

ЭКОМОД - СИСТЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПОДДЕРЖКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИКИ¹

А.А.Петров, И.Г.Поспелов, Л.Я.Поспелова

1. Назначение системы ЭКОМОД

Бывает очень обидно, когда знаешь, что нужная тебе часть модели уже реализована в старой разработке, но нет возможности ни извлечь ее, ни найти точное ее описание. Система ЭКОМОД предназначена поддерживать в работоспособном состоянии ранее разработанные модели экономики и помогать использовать их отдельные элементы при создании новых моделей. Потребность в этом возникла у исследовательской группы ВЦ РАН, которая вот уже более 20 лет разрабатывает методы системного анализа развивающейся экономики (САРЭ). В рамках этого направления созданы математические модели рыночной экономики, плановой административно регулируемой экономики, смешанной экономики, экономики переходного периода. Эти модели позволили описать основные качественные особенности развития экономических систем разных типов, проанализировать проблемы внешней торговли, экологии, энергетики. Еще в 1990 г. с помощью модели был верно оценен скачок цен при их либерализации. Была качественно и количественно описана эволюция российской экономики в 1991-1994 гг.

Как строились эти модели? Сначала определялись те процессы и явления, которые хотелось бы воспроизвести в данной модели. Затем выделялись основные экономические агенты, ответственные за интересующие процессы и явления и набор основных величин, с помощью которых можно описать взаимодействие выделенных агентов. После этого начиналась трудная, нестандартная работа по составлению математических соотношений, описывающих действия агентов на языке выбранных величин. В этой работе широко использовался как собственный опыт,

¹Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 94-01-00943.

так и известные к этому времени результаты математической экономики. После построения замкнутой системы соотношений проводились вычислительные эксперименты и аналитические исследования. На этом этапе подбирались значения параметров модели, но иногда приходилось изменять и соотношения. В конце концов, либо получалась модель, удовлетворяющая авторов, либо авторы приходили к выводу, что для описания интересующих процессов нужны радикальные новые идеи. При удачном исходе работа завершалась публикацией результатов исследования модели вместе с их экономической интерпретацией. Потом возникали новые задачи, исследовательский коллектив менялся, и через год уже никто не мог повторить расчеты, а иногда даже не знал, на каком именно варианте модели был получен тот или иной конкретный результат. Что же оставалось? Оставался опыт моделирования (как положительный, так и отрицательный). Что терялось? Терялись конкретные алгоритмы, соотношения, данные, которые можно было бы непосредственно использовать в новых моделях. Пропадала возможность корректно сравнить старые модели с новыми, точно выяснить влияние тех или иных усовершенствований в математическом описании экономических процессов.

Положение стало просто нетерпимым, когда исследовательская группа стала изучать экономику переходного периода, модели которой приходится часто пересматривать вслед за изменениями экономических отношений в стране. Тогда авторы моделей инициировали работу по созданию системы ЭКОМОД и принимают в ее создании непосредственное участие, надеясь в будущем стать активными пользователями системы.

2. Особенности проблемы представления знаний в области математического моделирования экономики

Упорядочивать опыт решения задач в некоторой области и облегчать применение этого опыта - основная практическая цель искусственного интеллекта. В инженерии знаний выработался следующий подход к достижению этой цели:

- выделяется набор понятий предметной области, достаточно богатый, чтобы описать постановку задач и известные методы решения;

- выясняются правила, которыми руководствуются эксперты при определении метода решения, пригодного в данной исходной ситуации²;
- совокупность выявленных правил записывается в виде некоторой логико-лингвистической модели предметной области и проверяется ее непротиворечивость;
- модель оформляется в виде диалоговой системы, способной подсказать пользователю способ решения задачи.

Попытавшись применить этот подход к построению системы поддержки математического моделирования экономики, мы натолкнулись на неожиданные и принципиальные трудности, которые представляется полезным обсудить, поскольку они могут возникнуть и в других предметных областях, которые имеют дело со сложными самоорганизующимися системами.

