

СЪВРЕМЕННО ПРИЛОЖЕНИЕ НА МНОГОАГЕНТНИТЕ СИМУЛАЦИОННИ МОДЕЛИ В ИЗСЛЕДВАНИЯТА И В ПРАКТИКАТА

Мартин Иванов
Нов български университет
Департамент „Информатика“
e-mail: *mivanov@nbu.bg*

Анотация: В публикацията са представени някои от съвременните резултати в областта на изграждането на многоагентни симулационни модели и ползването им приложението в редица изследователски и практически дейности. Разгледани са отличителните характеристики на многоагентните системи, мотивите за разработването им като инструментални средства, структурата им и основните изграждащи ги компоненти. Отбелязани са основните методологически проблеми на създаването на многоагентни системи за симулационно моделиране. Посочени са някои типични предметни области за приложение на многоагентните симулационни модели. Включено е описание и сравнителен анализ на някои от най-популярните софтуерни инструменти за многоагентно моделиране.

Ключови думи: симулационно моделиране, многоагентни системи, агентно-базирани системи.

1. Същност на симулационните модели.

Компютърната симулация се определя като използване на формални (математически и логически) модели за пресъздаване на дадена ситуация (реална или мнима), най-често чрез многократно повторение така, че да могат да бъдат направени полезни изводи около развитието ѝ и движещите ѝ сили. Обикновено моделът е формално описание на система със съответна степен на детайлизация (от най-общото ѝ функциониране, до пълното ѝ описание като изградена от всички обхванати от нея елементи). Симулацията позволява анализ на динамичното поведение на модела, доколкото в него като важен елемент е включено времето. Основните предимства, които осигурява една симулационна среда са:

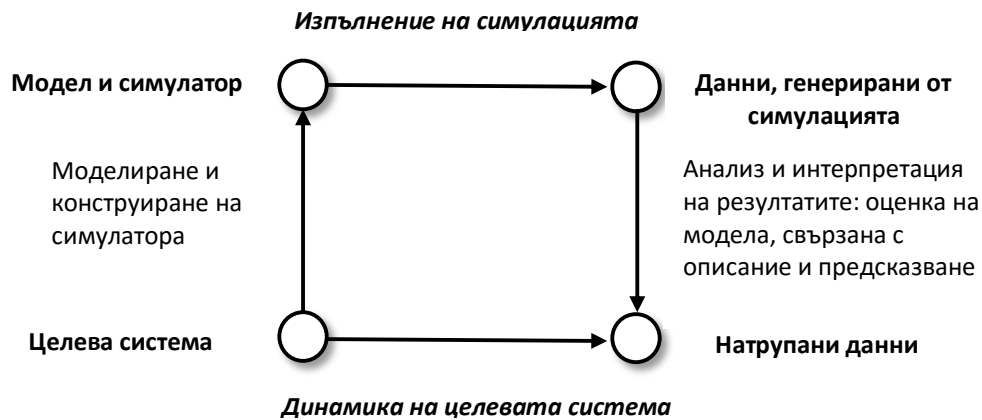
- Системата (или част от нея) може да бъде тествана, настройвана и валидирана без да е необходимо да се използва реална (напр. физическа) среда.
- Проиграването на различни сценарии, извънредни обстоятелства или рискови проверки може да бъде изпълнено лесно. Безопасно и без разход на скъпоструващи ресурси;
- Получените данни могат да бъдат използвани многократно за обучение или за поддръжка на системата, симулацията може да бъде изпълнена толкова пъти, колкото е необходимо с оглед по-добро разбиране на функционирането на оригиналната система.
- Симулационният процес може да бъде компресиран във времето, при което в кратък срок да бъдат получени резултати, изискващи дълго реално време за работа на оригиналната система.

Симулационното моделиране е важен елемент от състава на съвременните информационни технологии, които днес широко се използват в научните изследвания и в управлението на икономическите и на социалните процеси.

1.1 Схема на симулационния процес

Симулационният процес се състои от няколко типични основни фази, независимо от разнообразието в технологичните решения и спецификата на моделираните процеси и системи. Обща

схема, представяща ролята на симулацията като инструмент за описание и предвиждане е показана на фиг.1.



Фигура 1: Обща схема на симулацията като инструмент.

1.2 Три основни подхода в симулационното моделиране

В специализираните източници се отбелязват като цяло три основни подхода в създаването на имитационни модели – **системна динамика**, **дискретно-събитийн** и **агентно-базиран**. Първите два са традиционни методи на симулационното моделиране, бележещи десетилетна история. Последният е относително нов и е получил своето развитие и практическо приложение след 2000 година – тогава, когато теоретичните и технологичните предпоставки позволяват това да стане.

Системната динамика и дискретно-събитийното моделиране използват подхода „отгоре-надолу“ (top-down) при изследването и описанието на целевия обект или процес, работейки на т.нар. „системно равнище“. Агентно-базираното моделиране използва противоположен подход – „отдолу-нагоре“, съсредоточавайки процеса на моделиране върху поведението на индивидуалните обекти, влизащи в състава на моделираната система.

Системната динамика предполага високо равнище на абстракция и се използва основно в задачи със стратегически приоритети. Дискретно-събитийното моделиране (известно и като процесно-ориентирано) се използва в оперативните и тактически задачи. Обхватът на приложение на агентно-базираните модели включва произволни равнища на абстракция: агентите могат да представят самостоятелни стопански субекти, функциониращи на пазара, корпоративни структури, политически структури, компоненти на системата за отбрана и сигурност, елементи на транспортна инфраструктура, транспортни средства, елементи на товаро- и пътничкопотоци, участници в групови социални структури и т.н.

2. Многоагентни симулационни модели

Многоагентните симулационни модели (МАСМ) са съвременна тенденция в симулационното моделиране на сложни системи. Те са резултат от развитието на техническите и технологичните средства в областта на информационните технологии и от напредъка на формалния математически апарат. Многоагентните симулационни модели значително разширяват възможностите на симулационното моделиране като изследователски подход и го правят удобен и ефективен за много различни области от научната и стопанската дейност. МАСМ е средство за моделиране на динамиката на сложни процеси и на сложни адаптивни системи. Такива системи най-често са самоорганизиращи се. МАСМ включват модели

на поведението (на хора или др.) и се използват за изследване на колективния ефект от поведението и взаимодействието на агентите (MULTI-AGENT SYSTEMS... 2011).

От гледна точка на практическото си приложение многоагентното симулационно моделиране може да се определи като метод за моделиране, изследващ поведението на децентрализирани агенти и това как те определят поведението на включващата ги система в съвкупност (Борщев 2004).

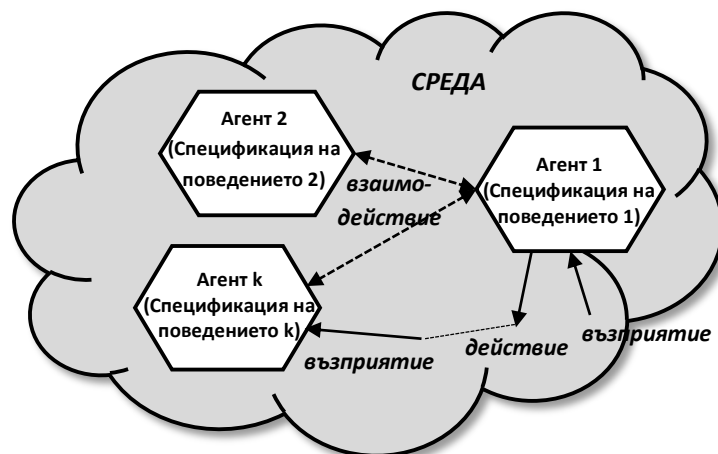
MАСМ са разновидност на един по-широк клас многоагентни модели, известни като агентно-басирани модели (agent-based models - ABM).

2.1 Структура на МАСМ

Основните елементи на един агентно-басиран симулационен модел са:

- **Агенти**, притежаващи възможно хетерогенна спецификация на поведението;
- **Среда**, в която агентите функционират и от която получават сигнали и възприятия;
- **Механизъм на взаимодействие между агентите** – могат да включват както директен, така и индиректен обмен на информация.

Агентно-басираните модели често се обозначават с различни имена, в зависимост от областта, в която намират приложение и се свързват с различни методологии. В областта на компютърните науки (например изкуственият интелект, разпределените автономни системи и др.) агентно-басираното моделиране се свързва с изчислителни техники и методи за симулация с цел изучаване поведението и взаимодействието на множество от автономни обекти. За обозначаването на този тип модели често се използва и наименованието „многоагентни системи“ (multiagent systems, MAS) или „агентно-басирани системи“. В научните области, които не са пряко свързани с приложението на компютърни средства (напр. екология, биология и др.), агентно-басираните модели се обозначават като „индивидуално-басирани модели“ (individual based models).



Фигура 2: Структура на абстрактна многоагентна система.

2.2 Предпоставки за използване на МАСМ

Потребността от използване на МАСМ се съдържа в нарастващата сложност на света, в който живеем и в естеството на задачите, които следва да решаваме в хода на социалния, икономически и технологичен прогрес:

- Системите, които желаем да бъдат анализирани и моделирани, стават все по-сложни по отношение на тяхната взаимосвързаност и вътрешна структура. Традиционните подходи за

моделиране не са приложими към тези променени условия. Пример за подобна ситуация са децентрализираните икономически връзки, при които всеки участник може да избере своя инвестиционна и пазарна политика, съобразно собствените си предпочитания.

- Независимо от променящите се исторически и икономически условия, някои системи традиционно се отличават със значителна сложност и по същество изискват съответно равнище на развитие на аналитичните методи;
- Състоянието на съществуващите социални, технологични и икономически системи се регистрира с нарастваща детайлност в различни информационни източници и хранилища на данни. Микроданните вече могат да поддържат симулации на базата на индивидуални данни.
- Технологичното развитие и мощността на изчислителните ресурси позволяват детайлна и масова симулация на микроравнище, което би усъвършенствало радикално качеството и правдоподобността на симулационните модели.

