

Предложена базовая агентно-ориентированная модель функционирования экономики. Перечислены основные структурные компоненты модели и представлены альтернативные способы их формализации. Разработаны алгоритмы обучения для моделирования принятия решений фирмой, основанные на известных методах обучения. Приведены результаты вычислительного эксперимента по сравнению рассмотренных методов обучения интеллектуальных агентов.

© Л.Ф. Гуляницкий,
Д.А. Омелянчик, 2014

УДК 330.46

Л.Ф. ГУЛЯНИЦКИЙ, Д.А. ОМЕЛЯНЧИК

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВОЙ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОНОМИКИ

Введение. Неспособность экономической теории своевременно выявлять предпосылки появления глобальных кризисов определила необходимость в разработке качественно новых подходов к моделированию экономических систем. Одним из современных математических инструментов анализа и прогнозирования экономики является агентно-ориентированное моделирование. Основная идея этого подхода заключается в представлении об экономике как о сложной адаптивной системе, поведение которой формируется в результате множественных взаимодействий автономных гетерогенных экономических агентов, обладающих разным поведением и способностью к обучению.

С помощью математических методов разработчики агентно-ориентированных моделей (АОМ) создают компьютерную симуляцию реального мира, в которой изучают последствия различных сценариев действий, прогнозируют развитие экономических систем, анализируют причинно-следственные связи между переменными.

Цель работы – представить разработанную базовую агентно-ориентированную модель (АОМ) функционирования экономики, описать адаптированные версии известных алгоритмов обучения интеллектуальных агентов типа «фирма» и проанализировать результаты вычислительного эксперимента, в кото-

ром исследовалась примени-
мость различных методов
обучения в разработанной
АОМ.

1. Базовая АОМ функционирования экономики. Агентно-ориентированный подход к моделированию экономической системы позволяет создавать модели, обладающие большим числом степеней свободы и гибкостью. По сути, исследователи получают конструктор моделей, т. е. возможность модифицировать конкретную реализацию модели, не меняя ее структуры, и сравнивать полученные таким образом результаты. Предложенная нами базовая АОМ функционирования экономики также представляет собой семейство моделей с однотипной структурой, но допускающей различные реализации независимых друг от друга компонент.

Разработанная модель содержит два типа активных агентов: фирмы-производители и домохозяйства. Взаимодействие между ними происходит не прямо, а с помощью специальных сущностей-посредников – рынка товаров и рынка труда. На каждой итерации модель последовательно выполняет такие структурные блоки действий: взаимодействие фирм и домохозяйств на рынке труда, производство продукции, ценообразование, определение величины потребления, взаимодействие фирм и домохозяйств на рынке товаров, обучение фирм. Каждый структурный блок может быть реализован различными способами в зависимости от целей исследования и независимо от реализации других блоков. Далее представим ключевые аспекты реализации указанных блоков в предложенной АОМ, а также коротко отметим альтернативные подходы, которые будут реализованы в дальнейшем.

Рынок труда характеризует спрос на труд со стороны фирм. Запрос фирмы на заполнение вакансии содержит количество работников, которых требуется нанять, и предложенную заработную плату. Поиском работы на рынке труда занимаются безработные домохозяйства и недовольные своей зарплатой работники фирм. Взаимодействие фирм и домохозяйств на рынке труда реализовано с помощью следующего алгоритма подбора:

- фирмы выставляют вакансии на рынок труда, если количество фактических работников фирмы меньше планового на данный период;
- незанятые домохозяйства и домохозяйства, неудовлетворенные своей текущей заработной платой, рассматривают открытые вакансии и подают заявки на их заполнение;
- фирмы рассматривают полученные заявки от домохозяйств и рассылают приглашения избранным. Количество таких приглашений не превышает количества недостающих работников фирмы;
- домохозяйства рассматривают полученные от фирм предложения и выбирают самый выгодный для них вариант. О своем решении они сообщают в форме согласия выбранной фирме и в форме отказа – остальным, приславшим приглашения;
- фирмы обновляют информацию о своих работниках на основе решения домохозяйств.