Первый источник трудностей в том, что система предназначена не для решения типовых задач, а для помощи в решении задач, с которыми эксперт еще не встречался. Это делает ЭКО-МОД похожим не на прикладную экспертную систему, а на универсальный набор методов, подобный известному пакету "Mathematica".

Вторая особенность связана с самим объектом исследования. Экономика - это сложная, необратимо изменяющаяся и в сущности уникальная система. Чтобы понять особенность моделей экономики, посмотрим, как строятся надежные модели в других областях знания. В точных науках лучшие модели выводятся как частные случаи общей теории, а в технике - собираются, как из "кубиков", из готовых модулей в соответствии с проектом моделируемой системы. В прикладных областях с большим и надежным корпусом экспериментальных данных и экспертных оценок, таких как геология, техническая диагностика, юриспруденция, отчасти медицина, надежную модель (экспертную систему) часто удается построить, просто записав в виде априорных правил опыт экспертов.

²Или, что то же, отношения между элементами описания задач и элементами описания методов или классификация исходных ситуаций в соответствии с применяемыми в них решениями.

Хорошую модель экономики нельзя, как в естественных науках, вывести из общей теории, поскольку формальная общая теория отсутствует. Нельзя также сложить модель из готовых модулей, поскольку в экономике взаимодействуют не функциональные подсистемы, а лица и организации, способные вести себя по-разному в разных ситуациях. Наконец, эксперты в экономике слишком часто ошибаются и противоречат друг другу. Именно частые неудачи и явная ангажированность экспертов-экономистов породили потребность в сложных математических моделях экономики.

Было создано большое количество моделей, позволяющих извлекать нетривиальные следствия из принятых гипотез и описывать тонкие экономические эффекты. Однако, в отличие от универсальных моделей точных наук, экономические модели имеют достаточно узкие и не вполне ясные границы применимости. При внимательном рассмотрении в них не обнаруживается ни функциональной, ни алгоритмической, ни программной модульности. Ситуация усугубляется тем, что модель приходится идентифицировать и верифицировать по данным, собранным статистическими службами, которые используют совсем другую систему понятий.

Каждая удачная математическая модель - это новый взгляд на целостную экономическую систему. Модель описывает экономику в особом ракурсе, и лишь все вместе они более или менее полно раскрывают всю сложность экономических связей. Для исследования новой проблемы недостаточно перенастроить существующую модель. Приходится пересматривать и структуру модели, и номенклатуру переменных. Имеющиеся модели используются при этом лишь частично или как аналогии.

Самое же главное то, что в силу указанных обстоятельств система общепотребительных понятий в экономике, несмотря на столетние усилия, так и не достигла стандарта строгости системы понятий точных наук. Понятия экономики отнюдь не являются элементарными. Они представляют собой аспекты общих категорий и в экономических теориях часто используются метафорически. Например, "рынок" - в отношении информации, "производство" - в отношении знаний, "полезность" - в отношении рекламы, "экономическое благо" - в отношении свободы и

даже "ликвидность" - в отношении финансовых активов. Экономические понятия не суть множества признаков или примеров, а скорее отображения, указывающие подобие ситуаций, моделей или аспектов анализа. Если уловить и формализовать эти подобию, то из множества моделей получится системное описание экономики, которое нельзя свести к единой модели.

Неоднозначность и индивидуальные различия в понимании экономических терминов были главными причинами того, что мы отказались класть в основу классификации моделей используемые в ней экономические понятия, такие как "продукт", "цена", "деньги", "потребитель" и т. п. Вместо этого мы сконструировали особую *каноническую форму* модели, которая отражает принципы построения моделей, а не способы их интерпретации.

Каждая новая модель, будучи цельным произведением, несет отчетливый отпечаток авторской индивидуальности. Здесь мы сталкиваемся с известной но обычно не ассоциирующейся с наукой, проблемой превращения индивидуальных знаний в общезначимые.