2.3 Многоагентното моделиране и връзката му със сходни научни и научно-приложни области

Разработването на системи с МАСМ като научно-приложно направление е свързано с много други научни области, от които ползва идеи, концепции, методи и резултати. Тук влизат компютърните науки, теория на управлението, системотехника, изкуствен интелект и машинно самообучение, разнообразни клонове на социалните науки, постижения на традиционни математически области като теория на вероятностите, теория на случайните процеси и математическата статистика. Необходимо е да бъдат отбелязани и съвременните средства и техники за набиране, организиране, управление и достъп до данни. Теоретичните предпоставки на системите с МАСМ имат своите преки исторически корени в теорията на сложните адаптивни системи. Същата теория се основава на принципа, че системите се изграждат „отдолу-нагоре“, т.е. че поведението на системата в цялост се определя от поведението на съставляващите я активни и самостоятелни елементи-агенти. Подходът на системите с МАСМ е описателен (дескриптивен) с намерение да се моделира действителното или правдоподобно поведение на индивидите, а не нормативен (каквото е в областта на изследване на операциите), който се стреми да определи оптимално поведение на системата в цялост. Областта на сложните адаптивни системи първоначално е вдъхновена от изследванията върху адаптацията и възникването на биологичните системи. Сложните адаптивни системи имат способността да се самоорганизират и динамично да реорганизируют своите компоненти по начин, който им позволява оцеляването и доминирането в тяхната среда. Основните характеристики на сложните адаптивни системи, които имат отношение и към моделирането чрез многоагентния подход, са (Holland 1995):

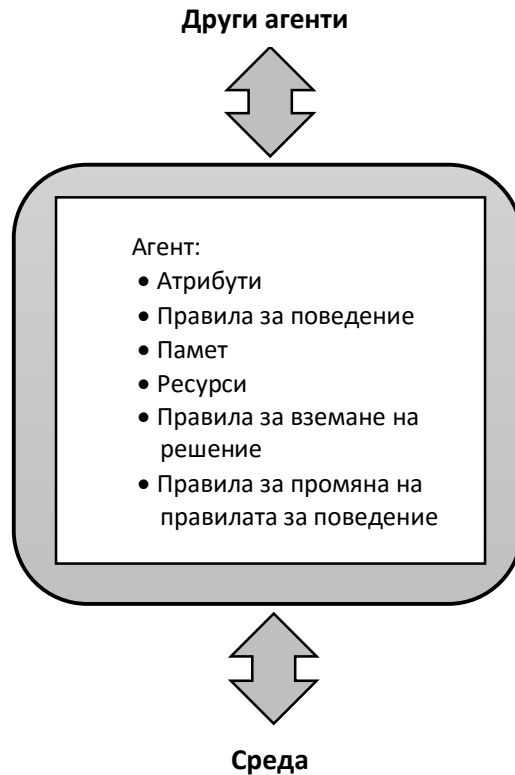
- **Агрегация** – позволяват да се формират групи по обединяващи признаци;
- **Нелинейност** – елиминира простата линейна екстраполация;
- **Поточност** – позволява пренасянето и трансформирането на ресурси и на информация.
- **Разнообразие** - позволява на агентите да се държат по различен начин един от друг и често води до свойството „стабилност“ на системата.

Следва и да бъдат отбелязани механизмите, които осигуряват на сложните автономни системи постигането на посочените свойства: маркиране, което позволява на агентите да бъдат идентифицирани; вътрешни модели, които позволяват на агентите да „разсъждават“ относно околната среда; изграждащи блокове, които позволяват отделните компоненти и цялата система да бъдат композирани на различни равнища. Тези свойства на сложните автономни системи ги правят отлична предпоставка за изграждането на многоагентно базирани модели.

2.4 Същност на агента

Агентът в МАСМ е концепция, която акцентира преди всичко върху неговата обособеност и самостоятелна функция по отношение на останалите елементи в моделираната система. Тази концепция не е категорично определена и с нея могат да бъдат означавани различни компоненти, в зависимост от подхода и целите на изследването. Като агенти могат да бъдат определени отделни части от програма (модули, подсистеми и др.), независими обекти, представляващи цели организационни или икономически структури, самостоятелно функциониращи единици и др. Агентът комуникира с други агенти в създадената симулационна среда и реагира според заложените в него модели на поведение – от съвсем опростен, до такъв, който е свързан с вземането на сложни решения и оптимизация (фиг. 3). Не съществува универсална дефиниция за агент, но като признати типични негови характеристики могат да бъдат посочени следните особености:

- **Идентифицируем, самосъдържащ се и дискретен** със съвкупност от определени характеристики и правила, управляващи неговото поведение и способността му за вземане на решение. Изискванията за дискретност предполагат, че агентът има свои граници и лесно може да се определи дали даден обект е част от агента или не (да се разграничи от средата и от другите агенти).
- **Разположен и функциониращ в среда, с която си взаимодейства заедно с други агенти.** Агентите разполагат с протокол за взаимодействие помежду си, като възможност за комуникация и за реагиране на промени в средата. Агентите притежават способността да разпознават чертите на другите агенти.
- **Целево-ориентирани** – агентите имат поставени цели, които следва да достигнат чрез поведението си. Това дава възможност на агента да сравнява резултата от поведението си по отношение на постигането на целите..
- **Автономни и самонасочващи се** – агентът може да функционира независимо в своята среда и в отношенията си с други агенти поне в ограничена съвкупност от ситуации, които представляват интерес за него.
- **Гъвкави, притежаващи способността да се учат** и да адаптират поведението си на базата на опит, което изисква някаква форма на памет. Агентът може да притежава правила, които модифицират правилата за поведението му, с което той може да наподобява социален феномен.



Фигура 3: Типични характеристики на автономен агент.

Агентите в един МАСМ могат да бъдат различни категории - разнородни, съответно изпълняващи различни функции, водени от различни цели, да противопоставят поведението си или да се кооперират за постигане на общи цели – в съответствие със спецификата на моделираната система и

2.5 Спецификация на поведението на агентите

Спецификацията на поведението на агентите може да се разгледа като съставена от два елемента. Първият от тях трябва да даде правилна представа за действията на агента. Действията са основополагащи елементи за поведението на агента – те могат да причинят модификации в средата или в другите агенти, участващи в модела. Възможните решения за представяне на действията на агента са:

- Трансформация на общото състояние на системата;
- Локална модификация на средата;
- Реакция на влиянието, съответстващо на възприятието на агента;
- Изпълнение на изчисления, вътрешно за агента, за обработка на получените данни и за определяне на новото му състояние;
- Физическо преместване на агента в пространствената структура на средата.

Другият елемент в спецификацията на поведението на агента е механизмът за ефективен избор на действието, което трябва да бъде изпълнено, съгласно постъпилото възприятие и вътрешното състояние на агента. Фундаментална характеристика на агента е способността му да взема независими решения. Това изисква от агентите да са активни и да планират поведението си, вместо да бъдат изцяло пасивни компоненти в модела.

Вътрешната структура, отговорна за избора на действие от агента, се означава като негова архитектура. Терминът „архитектура на агента“ е въведен от Russel and Norvig 2010 и се отнася до модела на вътрешната му структура, която е отговорна за избора на действие. Възможни са различни архитектури

на агентите, що се отнася до определянето на специфичното поведение на агента и те най-общо се класифицират като реактивни, когнитивни или хибридни.

Реактивните агенти са елементарни агенти (най-често без памет) с определена позиция в средата. Реактивните агенти изпълняват действията си като последователност от възприемане на стимули, постъпващи от другите агенти и от средата – като цяло спецификацията на поведението на тази категория агенти включва съвкупност от правила „условие – действие“. Тази спецификация може да бъде допълнена със стратегия за избор на действие, в случаите, когато могат да бъдат активирани повече от едно действие. В този случай мотивировката за избор на действие нормално произтича от събитие, настъпило в средата.

Когнитивните агенти се характеризират с по-сложен механизъм за избор на действие и тяхното поведение се основава на така наречените „ментални“ състояния. Последните представят знанията на агента относно средата и по възможност – „спомените“ му относно опит от миналото. Когнитивните агенти за всяка възможна редица от възприятия се опитват да намерят съответна редица от действия, която им позволява постигането на съответната цел. Когнитивните модели, обикновено дефинирани в контекста на задачите за планиране, предоставят изрично символно на външния свят (включително и другите агенти) и техните решения се основават на логически разсъждения и манипулиране на символи. Типичен представител на тази група агенти са включените в така наречените BDI-модели (beliefs, desires and intentions).

Хибридната архитектура е дефинирана като комбинация от другите две. Агентът може да има многослойна архитектура където когнитивните слоеве са базирани на символното представяне на окръжаващия свят, те генерират планове и вземат решения, докато реактивните слоеве изпълняват действия като резултат от възприемането на външни стимули. Структурата на слоевете може да бъде както вертикална, така и хоризонтална. В хоризонталната структура слоевете не се свързват с приоритети и резултатът, получен от различните слоеве може да бъде комбиниран, за да се определи поведението на агента. Когато слоевете са организирани вертикално, реактивните слоеве имат по-висок приоритет от когнитивните, които се активират само когато никой реактивен слой не се активира от външен стимул.

МАСМ могат да бъдат съставени от когнитивни агенти (като цяло – неголям брой), всеки от които обработва собствен модел за представяне на знания, определящ поведението на агента и взаимодействието му с другите агенти и със средата. Съответно – могат да бъдат създадени и многоагентни модели, съдържащи само реактивни модели. Този тип системи се основават на предположението, че не е необходимо отделните агенти да притежават индивидуален интелект, за да демонстрират сложно поведение на системата. Моделите с реактивни агенти обикновено са по-устойчиви и по-толерантни на откази от другите агентно-базирани системи. Други предимства на системите с реактивни агенти са гъвкавостта и адаптивността, за разлика от някои системи, реализирани чрез когнитивни агенти. Съчетаването на двата типа агенти има идеята да се комбинират и усилят техните предимства.

2.6 Представяне на взаимодействието между агентите

Взаимодействието между агентите е ключов аспект в МАСМ и е тяхна присъща характеристика, която им позволява да решават проблеми или да постигат целите си. То отразява същността на моделирането като факта, че общата динамика на моделираната система се получава като резултат от взаимодействието и поведението на включените в нея части. Строго казано, за някои разновидности на МАСМ общата динамика на системата се определя единствено от сумарния ефект на локалните поведения и взаимодействия така, че не винаги може да се говори за възникващо поведение, когато се говори за МАСМ. Предположенията, които са в основата на конструкцията на модела на взаимодействие (или в избора на съществуващ модел за проектиране и изпълнение на конкретно приложение) са твърде съществени и имат дълбоко въздействие върху дефинирането на самите агенти (напр. преводач от специфичен език, приемник на сигнали и т.н.). Очевидно е, че механизмите на взаимодействие оказват

сериозно въздействие върху моделирането, проектирането и реализирането на приложения за конкретен вид МАСМ, които на свой ред се основават на специфициран модел на взаимодействие.

Налице са **два основни аспекта** в моделирането на взаимодействието между автономните агенти:

- Кой с кого е свързан?
- Какви са механизмите, определящи динамиката на взаимодействието?