Цикл подбора выполняется ровно два раза и прерывается, даже если фирмам не удалось полностью заполнить открытые вакансии.

В качестве альтернативного алгоритма подбора можно использовать, например, алгоритм случайного выбора работодателя аналогичный алгоритму, применяющийся для выбора товаров, причем вероятность выбора той или иной фирмы пропорциональна предложенной зарплате [1].

Производство продукции. Производственная деятельность фирмы определяется ее производственной функцией, связывающей наличный капитал и труд с объемом произведенной продукции. В базовой АОМ мы рассматриваем период, в котором производственные мощности фирмы не подвергаются существенным изменениям, поэтому значимым для производства продукции является только труд, т. е. объем произведенной продукции Y определяется формулой

$$Y = \alpha \hat{L},$$

где α – производительность труда, \hat{L} – фактическое количество работников.

В качестве альтернативных производственных функций могут быть выбраны, например, классические производственные функции Кобба-Дугласа или CES (с постоянной эластичностью замещения).

Ценообразование. Цена продукции является одним из основных параметров управления фирмы, т. е. путем изменения цены фирма-производитель может непосредственно влиять на реакцию окружающей среды. В разработанной модели цена p может изменяться в результате работы одного из алгоритмов обучения или же задаваться с помощью формулы [2]

$$p = \frac{w}{\alpha \left(1 + \frac{1}{\varepsilon} \right)}, \quad (1)$$

где w – установленная заработная плата, ε – эластичность спроса на продукцию фирмы.

Определение величины потребления. Цикл жизнедеятельности домохозяйств модели предусматривает потребление продукции, которую производят фирмы. Потребность домохозяйства в продукции можно измерить в условно денежных или натуральных единицах. В существующей реализации базовой АОМ домохозяйства определяют бюджет потребления B в денежных единицах, пользуясь простым правилом [3]:

$$B = \begin{cases} Money - \kappa (Money - \phi \cdot w), & Money > \phi \cdot w \\ Money, & \text{иначе} \end{cases},$$

где $Money$ – объем наличных денег, κ ($0 < \kappa < 1$) – склонность к сбережению, ϕ – порог, при достижении которого домохозяйство пытается направить все наличные деньги на поддержание собственной жизнедеятельности. Другими словами, правило определения величины потребления предусматривает существования некоторого критического объема наличных средств на руках. Когда объем доступных средств опускается ниже фиксированного порога,

домохозяйство полностью расходует наличные средства. Иначе, агент откладывает часть полученных в данном периоде средств в качестве резерва.

В качестве альтернативного способа измерения потребности домохозяйства в продукции можно использовать известные варианты функции полезности.

Рынок товаров. Предполагается, что фирмы производят только один потребительский товар, который является гомогенным, т. е. товары разных фирм-производителей отличаются исключительно ценой. Произведенный товар отправляется на централизованный рынок товаров, где его могут приобрести домохозяйства. Предложение товара состоит из цены на единицу товара и соответствующего объема товара, выставленного на продажу.

В рамках базовой модели выбор товара домохозяйством считается случайным, причем вероятность приобретения того или иного товара обратно пропорциональна его цене. Тогда, если обозначить $v(p) = -\ln p$ ценность товара для домохозяйства, вероятность выбора $prob_j$ товара фирмы j определяется формулой [4]

$$prob_j = \frac{Exp[\lambda v(p_j)]}{\sum_j Exp[\lambda v(p_j)]},$$

где λ – интенсивность конкуренции на рынке товаров.

Выбрав таким образом товар, домохозяйство пытается полностью израсходовать бюджет потребления на его приобретение. Если для этого на рынке товара недостаточно, т. е. после покупки у домохозяйства остаются деньги, отведенные на потребление, то оно выбирает следующий товар и пытается потратить остаток бюджета на него. Так происходит до тех пор, пока бюджет не будет использован полностью, или на рынке не закончатся товары.