Индивидуальное научное знание с трудом поддается наблюдению, анализу и самоанализу. Нужен инструмент изучения процесса введения в общезначимость индивидуального знания. Таким инструментом для нас оказалась каноническая форма. Два автора, приводя свою модель к канонической форме, с удивлением обнаружили, что по-разному интерпретировали уравнения, описывающие информационное взаимодействие экономических агентов в процессе рыночного обмена. Придя в конце концов к единому мнению, оба почувствовали, что их индивидуальное знание обогатилось. Каноническая форма выявила те индивидуальные смысловые различия, которые не проявлялись, пока использовались математические описания и язык экономических категорий. Она оказалась более совершенным способом улавливания индивидуальных представлений, чем журнальная форма изложения, сколь бы подробным оно ни было.

3. Каноническая форма модели

Хотя модели САРЭ весьма разнообразны, все они построены в рамках единой концепции и с формальной точки зрения представляют собой замкнутые системы математических со-

отношений между величинами. Основные принципы построения моделей САРЭ можно сформулировать следующим образом.

- Мы рассматриваем экономическую систему как органическое целое множества технологических процессов, преобразующих первичные ресурсы в полезные конечные продукты, и распределенной системы управления, согласующей течение технологических процессов.
- Управленческие функции в экономике распределены потому, что ни один человек в принципе не может осуществить или контролировать все экономические процессы, которые обеспечивают условия его существования. В обществе складывается разделение труда - разные люди занимаются разными делами, и каждый потребляет не только то, что сам производит. Все вместе люди нащупывают набор необходимых обществу дел и обязанностей (ролей), которые закрепляются отношениями собственности и власти.
- Всякая экономическая деятельность связана с принятием решений. Принимая решения, человек исходит из своих интересов (не обязательно сугубо эгоистических) и из доступной ему всегда довольно ограниченной информации об условиях деятельности.

Каноническая форма модели - это система классификации соотношений, образующих математическую модель, и переменных, которые входят в соотношения. Привести модель к канонической форме - это значит записать определенным образом ее соотношения и затем отнести эти соотношения и входящие в них переменные к предлагаемым канонической формой категориям.

Из синтаксических правил канонической формы здесь отметим два: а) соотношения делятся на *уравнения* и *ограничения*; б) *уравнение* формально записывается как явное определение одной переменной через другие.

Наиболее важными классификационными категориями канонической формы являются: "экономический агент", "взаимодействие", "актив", "сигнал", "план". Первые две категории являются группами соотношений, а последние три - типами переменных.

Экономический агент (ЭА) - это группа соотношений (блок), описывающая некоторый процесс принятия решений в

экономике. Типичный пример такого решения - планирование производственной фирмой выпуска продукции и затрат сырья в зависимости от цен и производственных возможностей. Соотношения, описывающие этот процесс, определяют *планы* (выпуска и затрат) как функции *сигналов* (цен), описывающих экономическую конъюнктуру и состояния агента (см. ниже). Реализация планов зависит, вообще говоря, от воли других агентов. Блок ЭА имеет довольно жесткую структуру, отвечающую стандарту описания задачи принятия решения, принятому в теории исследования операций.

Взаимодействие (ВД) - это группа соотношений (блок), описывающая процесс согласования планов агентов. Типичный пример - уравнения, определяющие цены и объемы обмена в модели рыночного равновесия. Соотношения блока ВД определяют, во-первых, *сигналы* (цены) и, во-вторых, фактические значения величин, которые планируют агенты. В блоках ВД описываются те процессы в экономике, которые мы пока не умеем представлять как решения экономических агентов, ограничиваясь словами, например, о "невидимой руке рынка". По этой причине форма и набор соотношений блоков ВД в отличие от блоков ЭА достаточно произвольны. Однако анализ построенных моделей показал, что блоки ВД компонуются из стандартных составляющих - *операций*, таких как "сообщение", "обмен", "передача", и т. п.

Важнейшими из планируемых величин являются *потоки активов* - труда, денег, капитала, продуктов и т. п. *Запасы активов* - это важнейшие показатели текущего состояния агентов. Характерной особенностью моделей САРЭ является полная система материальных и финансовых балансов. Это означает, что для каждого рассматриваемого в модели *актива*, например продукта, описывается весь путь его передач и преобразований от создания до потребления. Движение актива описывается специально отмеченными *балансовыми уравнениями*, которые имеют вполне определенный вид: "изменение *запаса* актива равно алгебраической сумме некоторых *потоков* этого актива".