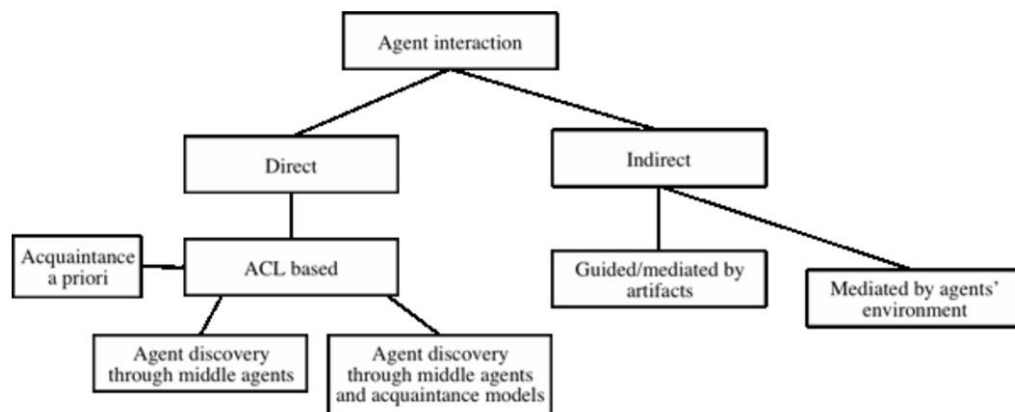
Отбелязват се и две основни разновидности на модела на взаимодействието между агентите в МАСМ:

- Директно взаимодействие;
- Индиректно взаимодействие.

Директното взаимодействие между агентите предполага, че моделът не включва никаква форма или абстракция на комуникационен канал. Комуникацията в този случай се извършва чрез обмен на съобщения, а комуникиращите партньори са изрично упоменати в нейния модел. Свързаният с този модел механизъм предвижда съществуването на протокол за обмен на съобщенията от типа „от точка до точка“ (point-to-point).

Моделът на **индиректно взаимодействие** предполага съществуване на специална среда, създадена за да осъществи комуникацията между агентите. Някои модели на индиректно взаимодействие включват тези механизми чрез допълване на средата, в която функционират агентите. Строго погледнато взаимодействието между агентите като цяло е индиректно дори и когато се прилага директна комуникация. На практика в повечето от тези случаи се прилага комуникационна структура, поддържаща надежден механизъм за предаване на съобщения от точка до точка.

Концептуалната таксономия на познатите модели за взаимодействие между агентите е показана на фиг. 4.

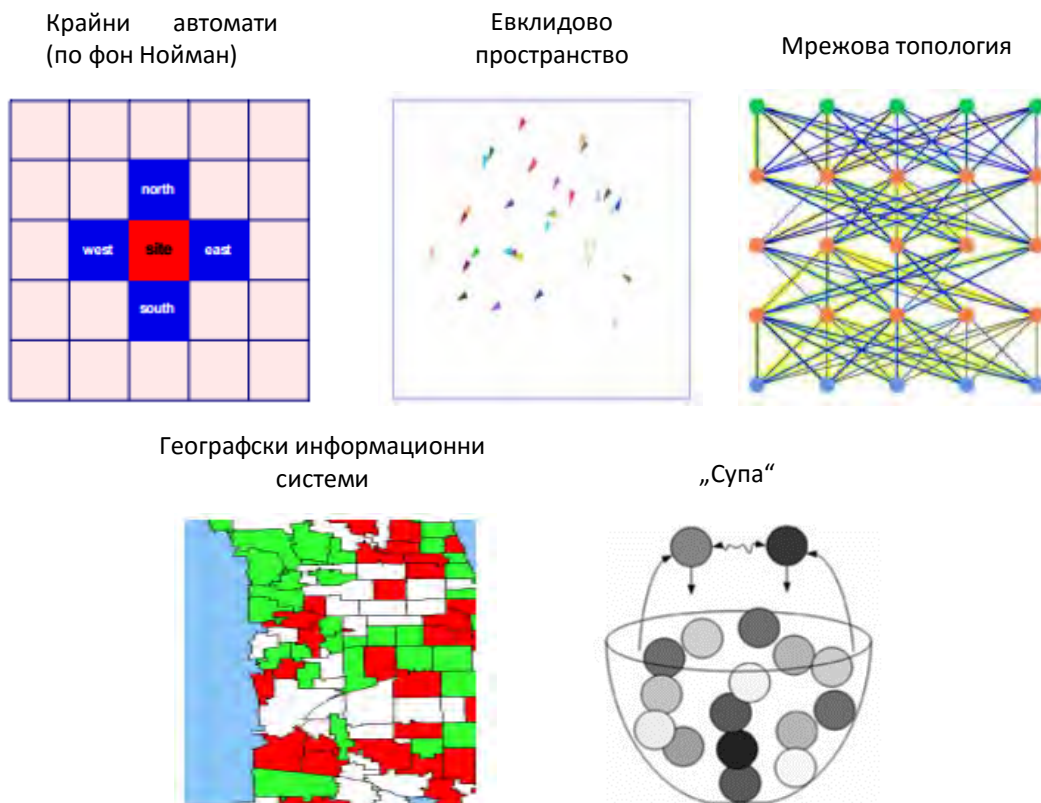


Фигура 4: Таксономия на моделите на взаимодействие между агентите (Bandini 2009).

2.7 Топология на взаимодействието

Топологията на връзките между агентите определя как агентите са свързани помежду си. В много случаи агентите могат да бъдат свързани едновременно в няколко топологии – например топология на пространствените връзки и топология на връзки от друг характер (професионален, социален, технологичен и др.). Дефинирането на топологията пояснява и понятието „съседство“ между агентите. То включва тези от тях, с които конкретния автономен агент може да контактува непосредствено.

Схеми на типични топологии на взаимодействие на агентите са показани на фиг. 5.



Фигура 5: Типични топологии на връзките между агентите в МАСМ.

2.8 Среда на агентите

Средата е тази концепция в многоагентния модел, която определя условията за функциониране на агентите, за тяхното поведение и за взаимодействието им с други агенти. Едно определение на понятието „среда“ се основава на посочването на нейните специфични отговорности:

- Отразяване, ревизиране или управление на структурата на физическата или социалната конструкция на цялата система;
- Вграждане и поддържане на регулиран достъп до обекти и части от системата, които не са представени като агенти;
- Възприятие на агента и разположено действие (трябва да се отбележи, че взаимодействието между агентите трябва да се разглежда като конкретен вид действие);
- Осигуряване на възприятията на агентите и поддържане на изпълняваните от тях действия (включва и взаимодействията между агентите като специфична категория действия);
- Поддържане на вътрешната динамика на модела (системата) (промяна на наличните ресурси, пренасяне на сигнали и др.);
- Дефиниране и налагане на правила.

2.9 Многоагентната симулация и статистическия анализ

Следва да се обърне внимание на факта, че многоагентните модели и численият (статистически) анализ на явленията и процесите не са взаимноизключващи се. В реалните изследвания те често се

допълват взаимно като подобряват качеството на симулационния модел. Многоагентните модели и численият анализ се използват на различни равнища на моделиране. Първите намират приложение като аналогично съответствие на реалната система. От тяхната реализация може да се извлекат общите параметри, които да бъдат изучени и включени в математически модел. В многоагентната симулация числените данни и статистики не се пренебрегват, а се използват като оценяваща процедура за сравняване на резултатите, постъпващи от симулиращото средство, с данните от наблюденията от реално протичащия процес. Такива математически модели се използват на макро-равнище, докато МАСМ се използват като свързващо звено за обобщаване на последиците от индивидуалното поведение и взаимодействието на агентите.

3. Методологически проблеми на софтуерната реализация на МАСМ

Методологическите проблеми на реализацията на многоагентните симулационни системи са свързани с особеностите на изграждането им под формата на софтуерни продукти и решения. Те се отнасят до специфицирането на основните изисквания към системата за многоагентно моделиране, изискванията към структурата и архитектурата ѝ, определяне на основните ѝ компоненти и техните функционалности, формата на представяне на резултатите и др.

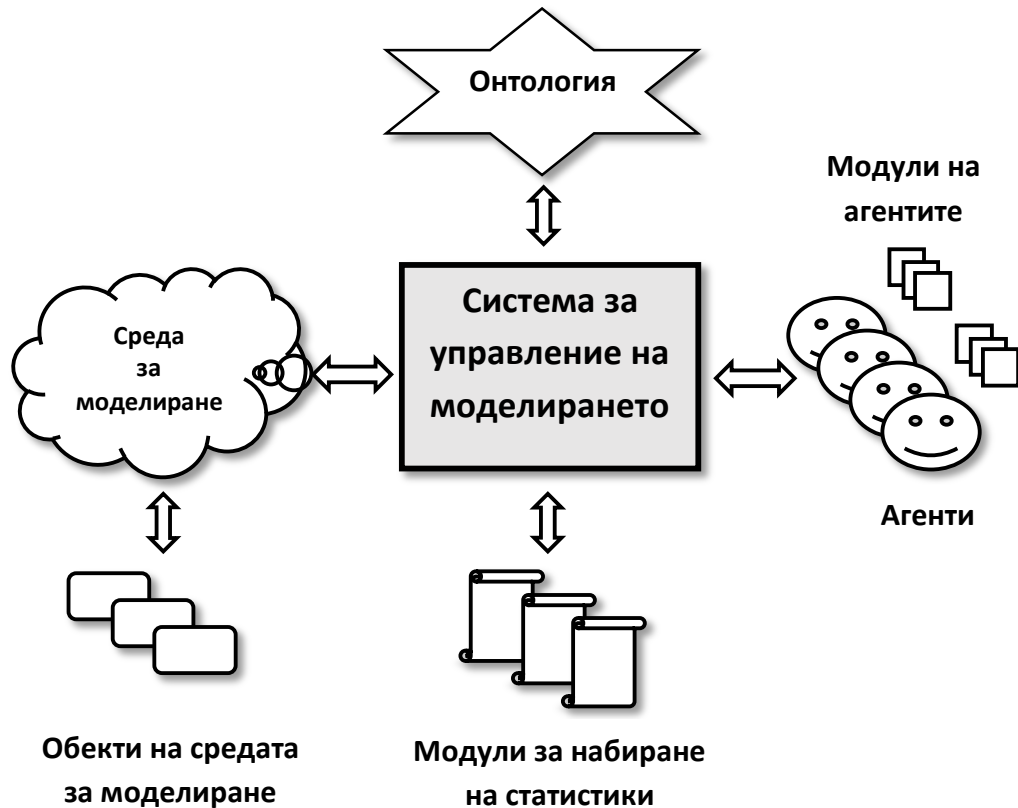
3.1 Изисквания към софтуерната система за многоагентно моделиране

Основните изисквания към система за многоагентно моделиране от гледна точка на стандартите и технологиите на отворените системи:

- **Разширяемост** – системата трябва да притежава модулна структура с определена степен на сложност. Необходимо е да бъде налична възможността за допълване и разширяване на атрибутите и на поведението на агентите чрез добавяне на допълнителни функционални компоненти.
- **Преносимост** – системата трябва да бъде гъвкава, устойчива и преди всичко независима от технологията и конкретната архитектура. Това спомага не само за удобството и лекотата на пренасяне на системата, но също и за съпровождането и в различни среди и върху различни платформи.
- **Интегрална оперативност** – системата трябва да осигурява поддръжка на интеграция с други софтуерни компоненти. Това произтича преди всичко от нееднородната природа на процеса на моделиране – и средата за моделиране, и агентите, и алгоритмите за поведението и за комуникацията им, и механизмите на планиране на събитията не са определени предварително. Нещо повече – те могат постоянно да се разширяват, изменят, да се усъвършенстват или просто да се подменят от изследователя.
- **Простота на използването** – управлението на системата за моделиране трябва да бъде споделена по съвсем естествен начин между различните категории потребители: крайни потребители, експерти, инженери на знания.
- **Възможност за паралелно изпълнение и за управление с отдалечен достъп** – ефективното моделиране изисква поддържането на изчисления в хетерогенна среда. За тази цел е необходимо да е налице отворена спецификация на всички протоколи и външни интерфейси за организиране на взаимодействието между компонентите ѝ.
- **Възможност за динамично свързване на програмни модули** – да са налице предпоставки за добавяне и промяна на програмни компоненти в процеса на изпълнение на имитацията, без прекратяването и възобновяването му.

