w szczególności strategii spotkań), a zatem prawdziwy jest także następujący przepływ informacji:  $\omega_8^{a_{12}} := (\omega_8^{a_1} + \omega_8^{a_2})/2$ ;  $\omega_8^{a_{21}} := (\omega_8^{a_1} + \omega_8^{a_2})/2$ .

Po wykonaniu powyżej opisanych podstawowych transferów informacji, osobniki rodzicielskie dokonują na rzecz osobników potomnych następujących transferów zasobów:

$$\begin{aligned} &transfer(a_{12}, a_1, \Delta_{(\omega_7^{a_{12}})/2} \gamma_1); \quad transfer(a_{12}, a_2, \Delta_{(\omega_7^{a_{12}})/2} \gamma_1); \\ &transfer(a_{21}, a_1, \Delta_{(\omega_7^{a_{21}})/2} \gamma_1); \quad transfer(a_{21}, a_2, \Delta_{(\omega_7^{a_{21}})/2} \gamma_1). \end{aligned}$$

Wreszcie, po dokonaniu powyższych transferów informacji oraz zasobów, agenci potomni rozpoczynają realizację swoich procesów życiowych, a zatem następuje uruchomienie procesów  $Life(a_{12})$  oraz  $Life(a_{21})$ .

Strategia reprodukcji podstawowego modelu EMAS w sposób algorytmiczny zapisana została jako algorytm 3.

## 2.5. Krok i cykl życia agenta oraz model działania systemu

Po omówieniu elementów systemu oraz możliwych zachowań (które mogą powodować zmiany stanu systemu) agentów modelu EMAS, możliwe jest w tym miejscu zdefiniowanie pojedynczego kroku życia agenta, całości jego procesów życiowych oraz schematu działania samego systemu.

Krok życia agenta zdefiniowany został w oparciu o przedstawione wcześniej akcje, strategie, informacje oraz zasoby i w modelu EMAS składa się z czterech podstawowych elementów (co w sposób algorytmiczny przedstawione zostało jako algorytm 4):

- decyzji dotyczącej realizacji akcji śmierci ( $die()$ );
- realizacji strategii migracji (której częścią jest decyzja agenta związana z chęcią realizacji migracji w danej chwili/stanie systemu – por. definicja strategii migracji  $migr()$  oraz algorytm 1);