Отметим, что важным для спецификации модели является предположение о бесконечной делимости товара или его отсутствие. В последнем случае домохозяйство может оказаться в ситуации, когда оно не сможет использовать ненулевой бюджет потребления на покупку товаров, поскольку установленные фирмами цены будут слишком высокими. Это может существенно повлиять на величину прибыли фирм и, соответственно, принимаемые ими решения.

2. Обучение фирм. Последний структурный этап предложенного семейства моделей посвящен принятию решений. По результатам деятельности на рынке товаров и труда фирма получает реакцию внешней среды на выбранные значения параметров управления и обновляет их в соответствии с заданным алгоритмом. Таким образом, фирма *обучается*, т. е. пытается достичь своих целей, сопоставляя управляемые ею входные параметры с полученным выходом.

Основными параметрами управления, т. е. переменными, значения которых фирма-агент может изменять непосредственно, могут быть заработная плата, цена единицы продукции, плановое количество работников, план производства.

Основными критериями, которые фирма-агент пытается оптимизировать, могут быть прибыль, фактическое количество работников, выручка, рентабельность и т. д.

Внешняя среда реагирует на действия фирм посредством изменения объемов продаж и фактического числа работников.

В разработанной АОМ предлагается несколько адаптированных алгоритмов обучения агентов-фирм. Все они принадлежат к классу алгоритмов принятия решений, т. е. активный агент не обладает знанием о существовании других активных агентов, он воспринимает их действия только косвенно, как часть реакции внешней среды.

Бессознательное обучение. Основная идея бессознательного обучения [5] состоит в работе с вектором $v(t) = (v(a, t))_{a \in A}$, который каждому возможному действию a из конечного множества действий A ставит в соответствие вероятность его выбора $v(a, t)$. В начале работы алгоритма все действия равновероятны. Далее вероятность выбранного и реализованного агентом действия обновляется по определенному правилу в соответствии с заданным критерием оптимальности. Таким образом, предполагается, что агенты не владеют информацией относительно своих предыдущих действий и их результатов, но прошлое косвенно содержится в векторе вероятностей $v(t)$.

Для адаптации этого метода к условиям базовой АОМ нужно задать правила обновления выбранных параметров управления в форме набора действий агента. Это можно сделать несколькими способами:

- каждый параметр управления выбирается из конечного множества постоянных значений. Например, фирма-агент имеет возможность выбрать между значениями зарплаты $w = \{4, 5\}$ и цены $p = \{2, 3\}$ соответственно;

- для каждого параметра управления w на итерации t допускается применение таких действий: увеличить на заданную величину a , уменьшить на заданную величину a , оставить без изменений. Пример правила обновления параметров для этого случая выглядит так: $w_{t+1} = (1 \pm a) w_t$;

- для каждого параметра управления w на итерации t изменяется величина его изменения Δ : увеличивается на заданную величину a , уменьшается на заданную величину a , остается без изменений. Например, $w_{t+1} = \Delta_{t+1} w_t$, $\Delta_{t+1} = \Delta_t \pm a$;

• каждый параметр управления w на итерации t определяется как доля Δ от прибыли π . Величина этой доли может увеличиваться на заданную величину a , уменьшаться на заданную величину a , оставаться без изменений. Например, $w_{t+1} = \Delta_{t+1} \pi_t, \Delta_{t+1} = \Delta_t \pm a$.

Q-обучение. Ключевая идея алгоритма – это определение значений функции качества комбинации состояние-действие $Q: S \times A \rightarrow R$, где S – множество состояний среды, а A – множество действий агента. Перед началом обучения функция Q возвращает фиксированное значение. Далее, каждый раз, когда агент получает вознаграждение за свои действия, для каждой комбинации состояния $s \in S$ и действия $a \in A$ вычисляются новые значения функции Q . Ядро алгоритма – это простое обновление значений функции качества по результатам итерации [6]:

$$Q_t(s_t, a_t) \leftarrow Q_t(s_t, a_t) + \alpha_t [R_{t+1} + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) - Q(s_t, a_t)],$$

где R_{t+1} – вознаграждение, полученное после выполнения действия s_t в состоянии a_t , $\alpha_t(s_t, a_t)$ ($0 < \alpha \leq 1$) – скорость обучения, γ ($0 \leq \gamma < 1$) – множитель дисконтирования.