3.2 Структура на системата за моделиране

Основните компоненти, съставляващи системата за моделиране, са показани на фиг. 6.

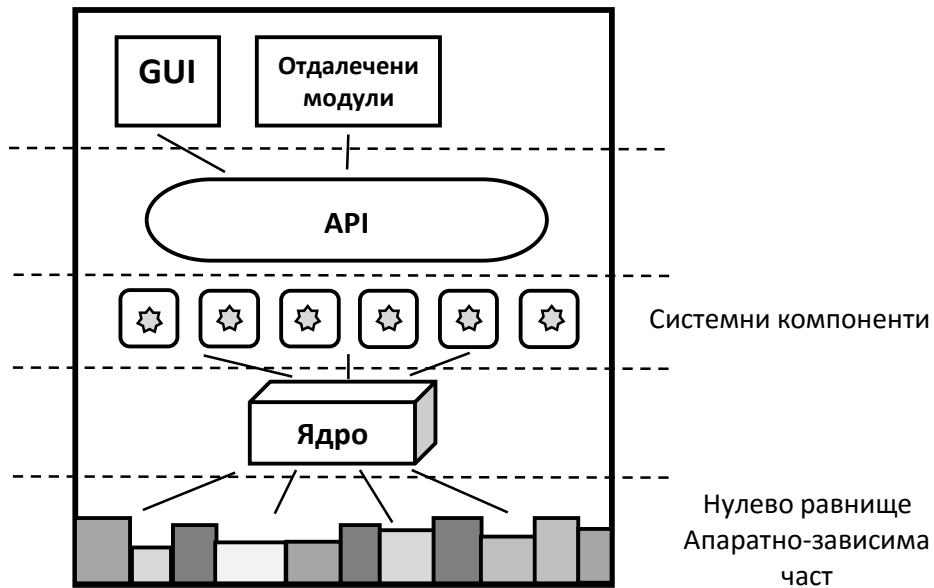


Фигура 6: Структура на системата за моделиране.

Системата за управление контролира протичането на симулационния процес и се състои от няколко равнища:

- **Нулево равнище** – част от архитектурата зависи от хардуера и от операционната среда – по същество осигурява изпълнението на функциите на ядрото на системата.
- **Ядро** – съдържа основните функции за управление и координиране на компонентите, съставляващи системата. Функциите следва да оперират с абстрактни категории на равнището на интерфейсите, т.е. не следва да зависят от конкретната реализация.
- **Системни компоненти** – съдържат методи, алгоритми, схеми и структури на данни за управление на хода на имитационния процес с помощта на функциите на ядрото.
- **Приложен програмен интерфейс (API)** – прослойка за достъп до външни компоненти, системни компоненти и до функциите на ядрото. Фактически съдържа имена на процедури, по които външните модули могат да вземат участие в управлението на имитационния процес.
- **Компоненти на графичния потребителски интерфейс (GUI)** – могат да се използват както апаратно зависими интерфейси, така и специализирани отворени библиотеки (OpenGL).
- **Равнище за отдалечен достъп** – допълнително спомагателно (прокси) равнище, отговарящо за отдалечено извикване на процедури (RPC) в системите с разпределено моделиране. Това равнище позволява на останалите компоненти на системата да имат еднотипен достъп до локалните и отдалечените обекти. Равнището предоставя общи интерфейси за маршализация (представянето на обектите в преносим и възстановим вид) и за пренасочване на извикването на обекти.

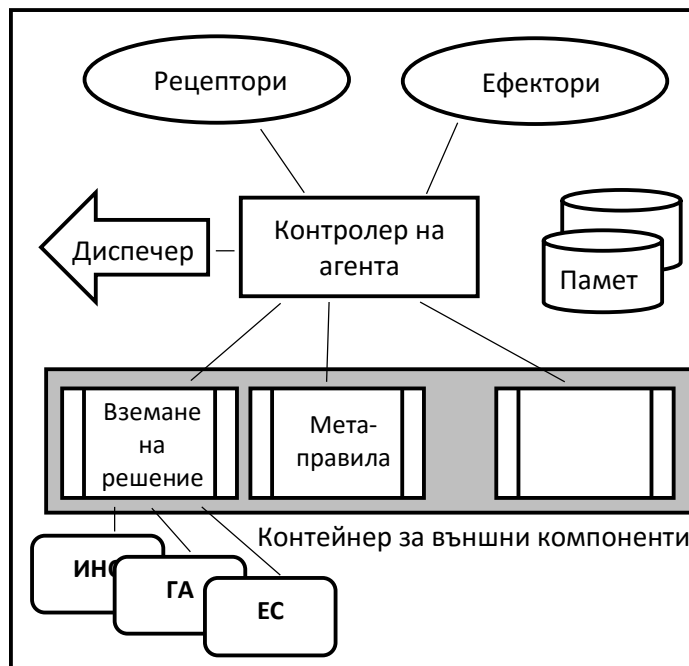
Общата структура на системата за управление е показана на фиг. 7 .



Фигура 7: Структура на системата за управление.

3.3 Агенти и функционалните им модули

Най-ефективният подход за реализиране на агентите е обектно-ориентирания. Агентите се представят като обекти, които ползват интерфейсите, предоставяни от ядрото и от системните компоненти. Наред с това агентите предоставят собствени интерфейси за управление и за набиране на статистики. Модулната архитектура на агента е представена на фиг. 8 .



Фигура 8: Функционална структура на агент.

Архитектурата на агента включва централен компонент-контролер, отговорен за процеса на функциониране на агента. Същият получава информация за средата на моделиране от рецепторите. Въз основа на получените данни и на наличните данни в паметта на агента, контролерът предава управлението на функционалните модули.

Функционалните модули са външните присъединяеми компоненти, които отговарят за структурата, за поведението и за семантиката на агента. Те могат да се реализират под формата на база от знания, механизми за вземане на решение, механизми за логически извод, модули за събиране на информация, невронни модели, модули за вземане на решение в условия на неопределеност и др. Те се представят във вид на функционални блокове, съдържат вход, изход, подсистема за управление и средства за реализация.

Активните действия от агента се предприемат от ефектори след обработката на постъпилите данни от функционалните модули. Информацията за действията на агента се предава на системата за управление на моделирането от модула „диспечер“, който представлява свързващото звено на агента с тази система.

3.4 Модули за набиране на статистики

Модулите за набиране на статистики са по същество системни агенти, за които е достъпна цялата информация за всички агенти в средата на моделиране. Освен към агентите, те имат достъп и до регистрираните техни външни модули.

3.5 Онтологии

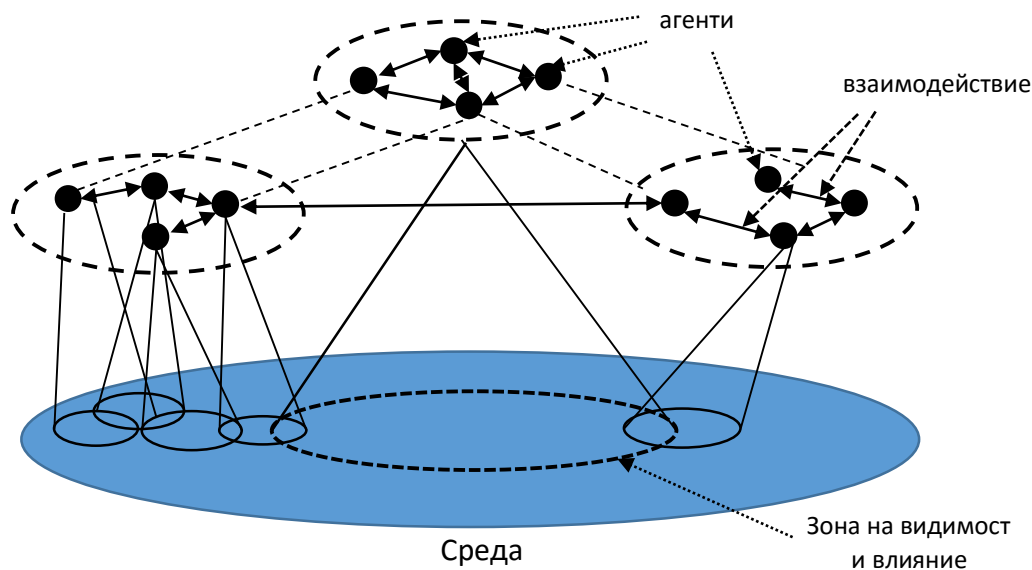
Включването на онтологии в многоагентния симулационен модел се налага поради инвариантността на моделирането спрямо предметната област. Онтологичният подход е утвърдено средство за спецификация на предметната област. Той дава възможност потребителят, агентите и компонентите на модела да оперират с общи понятия. Онтологиите могат да бъдат представени в утвърдени от консорциума W3C езици за описание като OWL, RDF и др.

3.6 Среда за моделиране

Средата за моделиране в софтуерната симулационна система е реализация на по-абстрактно отбелязаната по-горе „среда на агентите“. Активните агенти функционират самостоятелно в тази среда, в нея се намират и пасивните обекти, които се контролират от системата за управление. Средата, като софтуерен компонент, трябва да предоставя богат набор от функции за изменение на своето състояние. Това ще даде на агентите възможността динамично за изменят, пораждат и унищожават обекти в средата.

Формите на разработване на средата са следните (фиг. 9):

- Модел на граф, определящ топологията на взаимодействие на агентите;
- Пространствен модел – представен като пространствена мрежа.