**Algorytm 3** Strategia reprodukcji w modelu EMAS: repro( $a_1, a_2 \in s_1$ )

---

```

1: if  $a_1$  chce dokonać reprodukcji then
2:   if  $\gamma_1^{a_1} \geq \omega_5^{a_1}$  then
3:     Agent  $a_2 := \text{seekRepro}(a_1)$ ;
4:     if  $\text{acceptRepro}(a_2, a_1)$  then
5:        $a_{12}, a_{21} := \text{create}(a_1, a_2)$ ;
6:        $\text{mut}(a_{12})$ ;  $\text{mut}(a_{21})$ ;
7:        $A^u \rightarrow A^u \cup \{a_{12}, a_{21}\}$ ;
        $A^1 \rightarrow A^1 \cup \{a_{12}, a_{21}\}$ ; {Opisane w tym kroku operacje nie są, co
       prawda, akcjami, czy strategiami realizowanymi, czy to przez agentów
       rodzicielskich, czy też agentów potomnych – niemniej w sposób schematy-
       czny i uproszczony zaznaczono w tym miejscu, iż tworzeni agencji po-
       tomni przynależą do tego samego węzła topologii środowiska, do której
       przynależą agencji rodzicielscy, a zatem dochodzi do zaktualizowania za-
       wartości zbioru  $A^u$  agentów zlokalizowanych w węźle  $u$ , a ponadto przy-
       naleszą oni do płci  $x_1$  gatunku  $s_1$ , dochodzi zatem do zaktualizowania za-
       wartości zbioru  $A^1$  wszystkich agentów płci  $x_1$  gatunku  $s_1$ .}
8:        $\omega_1^{a_{12}} := \omega_1^{a_1} = \omega_1^{a_2}$ ;  $\omega_1^{a_{21}} := \omega_1^{a_1} = \omega_1^{a_2}$ ;
9:        $\omega_2^{a_{12}} := \omega_2^{a_1} \cup \omega_2^{a_2}$ ;  $\omega_2^{a_{21}} := \omega_2^{a_1} \cup \omega_2^{a_2}$ ;
10:       $\omega_3^{a_{12}} := \omega_3^{a_1} = \omega_3^{a_2}$ ;  $\omega_3^{a_{21}} := \omega_3^{a_1} = \omega_3^{a_2}$ ;
11:       $\omega_4^{a_{12}} := \omega_4^{a_1} = \omega_4^{a_2}$ ;  $\omega_4^{a_{21}} := \omega_4^{a_1} = \omega_4^{a_2}$ ;
12:       $\omega_5^{a_{12}} := (\omega_5^{a_1} + \omega_5^{a_2})/2$ ;  $\omega_5^{a_{21}} := (\omega_5^{a_1} + \omega_5^{a_2})/2$ ;
13:       $\omega_6^{a_{12}} := (\omega_6^{a_1} + \omega_6^{a_2})/2$ ;  $\omega_6^{a_{21}} := (\omega_6^{a_1} + \omega_6^{a_2})/2$ ;
14:       $\omega_7^{a_{12}} := (\omega_7^{a_1} + \omega_7^{a_2})/2$ ;  $\omega_7^{a_{21}} := (\omega_7^{a_1} + \omega_7^{a_2})/2$ ;
15:       $\omega_8^{a_{12}} := (\omega_8^{a_1} + \omega_8^{a_2})/2$ ;  $\omega_8^{a_{21}} := (\omega_8^{a_1} + \omega_8^{a_2})/2$ ;
16:       $\text{transfer}(a_{12}, a_1, \Delta_{(\omega_7^{a_{12}})/2} \gamma_1)$ ;  $\text{transfer}(a_{12}, a_2, \Delta_{(\omega_7^{a_{12}})/2} \gamma_1)$ ;
       $\text{transfer}(a_{21}, a_1, \Delta_{(\omega_7^{a_{21}})/2} \gamma_1)$ ;  $\text{transfer}(a_{21}, a_2, \Delta_{(\omega_7^{a_{21}})/2} \gamma_1)$ ;
17:       $\text{Life}(a_{12})$ ;  $\text{Life}(a_{21})$ ;
18:    end if
19:  end if
20: end if

```

---

**Algorytm 4** Krok życia agenta w modelu EMAS: LifeStep( $a_1 \in s_1$ )

---

```

1: if  $\gamma_1^{a_1} \leq \omega_6^{a_1}$  then
2:    $\text{transferToEnv}(a_1, u, \gamma_1^{a_1})$ ; {Gdzie:  $u$  to węzeł środowiska, w którym znajduje
   się agent  $a_1$ , zaś  $\gamma_1^{a_1}$  oznacza całość posiadanego w danej chwili przez agenta
    $a_1$  zasobu  $\gamma_1$  (energii życiowej).}
3:    $\text{die}(a_1)$ 
4: end if
5:  $\text{migr}(a_1)$ ;
6:  $\text{meet}(a_1)$ ;
7:  $\text{repro}(a_1)$ ;

```

---

- realizacji strategii spotkań (której częścią jest decyzja agenta związana z chęcią realizacji spotkań w danej chwili/stanie systemu – por. definicja strategii *meet()* oraz algorytm 2);
- realizacji strategii reprodukcji (której częścią jest decyzja agenta związana z chęcią realizacji reprodukcji w danej chwili/stanie systemu – por. definicja strategii *repro()* oraz algorytm 3).

Wreszcie proces życia agenta polega na realizacji (od narodzin, aż do śmierci, bądź zakończenia działania systemu) kolejnych kroków życia (rozumianych jako realizacja sekwencji aktywności przedstawionych w ramach algorytmu 4), ciągłej obserwacji środowiska i zachodzących w nim zmian, a także udziale w akcjach i strategiach inicjalizowanych przez innych agentów, co schematycznie, w sposób algorytmiczny przedstawione zostało jako algorytm 5.