Чтобы адаптировать этот метод для применения в разработанной АОМ, нужно определить основные его элементы. Множество действий фирмы A задается так же, как и для бессознательного обучения. Вознаграждение R определяется как один из возможных критериев оптимальности, указанных выше. Множество состояний S характеризуется с помощью различных соотношений между индикаторами реакции внешней среды и плановыми показателями агента-фирмы. Например, если ввести следующие обозначения: Y – объем производства, \hat{Y} – объем продаж, L – плановое количество работников, \hat{L} – фактическое число работников, то один из способов задать множество состояний фирмы выглядит так:

$$S^1: \hat{Y} < Y, \hat{L} < L, \hat{L} > 0, \hat{Y} > 0.$$

$$S^2: \hat{Y} = Y, \hat{L} < L, \hat{L} > 0, \hat{Y} > 0.$$

$$S^3: \hat{Y} < Y, \hat{L} = L, \hat{L} > 0, \hat{Y} > 0.$$

$$S^4: \hat{Y} = Y, \hat{L} = L, \hat{L} > 0, \hat{Y} > 0.$$

$$S^5: \hat{Y} = 0, \hat{L} > 0.$$

$$S^6: \hat{L} = 0.$$

Интуитивное обучение. Одним из интуитивных подходов к обучению является экстраполяция тенденции [3], т. е. предположение о том, что будущее повторяет тенденцию из прошлого. В адаптированном методе фирма определяет план производства на основании информации о продажах в предыдущих периодах:

$$Y_t = \xi \cdot \hat{Y}_t + (1 - \xi) \cdot \frac{1}{T} \sum_{k=t-T}^{t-1} \hat{Y}_k,$$

где Y_t – производственный план, \hat{Y}_k – величина продаж фирмы в период k , T – интервал сглаживания, ξ – коэффициент сглаживания.

Чтобы избежать избыточных колебаний производственного плана, временной ряд продаж сглаживается. Таким образом, фирма может проявлять некую инертность в адаптации объемов продаж к реальным потребностям домохозяйств.

Отсюда, плановое количество работников можно определить по формуле

$$L_t = \frac{\xi \cdot \hat{Y}_t + (1 - \xi) \cdot \frac{1}{T} \sum_{k=t-T}^{t-1} \hat{Y}_k}{\alpha},$$

где L_t – плановое количество работников.

Заработная плата для этого случая вычисляется с помощью простого правила: если $L_t > \hat{L}_t$, т. е. фирма в данном периоде не смогла набрать запланированное число работников, то она повышает предложенную заработную плату на фиксированный процент. Цена единицы продукции фирмы описывается формулой (1).

Олигополия. Метод обучения на базе олигополистической структуры рынка разработан для проверки возможности применения достижений классической экономической теории в агентном моделировании. Итак, олигополией называется такая рыночная структура, когда на рынке продукции предложения небольшого числа фирм заполняют весь рынок и некоторые из этих фирм владеют значительными долями рынка. Определяющим свойством олигополии является то, что все конкурирующие фирмы имеют возможность неявно влиять на цены на продукцию и факторы производства, т. е. прибыль каждой фирмы зависит от политики остальных конкурирующих фирм. Поэтому, чтобы определить оптимальную политику, направленную на максимизацию прибыли, каждая фирма должна учитывать не только собственное непосредственное влияние на рынки товаров, услуг (продукции) и ресурсов (факторов), а и косвенное – через взаимодействие с конкурентами.

Пусть спрос на рынке товаров задается с помощью линейной функции вида $p = a - b \sum_{j=1}^f Y_j, a > 0, b > 0$. Тогда равновесие Курно [7] для нашей модели определяется так:

$$L_j = \frac{f}{f+1} \frac{a - w/\alpha}{\alpha b}, \quad j = \overline{1, f},$$

$$p_j = \frac{a + f \cdot w/\alpha}{f+1},$$

где a и b – параметры функции спроса, определяющиеся с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов, f – количество фирм-производителей в модели.