Фигура 9: Средата за моделиране в контекста на взаимодействието между агентите.

Изборът на формата на разработване на средата зависи от типа на поставената задача за моделиране. В по-простите случаи, ако е необходимо единствено да се следи взаимодействието на агентите, комуникацията между тях и обменът на някакъв ресурс, по-удобна е формата на граф. Това е полезно при моделирането на системи за управление, логистични вериги, изследване на пазарната конкуренция и т.н. Ако в задачите е включено и пространственото преместване на агентите, то тогава се налага използването на пространствен модел – това е полезно при моделирането на транспортни комуникации и процеси, на пътници и товаропотоци, на потоци от клиенти в търговски центрове и подобни структури, социални средища или на поведението на хора в критични ситуации.

3.7 Представяне на данните в симулационните системи

Възможните начини за представяне на данните в многоагентните симулационни системи са разнообразни. За хетерогенни и разпределени системи се оказва удобен подходът, използващ JSON-подобни структури. От съображения за многоезичност се препоръчва използването на кодировка на символните данни във формат UTF-8.

Представянето на данните във външен носител предполага използването на цялото многообразие от текстови и двоични формати, изображения, включително и на съвременните системи за управление на бази от данни.

4. Основни типови области на приложение на МАСМ

Многоагентните симулационни модели са добре приспособени за изследването на разнообразни сложни системи от различни области на стопанския и обществения живот, а също и системи в областта на биологията, физиката и други частни науки. С тези модели могат да бъдат обяснени причините и динамиката на сложни явления като разпространение на терористична агресия, военни конфликти, движение на работната сила, сривове на фондовата борса и др. С оглед илюстрация на основната тема тук ще бъдат отбелязани някои от придобилите популярност приложения на този подход.

4.1 Транспортни проблеми и логистика

Транспортните процеси са изключително благодатен обект за изследване чрез многоагентни симулационни модели (Милакина 2013), (A primer... 2013). Транспортните системи притежават

специфична свързаност, техническа и технологична структура и времева динамика. Те са предназначени да осигурят преместването в пространството на значителни обеми материални продукти и пътници при изпълнението на определени изисквания и специфични ограничения. Транспортните потоци (пътнико- и товаропотоци) се характеризират с неравномерност и с влиянието на случайни фактори. Най-типичните случаи, при които се прилагат многоагентни симулационни модели в тази стопанска област са:

- проектиране на нови и диагностика на съществуващи транспортни системи и подсистеми;
- изследване на взаимодействието между различните видове транспорт по отношение на общата структура на превозите, разпределението им и комуникацията между видовете транспорт при обслужване на общи транспортни потоци, комбинирани и контейнерни превози;
- изследване на ефективността на обработка на товаропотоците в крупни и сложни транспортни възли;
- изследване на логистични вериги от доставчика до потребителя, включващи системи за складиране и средства за управление на запасите;
- товарно-разтоварни фронтове – специализирани и с общо предназначение;
- големи пътнически транспортни центрове – гари, автогари и др.;
- изследване на условията за изпълнение на графика за превозите във времето и др.

Като агенти в моделирането на тези транспортни процеси могат да бъдат представени отделните стопански единици, елементите на технологичните вериги, товарните и транспортни единици и др.

Многоагентният симулационен подход е добре известен в областта на транспортните изследвания, където категорично е потвърдил своята ефективност.

4.2 Социология и обществени науки

Симулационният подход има своята дълга и сравнително успешна история в социологията, започвайки от изследванията на Forester през 1973 г. Многоагентните симулационни модели позволяват на социолозите да проучат реалните взаимодействия в социологическите изследвания и за ориентирани на социологическите анализи от съвкупни и структурни фактори към такива, представени под формата на агенти (Drogoul 1992), (Макаров 2009). Те подобряват реализма на микроповеденческия базис на социологическите модели, като допълват аналитичното моделиране и анализите, повлияни от теорията на игрите. На второ място – те помагат да се оцени ролята на социалните структури в ограничаването на индивидуалното поведение по-точно, отколкото в *variable-based sociology*. В крайна сметка резултатите от симулацията дават много по-динамичен поглед върху взаимодействието между индивидуалното поведение и социалните структури, като по този начин този начин се насърчава един по-обоснован, еволюционен и основан на реалните процеси подход към социалните факти. Вниманието тук е насочено преди всичко към социалните норми, социалното влияние и динамиката на културата в различни дисциплини като поведенческите науки, социологията и икономиката. Може обосновано да се твърди, че приложението на многоагентни симулационни модели може да помогне на социологията да постигне по-строги научноизследователски стандарти, като насърчава моделирането на средата и осигурява по-строга интердисциплинарна интеграция. В последно време са постигнати някои методологични подобрения по отношение на стандартизацията, репликацията и валидирането на използваните в социологията симулационни модели, с което се очертава разширяване на полезното им на приложение в бъдеще.

Интересно е да се отбележи приложението на агентно-базираните модели в някои сродни области на социалните науки, като например археологията и антропологията (Masal 2008). Приложението на агентно-базираните модели в тези случаи води до създаването на разширени симулации на древни цивилизации, които помагат да се проследи тяхното развитие – периодите на прогрес, разцвет и упадък. Такива модели са използвани за да се опише просперитетата на древните градове в Месопотамия и да се осмислят социалните фактори и факторите на средата, в които са протекли съответните социално-исторически процеси.

4.3 Разпределени системи, телекомуникации и компютърни мрежи

Многоагентните симулационни модели намират изключително полезно приложение в разработването на различни комуникационни инфраструктури, в т.ч. и на компютърни мрежи. Те дават възможност да се оцени предварително ефекта от инвестиране на средства в тяхното изграждане или разширение, да се определи целесъобразността на разпределение на изчислителните ресурси в мрежата, да се определи целесъобразността на комуникационните връзки и тяхното качество, да се оцени качеството на функциониране на комуникационната структура в различни условия на натовареност и при възникването на нетипични ситуации. Получените от моделирането резултати се използват за намиране на решение, отговарящо на целите и потребностите на разработчиците и потребителите на системите за пренасяне и обмен на информация.

Един важен аспект на приложение на многоагентните симулационни модели в тази област е свързан с анализ на сигурността и безопасността на комуникационните мрежи и на разпределените компютърни системи и на ефективността на средствата, използвани за удовлетворяване на параметрите на кибер-сигурността.

Агентите, моделиращи функционирането на компютърни и комуникационни системи могат да бъдат определени лесно поради спецификата на инфраструктурата на този тип технически системи. Обикновено това са техническите компоненти, изискващи и предоставящи достъп до данни и ползващи комуникационната мрежа.

4.4 Икономически процеси и пазарни механизми

Системите с МАСМ се използват както в теоретични и академични изследвания, имащи задача да проверят валидността на някои теоретични предположения и твърдения, така и в практическите разработки, в които акцента е върху проиграването на възможни решения, планирането и прогнозирането на дейности и резултати с оглед постигане на желаната икономическа ефективност от стопанските субекти. Използването на системи с МАСМ може да бъде приложено върху различни равнища на общност и детайлизация на процесите – международни икономически връзки, поведение на пазара на енергоносители и критични ресурси, влиянието на монополите, прогнозиране на потребителското поведение, определяне на дългосрочна търговска политика и стратегия, прогнозиране на дългосрочния икономически резултат и т.н.

МАСМ успешно се използват и на по-ниските и конкретни икономически равнища – при моделирането на дейността на отделни икономически звена и субекти и при проверка и валидиране на плановете и решенията за тяхното икономическо и технологично развитие.

Агентите, в симулационните модели, описващи икономически процеси и механизми, най-често представят стопански субекти или елементи от организационната им или технологична структура. В някои случаи агентите могат да представят и по-обща концепции, отнасящи се до икономически отношения на глобално равнище, включително и някои политически отношения, определящи състоянието и развитието на международните пазари.

4.5 Отбрана

Дейността по осигуряване на отбраната на една страна е многоаспектна и обхваща широк кръг области. Съвременните информационни технологии приличат вниманието на военните институции (напр. Сиорра 2004) които се явяват като едни от най-крупните инвеститори на проекти в областта на изкуствения интелект, роботиката и многоагентните системи. Типично приложение МАСМ намират в инструменти за моделиране на военни операции за проиграване и оценка на различни варианти на протичане на бойните

действия (Middleton 2010). Симулационните системи от този тип използват МАСМ за разработка на сценарии както на крупномасштабни военни сблъсъци, така и на локални конфликти, а специално разработения тримерен графичен интерфейс позволява привличането на експерти от различни области в процеса на обсъждане на резултатите от симулацията. Системите за моделиране дават възможност да се оперира с различни параметри (ландшафт, релеф, брой, вид и разположение на бойните единици, укрепване и защита, интензивност на водене на бойните действия, ресурси и др.).

Други приложения на многоагентните симулационни модели в отбраната са оценка на уязвимостта и последиците от поражение на жизненоважни обществени инфраструктури и системи – комуникации, енергоснабдяване, транспорт, решаване на задачи на логистичната поддръжка на военните действия и др.

4.6 Медицина и здравеопазване

Възможностите за приложение на МАСМ в медицинската практика са изключително важни поради обществената значимост на този вид дейност и поради значителните средства и ресурси, които са инвестирани в нейното осъществяване. Тук влиза решаването на административно-организационни задачи, прогнозиране на промени в здравния статус на обществото и развитието на патогенни фактори, развитие на мрежата от здравни центрове, профилактика и превенция, спешна медицинска помощ, проследяване на разпространението на епидемии и ефективността на средствата за борба с тях и др. (Chakraborty 2014).

4.7 Компютърни игри

Сами по себе си компютърните игри често представляват симулация на някаква динамична многоагентна среда – реална или въображаема (Namee 2009). Многоагентното симулиране е естествен инструмент за разработването им, което води началото си от създаването на известната „Игра на живот“ от Джон Конуей (Game of Life, John Conway). Типичен пример за съвременна игра, базирана на многоагентното моделиране е SIMS (разработена от EA Maxis и публикувана от Electronic Arts). Необходимо е да се отбележи, че разработването на многоагентно-базирани игри далеч надхвърля развлекателното им предназначение. Така наречените „дидактически игри“ са ценен помощник в илюстрирането и усвояването на нови знания, стратегическите игри пък са инструмент за проиграване на сложни ситуации с наличието на тежки ограничения и възможни конфликти.