---

**Algorytm 5** Proces życia agenta w modelu EMAS:  $\text{Life}(a_1 \in s_1)$

---

```

1: loop
2:   Obserwuj Środowisko;
3:   LifeStep( $a_1$ );
4:   Bierz udział w akcjach i strategiach inicjowanych przez innych agentów;
5: end loop

```

---

Omawiając przyjęte, algorytmiczne zapisy kroku życia agenta (por. algorytm 4) oraz całości jego procesów życiowych (por. algorytm 5) należy podkreślić, iż w każdej chwili swojego życia (w szczególności podczas realizacji wszystkich akcji i strategii składających się na jego krok życiowy) agent dokonuje ciągłej obserwacji środowiska i konstatacji obserwowanych zmian w nim zachodzących. Założono zatem, iż jeśli np. w przypadku realizacji strategii reprodukcji w środowisku (danym jego węźle) pojawiają się dwaj nowi agenci – w wyniku takiej obserwacji, wszyscy agenci zlokalizowani w tym węźle są tego świadomi, a konstatacja tego faktu znajduje odzwierciedlenie w aktualizacji posiadanych przez nich informacji (w szczególności informacji  $\omega_2$ ).

Fakt ciągłej obserwacji środowiska zaznaczono schematycznie w kroku 2 algorytmu 5 – jest to jednakże w oczywisty sposób zapis uproszczony, który wskazuje, iż tego typu aktywność (obserwacja środowiska i odnotowywanie zachodzących w nim zmian) jest jednym z elementów składających się na całość czynności i aktywności realizowanych przez agenta podczas jego życia. Pamiętać jednak należy, iż obserwacja ta nie odbywa się wyłącznie w drugim kroku omawianego algorytmu, a realizowana jest niejako „w tle” podczas wszystkich aktywności przejawianych przez agenta (innymi słowy, zapis ten symbolizuje fakt, iż agent jest świadomy wszelkich zmian zachodzących w środowisku/węźle).

Ponadto, zaznaczyć należy, iż efektywna aktywność agentów modelu EMAS nie ogranicza się wyłącznie do realizacji kolejnych kroków życia oraz obserwacji i odnotowywania zmian zachodzących w środowisku, a w ramach kroku życia do realizacji czynności (akcji czy strategii) wynikających ze zdefiniowanego kroku życia. Aktywność agenta obejmuje także czynności wynikające z partycypowania w realizacji akcji oraz strategii zainicjowanych przez innych agentów w ramach realizacji ich kroków życia. Na przykład, analizując drugi krok algorytmu 4 – a zatem realizację strategii spotkań, oczywistym jest, iż dla wskazanego tam agenta  $a_1$  realizacja

tej strategii jest naturalnym krokiem wynikającym z jego „cyklu życia”. W definicji jednakże strategii *meet* zawarto wskazanie partnera spotkania dla agenta  $a_1$ , który to partner będzie uczestniczył w realizacji określonych akcji mimo, iż nie był ich inicjatorem.

Algorytm 4 definiuje zatem aktywność inicjowaną przez określonego agenta. Jednakże definicja kolejnych akcji oraz strategii (w szczególności tych akcji i strategii, których realizacja wymaga udziału nie tylko agenta ją inicjującego) oraz przyjęty schemat realizacji kolejnych kroków życia kolejnych agentów powoduje, iż czynności wykonywane w ramach realizacji własnego kroku życia agenta nie domykają całościowego obrazu czynności przez niego wykonywanych, bowiem w wyniku realizacji kroków życia innych agentów może on zostać wskazany jako partner realizacji określonych akcji czy strategii.

W sposób schematyczny ten obszar aktywności agenta przejawianych podczas całego swojego życia zaznaczono w kroku 4 algorytmu 5 – pamiętać jednakże należy, iż podobnie jak miało to miejsce podczas definiowania aktywności polegającej na obserwacji środowiska, jest to pewnego rodzaju uproszczenie. Oczywiście jest bowiem, iż agent może uczestniczyć w aktywnościach inicjalizowanych przez innych agentów w dowolnym momencie swojego życia – aktywności te przejawiane są zatem niejako „w tle”, podczas realizacji wszystkich aktywności przejawianych przez agenta (innymi słowy, zapis ten w sposób symboliczny i uproszczony sugeruje, iż agent w dowolnym momencie swojego życia może uczestniczyć w akcjach i strategiach inicjalizowanych przez innych agentów).