Рациональное обучение. При рациональном подходе к обучению фирма-агент на каждой итерации решает задачу поиска таких значений параметров управления, при которых достигается оптимальное значение выбранного критерия [8].

Предположим, что фирма имеет некоторое представление о функции спроса на продукцию на рынке товаров $p = a - b\hat{Y}$ и функции предложения на рынке труда $\hat{L} = c + dw$, где a, b, c, d – коэффициенты, которые определяются на каждой итерации с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов. Тогда, если в качестве критерия оптимальности выбрана прибыль $\pi = p\hat{Y} - w\hat{L}$, а в качестве параметров управления – заработная плата w , цена p и плановое количество работников \hat{L} , то решением соответствующей задачи оптимизации относительно \hat{Y} будет $\hat{Y}_{\max} = \frac{\alpha(\alpha ad + c)}{2(1 + bd\alpha^2)}$. Параметры управления в свою очередь определяются формулами

$$p = a - b\hat{Y}_{\max},$$

$$L = \frac{\hat{Y}_{\max}}{\alpha},$$

$$w = \frac{\hat{Y}_{\max} - \alpha c}{d\alpha}.$$

Случайный выбор. Одной из контрольных точек проверки корректности работы модели служит моделирование случайного поведения активных агентов. В адаптированном для базовой АОМ методе параметры управления считаются случайными величинами, равномерно распределенными на заданных отрезках, т. е. фирма-агент имеет возможность, например, выбрать между значениями заработной платы $w \sim U[4, 5]$ и цены $p \sim U[2, 3]$, соответственно.

3. Результаты вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент по сравнению методов обучения фирм-производителей в базовой АОМ проводился с помощью специально разработанного программного обеспечения. Начальные условия для всех методов задавались одинаково: $f = 2$, $h = 100$, $p_0 = 5$, $w_0 = 10$, $L_0 = 20$, $\alpha = 5$, $\varepsilon = -1.5$, $\kappa = 0.8$, $\phi = 0.6$, $Money_0^f = Money_0^h = 0$, где f – количество фирм, h – количество домохозяйств, p_0 – начальная цена, w_0 – начальная заработная плата, L_0 – начальное плановое количество работников, α – производительность труда, ε – эластичность спроса, κ – склонность к сбережению, ϕ – порог ликвидности, $Money_0^f$ и $Money_0^h$ – начальные денежные средства у фирм и домохозяйств соответственно. В таблице далее приведены значения основных статистических показателей (средняя заработная плата, средняя цена, совокупное производство, совокупное потребление, уровень безработицы) после ста итераций работы модели в условных единицах. Заметим, что значения этих показателей вычисляются внутри базовой АОМ.

ТАБЛИЦА

Метод / Показатель	Средняя зарплата	Средняя цена	Производство	Потребление	Безработица
Бессознательное обучение (1-й способ)	3.391	2.034	335	335	0.33
Бессознательное обучение (2-й способ)	0.044	0.026	475	475	0.05
Q-обучение (1-й способ)	3.115	1.869	305	305	0.39
Q-обучение (2-й способ)	9247.98	3734.82	175	175	0.65
Олигополия	10	35.999	130	130	0,74
Интуитивное обучение	10	6	175	175	0.65
Случайный выбор	4.271	2.548	495	388	0.01

Из таблицы видно, что агрегированные результаты работы модели могут существенно различаться в зависимости от выбранного метода обучения. Кроме того, некоторые методы обучения эффективней других оптимизируют поведение фирм одновременно на рынке труда и рынке товаров. Заметим также, что за исключением случайной модели поведения производство и потребление в системе спустя сто итераций находятся в равновесии, но значения других

переменных, при которых оно достигается, разные. Поиск необходимых и достаточных условий для выбора АОМ, которая наиболее адекватно описывает реальную ситуацию, а, значит, может использоваться для прогнозирования и анализа сценариев, является предметом наших дальнейших исследований.