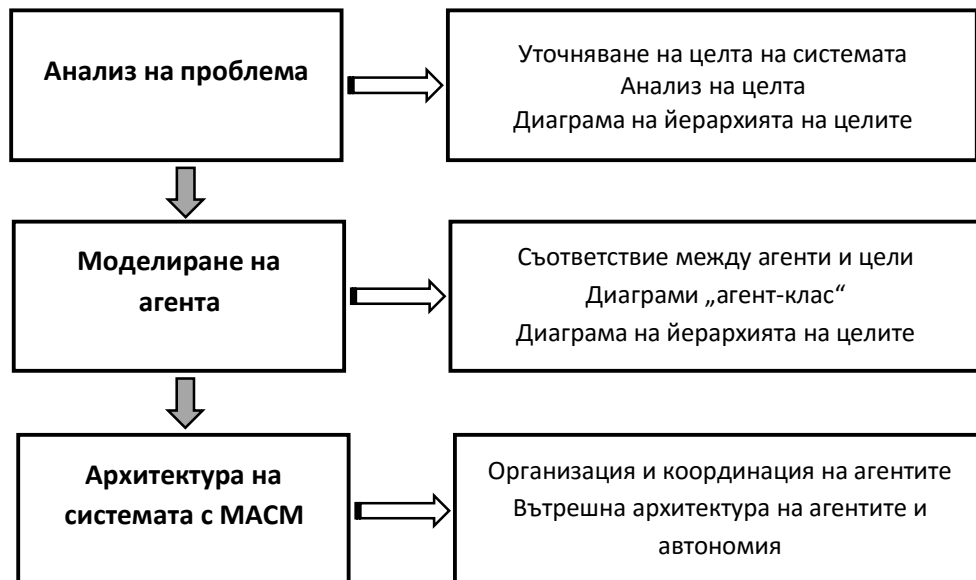
5. Принципи на построяването на многоагентния симулационен модел

При разработването на МАСМ следва да се вземат под внимание следните обстоятелства:

1. Каква е специфичната задача, която трябва да бъде решена чрез модела? Какви предимства има моделът пред други модели, съставени с други средства?
2. Кои са агентите в модел? Кой взема решенията в системата? Кои са елементите, които имат поведение? Кои са описателните и динамични атрибути на агентите?
3. Коя е средата, в която функционират агентите? Как агентите взаимодействат със средата? Притежава ли агентът мобилност спрямо средата?
4. Кои характеристики на поведението на агента представляват интерес? Какви решения взема агентът? Какви действия може да предприема? Какво поведение следва от решението на агента?
5. Как агентите взаимодействат един с друг и със средата?
6. От къде постъпват данните в модела? Как се получават данните, описващи моделираното поведение на агентите?
7. Как може да се валидира моделът?

Отговорите на тези съществени въпроси са систематизирани в архитектурно-базирания подход, представен в (Parka 2005), определящ трите основни фази за построяването на система, основаваща се на МАСМ (фиг. 10):

- Анализ на проблема (първа фаза) ;
- Моделиране на агента;
- Архитектурно решение на системата.



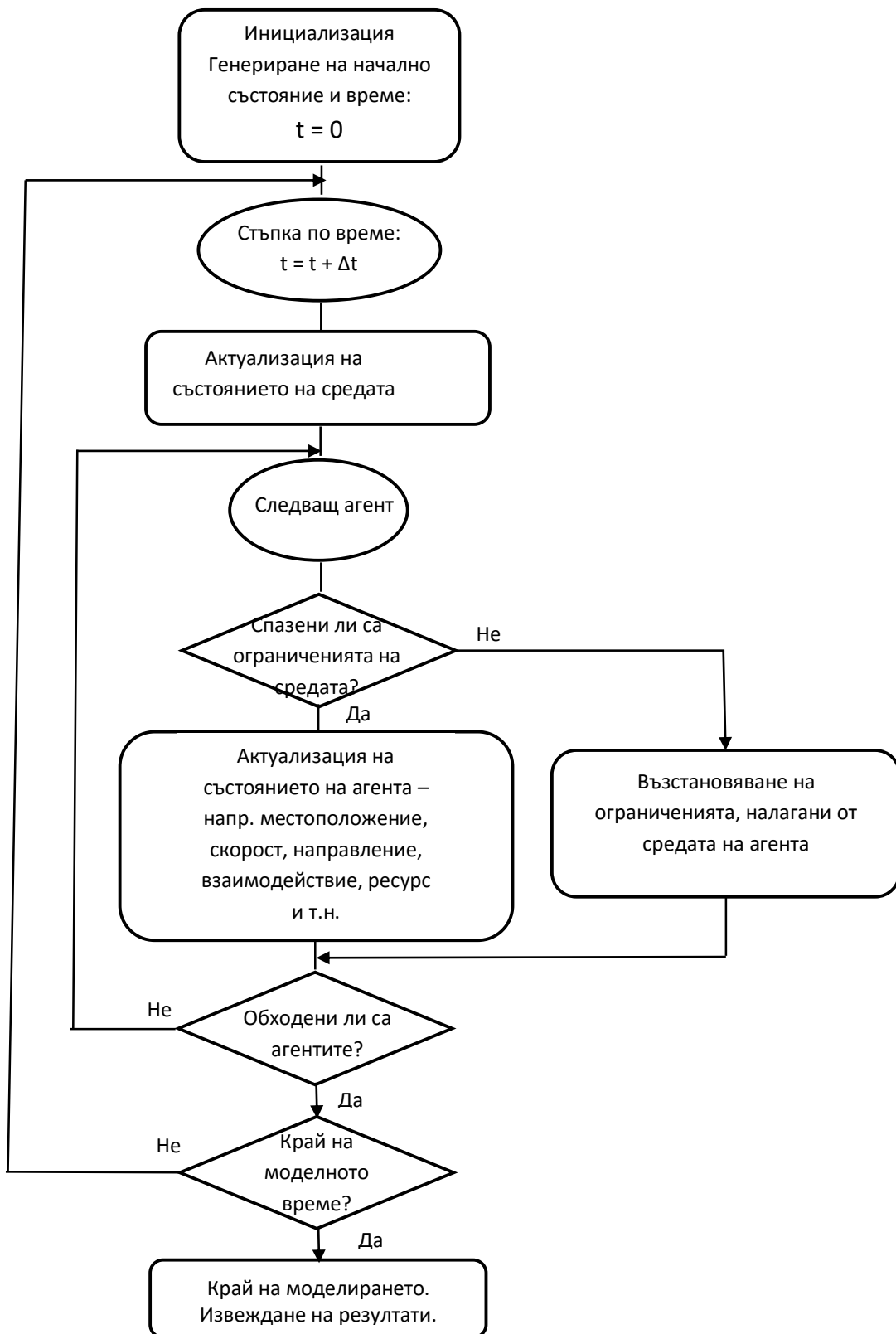
Фигура 10: Архитектурен процес на разработване на многоагентна система.

Основната цел на **първата фаза** е да се създаде абстрактна картина за функционирането на системата, което да послужи като отправна точка за разработването на модела ѝ. Дейностите, предприети в тази фаза, се отнасят до разбирането на приложната област, определянето на целите и границите на системата и свързването им с дизайна на агентите. Анализът на проблема е съществен за установяването на границите на системата и за анализиране на потребителските изисквания. Крайният потребител на системата обикновено среща известни затруднения при описанието на абстрактните изисквания към системата. Целево-ориентираният подход към анализа на изискванията е ефективно средство за осъществяване на анализа. Концепцията за целта е централна за разбирането о за дизайна на системите, в частност – на агентно-базираните системи

След уточняване на разбирането за приложната област и целите на системата се преминава към следващата фаза - **моделирането на агентите**. В тази фаза се извършва идентифицирането на агентите така, че да постигнат своите цели и да се определят характеристиките на взаимодействието им. За всеки идентифициран агент се моделират вътрешното му поведение и цел. Въз основа на анализирани цели агентите трябва да бъдат идентифицирани (разграничени) и техните взаимодействия – моделирани.

Архитектурното решение на моделиращата система е крайната фаза на процеса, която се фокусира върху вътрешната архитектура на агента и върху установяването на съвкупност („общност“) от агенти, които си сътрудничат взаимно, докато поддържат автономията на по-общ и по-голям компонент от системата. Координацията и комуникацията между агентите е критична за успешното функциониране на общността от агенти.

Най-обща схема на функционирането на един софтуерен симулационен модел е показана на фиг.



Фигура 11: Обща логическа схема на изпълнение на софтуерен симулационен модел.

6. Софтуерни средства за симулационно моделиране

По принцип няма ограничения върху използваните техники и инструментални средства за изграждане на програмни модели и системи за симулация. Агентно-базираните модели могат да бъдат разработени чрез универсални езици за програмиране с общо приложение, но могат да бъдат създадени и със специализирани софтуерни инструменти, които са адресирани към специфичните изисквания на моделирането на агентите. Агентно-базираното моделиране може да бъде изпълнено както на малки настолни системи, така и с използването на големи разпределени клъстери.

Следва да се отбележи, че обектно-ориентираното програмиране (ООП) е широко прието като най-разпространената парадигма за софтуерни рамки на системи с МАСМ. ООП предлага естествена и проста техника за моделиране, която се разбира и възприема лесно от софтуерните специалисти, практикуващи обектно-ориентираните шаблони за проектиране. Агентите могат да бъдат разглеждани като самостоятелно определени обекти, способни да избират своите действия самостоятелно, като се основават на възприятията от окръжаващата ги среда. Използването на класове и методи за представянето на агентите и на поведението им е съвсем естествено. Поради това болшинството от софтуерни рамки за системи с МАСМ се основават на обектно-ориентираните принципи, а някои използват и концепциите на UML за спецификация на системи и агенти на високите абстрактни равнища. Налични са и API, предоставящи инструменти за описание и разработване на модели.

Тук вниманието ще бъде насочено към няколко известни и разпространени софтуерни инструменти за многоагентно моделиране които отбелязват най-характерните черти на съвременните концепции за създаване на автоматизирани средства за този тип симулация (Alan Rob 2017). Подбрани са целенасочено един класически инструмент, определил в голяма степен облика на съвременните специализирани в многоагентното моделиране продукти – Swarm, един известен със степента на технологичната си реализация и предимствата си търговски продукт – AnyLogic и два свободно достъпни безплатни софтуерни пакета, получили също широко разпространение в професионалните среди – Repast Simphony и NetLogo.

Едно обобщение за ползата от средствата за многоагентно симулационно моделиране набляга на следните техни страни:

- Те предоставят определено ниво на абстракция, в което програмистът може да разработва своите обекти;
- Те включват различни функционалности на визуалното програмиране, които спестяват време и правят разработването по-лесно и носещо повече удовлетворение;
- Предоставят възможност за тестване и настройване по време на изпълнение;
- Позволяват използването на предварително създадени класове и библиотеки от класове, създадени при други случаи.

6.1 Swarm

Това е първото широко използвано софтуерно средство, предназначено за многоагентно моделиране. Той е разработен в института Санта Фе през 1994 г. и е специално ориентиран към задачи на artificial life и изучаване на сложни проблеми. Първоначално Swarm е разработен за многоагентна симулация на сложни адаптивни системи. До неотдавна проектът бе базиран като разработка на института Санта Фе, но в последно време (след 1999 г.) развитието и управлението му са под контрола на некомерсиалната Development Group, която има най-съществено участие в поддържането на продукта.