---

#### Algorytm 6 Schemat działania systemu EMAS

---

- 1: Stwórz strukturę środowiska  $E$  zgodnie z założonymi parametrami;
  - 2: Stwórz i zainicjalizuj losowo agentów wszystkich gatunków  $S$  zgodnie z założonymi parametrami;
  - 3: **for all**  $v_i \in V$  **do**
  - 4:   **for all**  $a_j \in A^{v_i}$  **do**
  - 5:     Life( $a_j$ ); {Dla wszystkich agentów systemu rozpocznij jednoczesną i niezależną (a zatem wykonywaną w sposób współbieżny) realizację ich procesów życiowych.}
  - 6:   **end for**
  - 7: **end for**
- 

Działanie całego systemu EMAS (populacji wszystkich agentów ewoluujących w ramach systemu EMAS) streścić można w trzech zasadniczych krokach (co przedstawione zostało jako algorytm 6):

- stworzenie struktury systemu zgodnie z założonymi parametrami (ilość i struktura połączeń pomiędzy wyspami, początkowa wielkość populacji etc.);
- stworzenie i losowe zainicjalizowanie agentów wszystkich gatunków systemu (genotypy, płeć, zlokalizowanie w środowisku etc.);
- uruchomienie (jednoczesne) procesów życiowych wszystkich stworzonych agentów.



## Rozdział 3

# Elitarny system agentowo-ewolucyjny optymalizacji wielokryterialnej (elEMAS)

Podstawowy system agentowo-ewolucyjny optymalizacji wielokryterialnej omówiony w rozdziale 2 posiada tę niewątpliwą zaletę, iż opisany jest modelem stosunkowo prostym z punktu widzenia koncepcyjnego, a w konsekwencji nieprzysparzającym problemów także na poziomie implementacyjnym. Prostota ta w wielu przypadkach okazywała się atutem tego systemu – nikły stopień skomplikowania przeprowadzanych operacji przekładał się bowiem bezpośrednio na szybkość jego działania (szybkość wykonania pojedynczego kroku agenta), co w wielu sytuacjach powodowało, iż z punktu widzenia kryterium czasowego, model EMAS okazywał się dość skutecznym narzędziem optymalizacyjnym.

Równocześnie jednak stwierdzono, że w licznych przypadkach (wymagających nieco bardziej wyrafinowanych mechanizmów i technik), system ten nie spełniał pokładanych w nim nadziei, a uzyskiwane z jego wykorzystaniem wyniki ustępowały znacząco wynikom uzyskiwanym przez klasyczne (nieagentowe) algorytmy ewolucyjne.

Obserwacja i analiza zachowania modelu EMAS (ewoluujących w nim agentów) pozwala stwierdzić, iż może to być powodowane przez przedwczesną utratę (z czasem trwania obliczeń) różnorodności agentów (reprezentowanych przez nich rozwiązań), co z kolei powodować może:

- Zwiększenie niebezpieczeństwa wystąpienia zjawiska przedwczesnej stagnacji zachodzących w populacji procesów ewolucyjnych. W trakcie działania systemu, stopniowo „wymierają” osobniki najsłabsze oraz wyrównuje się jakość oraz podobieństwo osobników pozostających w systemie, czyli w populacji znajdują się niemal wyłącznie agenci reprezentujący zbliżone i wzajemnie niezdominowane rozwiązania (aczkolwiek mogą być one zlokalizowane w pewnej odległości od wzorcowego frontu Pareto). W takiej sytuacji, podczas spotkań agentów nie zostaną spełnione kryteria warunkujące przepływy zasobów pomiędzy nimi, zatem agenci nie będą ani zyskiwali ani też tracili zasobów, nie będą więc poddani ani usunięciu z populacji ani reprodukcji. W konsekwencji, obserwowane procesy ewolucyjne zanikają (system dotyka stagnacji), a populacja agentów traci możliwość dalszego „dryfowania” w kierunku wzorcowego frontu Pareto.
- Utrata różnorodności obecnych w systemie rozwiązań powodować może dodatkowo (poza brakiem możliwości „dryfowania” w kierunku wzorcowego frontu