Выводы. Описана разработанная базовая АОМ функционирования экономики. На первом этапе создания этой модели ставилась цель воссоздать механизмы взаимодействия между основными экономическими агентами, фирмами и домохозяйствами на рынке товаров и труда. На втором этапе проводился анализ пригодности различных алгоритмов обучения интеллектуальных агентов для корректного моделирования поведения фирм и сравнение полученных с помощью них результатов. В дальнейшем планируется разработать и реализовать алгоритмы обучения агентов на базе методов комбинаторной оптимизации и эволюционного программирования. Также возможности базовой АОМ будут расширены путем введения новых типов агентов (банк, правительство, внешний рынок), новых механизмов взаимодействия (уплата налогов, кредитование, открытие депозитов) и новых подсистем национальной экономики (регион, отрасль).

Л.Ф. Гуляницкий, Д.А. Омелянчик

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ БАЗОВОЇ АГЕНТНО-ОРИЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕКОНОМІКИ

Запропоновано базову агентно-орієнтовану модель функціонування економіки. Перераховано основні структурні компоненти моделі та подано альтернативні варіанти їхньої формалізації. Розроблено алгоритми навчання для моделювання прийняття рішень фірмою, засновані на відомих методах навчання. Наведено результати обчислювального експерименту з порівняння розглянутих методів навчання інтелектуальних агентів.

L.F. Hulianytskyi, D.A. Omelianchuk

DEVELOPING AND INVESTIGATING THE BASIC AGENT-ORIENTED MODEL OF ECONOMICS

The basic agent-oriented model of economics is presented. Main structural components of the model are defined and the alternative ways of their formalization are proposed. In order to model the decisions of a firm, the learning algorithms are developed using the known learning methods. The results of the numerical experiment on comparing the learning methods considered are given.

1. *Караев А.К., Мельничук М.В.* Агентно-ориентированные технологии дизайна экономической (фискальной, монетарной) и социальной политики: Монография. – М.: ВГНА Минфина России, 2011. – 274 с.
2. *Омелянчик Д.А.* Агентно-орієнтоване моделювання економіки: особливості, види, проблеми // Теорія оптимальних рішень. – 2013. – № 12. – С. 9 – 18.

3. *Dawid H., Gemkow S., Harting P., Neugart M.* On the effects of skill upgrading in the presence of spatial labor market frictions: An agent-based analysis of spatial policy design // *J. of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2009. – N 12 (4).
4. *Deissenberg C., van der Hoog S., Dawid H.* EURACE: A massively parallel agent-based model of the European economy // *Applied Mathematics and Computation*. – 2008. – N 204(2). – P. 541–552.
5. *Tesfatsion L., Judd K.L.* Handbook of computational economics, Vol. 2: Agent-Based Computational economics. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 904 p.
6. *Омельянчик Д.А.* Моделирование процесса навчання фірм в агентно-орієнтованій моделі функціонування економіки // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали XV Міжнар. наук.-техн. конф. SAIT 2013 (Під ред. Н. Панкратової). – К: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2013. – С. 307.
7. *Пономаренко О.І.* Сучасний економічний аналіз: У 2 ч. Ч. 1. Мікроекономіка: Навч. посіб. / О.І. Пономаренко, М.О. Перестюк, В.М. Бурим. – К.: Вища шк., 2004. – 262 с.
8. *Омельянчик Д.А.* Дослідження оптимальної податкової ставки в агентно-орієнтованій моделі економіки // Сучасні проблеми моделювання соціально-економічних систем. матеріали V Міжнар. наук.-практ. конф. (11 – 12 квітня 2013 р.). – Х.: ФОП Александрова К.М., ВД «ІНЖЕК», 2013. – С. 314 – 317.

Получено 18.12.2013

Об авторах:

Гуляницкий Леонид Федорович,

доктор технических наук, заведующий отделом
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,

Омельянчик Диана Анатольевна,

младший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.