Swarm е проектиран като общ език и като инструментално средство, предназначено за широка употреба в разнообразни научни области. В него е заложен общ концептуален подход за разработване на агентно-базиран симулационен софтуер. Ключова концепция за Swarm е, че софтуерът трябва да имплементира както самия симулационен модел, така и да предостави виртуална „лаборатория“ за

провеждане и за наблюдение на числените експерименти с модела. Друга ключова концепция на продукта е конструирането на модела като йерархия от „рояци“ (swarms). Всеки рояк е група от обекти и включва график за изпълнение на действията, които тези обекти изпълняват. Този подход впоследствие се развива в концепциите „контекст“ и „проекция“, включени в продукта Repast Simphony. Всеки рояк може да включва рояци от по-ниско равнище, чиито графици са интегрирани в графиците на рояците от по-високо равнище. Простите модели притежават модели на рояци от ниско равнище в рамките на „рояци-наблюдатели“, които присъединяват необходимите за наблюдението инструменти към модела.

Основният акцент върху представянето на Swarm тук е свързан с обстоятелството, че той маркира базисните характеристики и особености на съвременните софтуерни продукти за многоагентно симулиране.

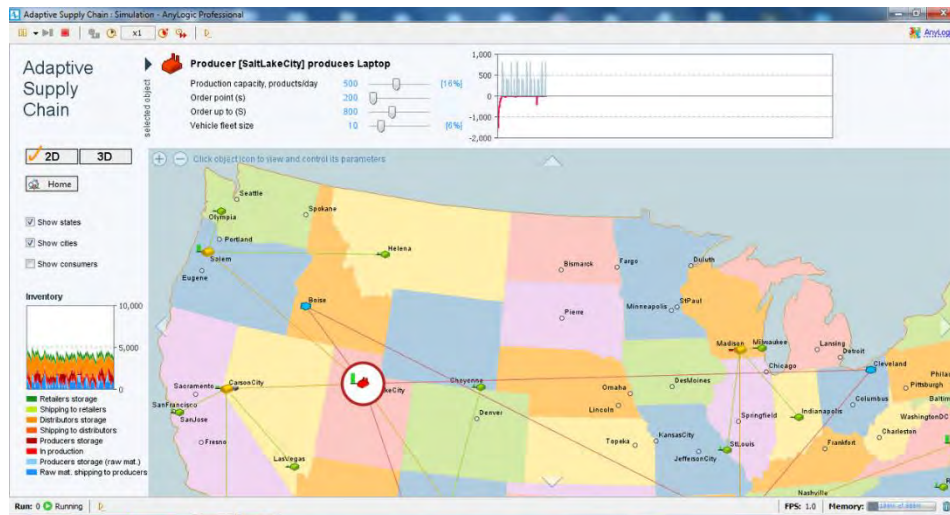
6.2 AnyLogic

Производител на продукта е AnyLogic Company (известна преди като XI Technologies). Разработването му започва от групата по разпределени компютърни мрежи в Санкт-Петербургския технически университет. Първата версия на продукта AnyLogic 4.0 се появява през 2000 г. Последната му версия е AnyLogic 8.0.1 (2017 г.) с няколко проблемно-ориентирани подвеси на предишната версия 7.0.2: версия 7.1 (2014 г.) - с имплементация на GIS, версия 7.2 – с вградена база от данни и библиотека за симулация на флуидни процеси, версия 7.3 – с добавена библиотека за моделиране на пътен трафик и транспортни потоци (Road Traffic Library).

Продуктът се определя като един от водещите в категорията (Grigoryev 2015). Притежава много голяма гъвкавост и разнообразие от възможности за моделиране. Базиран е на трите основни методологии: системна динамика, моделиране на дискретни събития, агентно-базирани системи (многоагентни системи), което се смята за негово сериозно предимство пред други продукти за симулация. Методите могат да се съчетават, с което да се моделира бизнес, технологична или всяка друга система с произволна сложност. Характерни черти на продукта са приложение на обектно-ориентирания подход в съставянето на моделите, автоматичното генериране на код на изключително популярния език от високо ниво Java, възможност за модифициране на генерирания програмен код и за добавяне на собствен такъв, безпроблемна интеграция на непрекъсната и дискретна симулация, съставяне на комплексни симулационни модели с йерархична структура и др. Съществени предимства на AnyLogic са изключително богатия, удобен и интуитивен графичен интерфейс, възможността за подготовка и използване на типови решения, възможност за настройване на параметрите на модела.

AnyLogic работи под управлението на операционни системи Windows, Mac, Linux. Продуктът се предлага във версия, предназначена за запознаване и първоначално обучение, а също и за нетърговско използване. Осигурена е пълноценна поддръжка и обучение от производителя.

Основните области на приложение на продукта са: транспортни системи, транспортни и материални потоци, логистика и складиране, управление на запасите, фармация и здравеопазване; моделиране на пазарна динамика, маркетинг, конкуренция; материално производство и дистрибуция; анализ на конфликти, военно дело.



Фигура 12: Представяне на проект в среда AnyLogic.

6.3 Repast Simphony

Продуктът представлява безплатна развойна среда за създаване на симулационни модели, разработена от Argonne National Laboratory. Реализиран е като алфа-версия през 2006 година. Притежава средства за визуално разработване на моделите, визуална илюстрация на изпълнението им, автоматизирано свързване с бази от данни и визуализация на резултатите. Repast Simphony (Repast-S) е наследник и заместител на други популярни среди за симулационно моделиране, които вече не се поддържат (Repast-J, Repast.Net, Repast-Py), като заменя напълно функционалностите, предлагани от тях. Най-съществените от гледна точка на потребителя усъвършенствания, включени в Repast-S са:

- Обновен и усъвършенстван графичен потребителски интерфейс за разработване на модели;
- Усъвършенствания в изпълнимите модули;
- Добавяне на концепциите „контекст“ и „проекции“.

Контекстът на създавания модел съдържа популация от агенти, без да им предоставя концепции за пространството или връзките между тях. Контекстът може да съдържа „подконтексти“, които да бъдат йерархично организирани. Агентите, които съществуват в „подконтекста“, са достъпни и в основния контекст на модела, но обратното не е задължително.

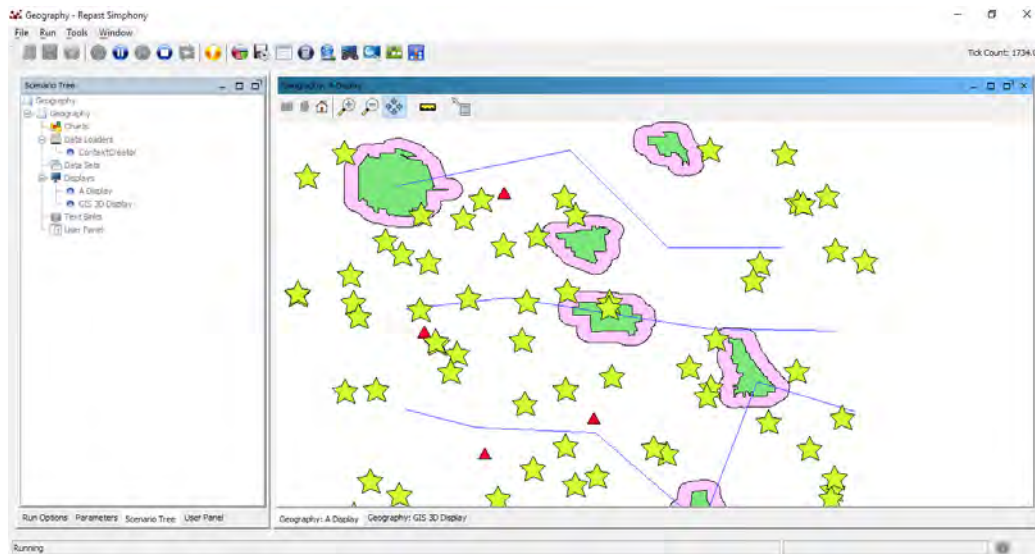
Проекциите са форма, която предоставя на агентите пространство и позволява да бъдат дефинирани връзки и отношения между тях. Проекциите се създават за специфичен контекст и автоматично съдържат всеки агент, включен в контекста. Възможно е създаването на различни проекции с различни особености и характеристики.

Repast Simphony позволява разработването на модели в различни форми, включително с RedLogo (диалект на Logo), Groovy или Java, всяка от които може да бъде напълно интегрирана.

Repast-S е сред продуктите, които предоставят най-богати функционалности за многоагентно моделиране. Той поддържа широко разнообразие от външни инструменти за статистически анализ и анализ на мрежи, за визуализация, за интелигентен анализ на данни (data mining), таблици и др. Поддържа се възможността за визуално композиране на модела (point and click) в двумерна тримерна среда за моделиране. Моделите могат да бъдат съхранени в различни формати, включително и в XML. Възможно е многонишково конкурентно диспечирание на моделираните процеси, налични са разнообразни числени библиотеки, включително такива за генериране на случайни дискретни и непрекъснати разпределения. Поддържат се средства за разпределени изчисления, базирани на Terracotta Enterprise Suite for Java.

Последната публикувана версия на продукта е Repast Symphony 2.4.0 от септември 2016 г. Тя е изцяло интегрирана, подчертано интерактивна, крос-платформена реализация на Java, работи под MS Windows, Apple Mac OS и Linux. Продуктът поддържа разработването на изключително гъвкави модели на взаимодействащи си агенти, които могат да бъдат изпълнявани както на работни станции, така и на клъстери от компютри.

Repast Symphony е използван многократно и успешно в много приложни области: социални науки, икономическо моделиране, логистика и управление на запасите, моделиране и изследване на транспортния трафик, инфраструктура, екологични проблеми и т.н.



Фигура 13: Представяне на проект в среда Repast Symphony.

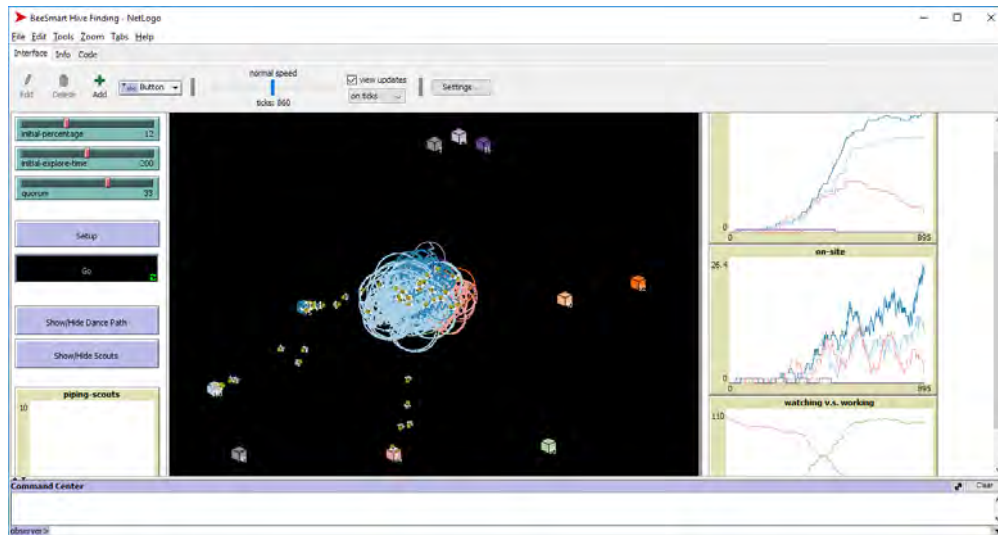
6.4 NetLogo

NetLogo (известен първоначално като StarLogo) представлява платформа от високо равнище, която предоставя прост, но достатъчно мощен език за програмиране, вграден графичен потребителски интерфейс и изчерпателна документация. Продуктът е с отворен код и е разработен от Uri Wilensky, директор на Northwestern University's Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Първоначалният вариант на продукта е създаден през 1999 г. Той е подходящ за моделирането на сложни системи, развиващи се във времето. Предназначен е да реализира разпределени модели в интернет. Специалистите по моделиране могат да посочват инструкции, определящи поведението на стотици, а и на хиляди независими агенти, които функционират в конкурентни условия. Това позволява да се проучи връзката между поведението на микроравнище на индивидите и моделите на макроравнище, които възникват от взаимодействието на много субекти.

NetLogo е наследник на StarLogo като образователен инструмент, тъй като основната му цел е лесното използване и обучение. Програмният му език включва много структури и примитиви на високо ниво, които значително намаляват усилията за програмиране. Езикът се основава на Logo (който е диалект на Lisp) и съдържа много, но макар и не всички възможности за контрол и структуриране на стандартните език за програмиране. Нещо повече, NetLogo е очевидно проектиран с оглед на специфичен тип модел - мобилни агенти, действащи едновременно в мрежа, с поведение, доминирано от локални взаимодействия в кратки интервали от време. Макар че модели от този тип са най-лесно приложими в NetLogo, платформата не се ограничава до тях. NetLogo се приема за една от най-професионалните платформи по отношение на външното си представяне пред клиента и осигуреността си с документация и възможности за обучение. Продуктът предоставя отлични средства за визуализация на моделираните

процеси и резултати. Заедно с продукта се разпространява и библиотека от илюстриращи примери в най-разнообразни области на науката и на практиката. NetLogo се придружава от разширен API с възможност за добавянето на външни модули. Последната версия на продукта към момента е NetLogo 6.0.1 от март 2017 г. Реализиран е като приложение, работещо под управлението на Windows, Mac OS и Linux.

Продуктът е получил основно разпространение като отлична среда за обучение по многоагентно симулационно моделиране, но има и редица успешни приложения в други области като социология, икономика, логистика, биология и т.н.



Фигура 14: Представяне на проект в среда NetLogo.

Някои сравнителни данни на представените специализирани софтуерни продукти са показани в таблици 1 и 2.

Таблица 1: Сравнителни данни на цитираните продукти за многоагентно симулиране.

Наименование	Разработил	Област на приложение	Последна реализация	Лиценз	Отворен код
Swarm	Swarm Development Group	Агентно-базиран за обща употреба	Swarm 2.4.1 – април 2009 г.	GNU General Public License	Да
AnyLogic	The AnyLogic Company	Агентно-базиран за обща употреба. Поддържа и другите два подхода: дискретно-събитийн и системна динамика.	AnyLogic 8.1.0 – юни 2017 г.	Търговски, наличен академичен лиценз. Има свободна редакция за персонална употреба.	Не
Repast Symphony	University of Chicago	Основно – в социалните науки	Repast Symphony 2.4.0 – септември 2016 г.	New BSD	Да

NetLogo	The Center for Connected Learning (CCL) and Computer-Based Modeling, Northwestern University	Социални и естествени науки. За първоначално обучение в областта на многоагентното моделиране	NetLogo 6.0.1 – март 2017 г.	GNU General Public License	He
----------------	--	---	------------------------------	----------------------------	----

Таблица 2: Сравнение на потребителските характеристики на продуктите за многоагентно симулиране.

Наименование	Простота	Обучаемост	Разширяемост	Съвместимост със стандарти	Комуникация
Swarm	Усложнен интерфейс, ограничени GUI възможности	Средна	Средна	Неизвестна	Обмен на съобщения (платформено зависим синтаксис)
AnyLogic	Средна (нито твърде опростен, нито твърде усложнен). Богат GUI.	Лесна	Висока	GIS, 3D опции	Обмен на съобщения (платформено зависим синтаксис)
Repast Simphony	Прост, с ограничени GUI възможности	Лесна	Добра	Неизвестна	peer-to-peer
NetLogo	Прост, удобни възможности за симулиране	Лесна	Добра	Неизвестна (но съществуват разширения за GIS и за 3D)	Разширения за обмен на съобщения (синтаксис, дефиниран от разширенията)

Заклучение

Подходът на многоагентното симулационно моделиране става все по-достъпен и разбираем дори и за непрофесионално подготвени потребители и убедително доказва своята приложимост и ефективност. Очакваното развитие на метода се отнася както до усъвършенстването на софтуерните инструменти, чрез които той се реализира, така и до обхващането на разширяващ се кръг от приложни задачи, а също и разширение чрез интегриране към системи за съхранение и поддържане на данни, информационни системи с оптимизиращи и решаващи функции, системи, основаващи се на машинното самообучение и изкуствен интелект, Big Data и др.

Разнородността на подходите, стиловете на моделиране и приложенията, които основателно претендират, че са "базирани на агенти", както и факта, че различни научни дисциплини участват в свързаните с тях научни изследвания, са фактори, които възпрепятстват определянето на общопризната гледна точка за областта. Подобна рамка на този вид дейност би била желателна, за да се свържат различните усилия чрез обща схема. Освен това тя може да представлява първата стъпка в ефективното

преодоляване на някои от познавателни въпроси, свързани с този подход към моделирането и към анализа на сложни системи. Следователно бъдещите насоки в тази широка изследователска област са естествено насочени към постигане на вертикално свързани аналитични резултати за конкретните области на приложение, но те трябва да включват и усилията, насочени към "изграждане на мостове" между единичните дисциплинарни резултати в опита за постигане на по-общо и по-добро разбиране на това как тези подходи за моделиране отдолу-нагоре могат ефективно да бъдат използвани за проучване, обяснение и (евентуално) за предвиждане на цялостното поведение на сложните системи.

Библиография

Allan Rob, Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools, (интернет-ресурс: <http://www.grids.ac.uk/Complex/ABMS/>, последно достъпен на 05.08.2017 г.)

A Primer for Agent-Based Simulation and Modeling in Transportation Applications, The Exploratory Advanced Research Program, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Technical Report, november 2013.

Bandini Stefania, Sara Manzoni and Giuseppe Vizzari, Agent Based Modeling and Simulation: An Informatics Perspective, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 12 (4) 4, 2009, (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/4.html>)

Chakraborty Sougata, Shibakali Gupta Medical Application Using Multi Agent System - A Literature Survey, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 4, Issue 2 (Version 1), February 2014, pp.528-546.

Cioppa Thomas M., Thomas W. Lucas, Susan M. Sanchez, Military Applications Of Agent-Based Simulations, *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference* R. G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds. (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a491458.pdf>)

Drogoul Alexis, Jacques Ferber, Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies: Application to Social Differentiation in Ant Colonies, *European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World*, MAAMAW 1992: Artificial Social Systems pp 2-23, (https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-58266-5_1).

Gilbert Nigel, Agent-Based Models, (https://www.corwin.com/sites/default/files/upm-binaries/17239_Chapter_1.pdf)

Kalliopi Kravari and Nick Bassiliades, A Survey of Agent Platforms, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (1) 1, 2005 (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/11.html>).

Macal Charles M., Michael J. North, Agent-Based Modeling and Simulation: Abms Examples, *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. (<https://pdfs.semanticscholar.org/a9f9/0e92a963e5ef1c219a8819e8fc03ea63c3b1.pdf>)

Middleton Victor, Simulating Small Unit Military Operations With Agent-Based Models Of Complex Adaptive Systems, *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hagan, and E. Yücesan, eds. (<http://www.informs-sim.org/wsc10papers/013.pdf>)

MULTI-AGENT SYSTEMS -MODELING, INTERACTIONS, SIMULATIONS AND CASE STUDIES, Edited by Faisal Alkhateeb, Eslam Al Maghayreh and Iyad Abu Doush, Published by InTech Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2011.

Namee Mac, B. (2009) Agent Based Modeling in Computer Graphics and Games. In R.A.Meyers (ed.) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Springer. doi:10.1007/978-1-4614-1800-9_39

Pabjan Barbara, The use of models in sociology, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 336(1-2):146-152 · May 2004, (https://www.researchgate.net/publication/222234934_The_use_of_models_in_sociology).

Parka Sooyong, Vijayan Sugumaran, *Designing Multi-Agent Systems: A Framework And Application*, *Expert Systems with Applications* 28 (2005) 259–271.

Russell Stuart, Peter Norvig ,Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd Edition) 3rd Edition, Pearson Education, Inc, 2010.

Siebers Peer-Olaf, Uwe Aickelin School of Computer Science & IT (ASAP) Introduction To Multi-Agent Simulation, University of Nottingham (интернет-ресурс: <https://pdfs.semanticscholar.org/355f/66fb940bb7bddc4a0048c5909ff5c154297c.pdf>, последно достъпен на 05.08.2017 г.)

Борщев Андрей, Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика, Экспонента PRO, #3-4 (7-8) 2004, с. 38-47.

Григорьев Илья, AnyLogic за три дня, Практическое пособие по имитационному моделированию, 2017.

Зайцев И. Д., Многоагентные системы в моделировании социально-экономических отношений: исследование поведения и верификация свойств с помощью цепей маркова, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Институт систем информатики им. А.П. Ершова, Сибирского отделения РАН, 2014.

Макаров В. Л., А. Р. Бахтизин, Новый инструментарий в общественных науках — агент_ориентированные модели: общее описание и конкретные примеры, ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ . N 12 (50) 2009, стр.13-25.

Милакина О.В., Имитационное моделирование на основе агентного метода: модель дорожного движения, XIX Международная научно-практическая конференция „СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ“, 2013, с.288-289.