Переменные модели, блоки и активы имеют собственные имена, но эти имена системой ЭКОМОД не используются, а выполняют роль комментариев. Чтобы сопоставить категории канонической формы с общепотребительными экономическими

понятиями, используются *инвариантные имена*. Это названия из строго определенного списка ("труд", "продукт", "купля-продажа", "платежное средство" и т. п.), которые при выполнении определенных условий могут быть дополнительно присвоены элементам канонической формы.

Инвариантные имена позволяют, с одной стороны, вкладывать новую модель в общий контекст экономической науки, а с другой - выяснять, как реализуются экономические понятия в конкретных моделях, и тем самым придать этим понятиям строгий смысл. Инвариантные имена, очевидно, можно использовать, чтобы найти и сравнить описания одних и тех же экономических процессов в разных моделях.

Каноническая форма содержит много условий корректности классификации, но все они лишь необходимы, а отнюдь не достаточны. В классификации остается значительный произвол, и, относя тот или иной элемент модели к некоторой категории, мы приписываем элементу определенный смысл. Таким образом, каноническая форма оказывается средством представления знаний о модели.

Заметим, что так поставленная задача классификации математических моделей отличается от стандартной задачи классификации в теории распознавания образов. При распознавании образов предполагается, что классифицируемый объект уже имеет определенный смысл и проблема состоит в том, чтобы выявить его по формальным признакам. Соотношения математической модели сами по себе никакого экономического смысла не имеют, а приобретают его в результате классификации.

Вполне возможно, что одну и ту же систему соотношений можно по-разному представить в канонической форме. Это означает, что данная система имеет несколько экономических интерпретаций. Наоборот, может случиться так, что две разные системы уравнений приобретут в канонической форме тождественные структуры. Это значит, что данные системы по-разному описывают одни и те же аспекты экономики.

4. Отношения сходства моделей

Определив надлежащим образом отношения сходства канонических форм, мы получим инструмент, который может помочь заимствовать описания из одной модели в другую.

Отношения сходства удобно описывать через преобразования моделей: две модели в канонической форме находятся в некотором отношении сходства, если первую можно превратить во вторую преобразованиями определенного типа. Пока выделены четыре типа преобразований³. Каждый из них определяет транзитивное и рефлексивное отношение сходства моделей. Первые три отношения симметричны и разбивают множество моделей на непересекающиеся классы, а последнее - антисимметрично и задает на множестве моделей частичный порядок.

Несущественные преобразования - это, грубо говоря, взаимно-однозначные переименования переменных, блоков, активов, а также тождественные преобразования отдельных соотношений модели. Модели, получающиеся друг из друга несущественным преобразованием, одинаковы в любом разумном смысле этого слова. К сожалению, алгоритмически распознать несущественное преобразование невозможно.

Преобразование функциональных зависимостей - это несущественное преобразование плюс изменение функциональной формы отдельных соотношений, не изменяющее набора входящих в эти соотношения переменных и не изменяющее классификации переменных и соотношений. Установить факт, что две модели получаются друг из друга преобразованием функциональных зависимостей - несложная задача на преобразование матриц.

Заметим, что в экономике, в отличие, скажем, от физики, твердо установленных нетривиальных функциональных зависимостей между наблюдаемыми величинами практически нет. Гипотезы и законы в экономике, как правило, выражаются в форме: "на изменение такого-то показателя влияют такие-то факторы". Поэтому есть основания считать, что разумные модели экономики, отличающиеся лишь видом зависимостей, с точки зрения экономической интерпретации одинаковы.

³Не считая преобразования, заключающегося в изменении числовых значений параметров модели.

Вариация модели есть суперпозиция локальных вариаций. **Локальная вариация** - это любое изменение соотношений (в том числе с введением новых переменных) в каком-либо одном блоке модели (ЭА или ВД). Если две модели являются вариациями друг друга, то описания соответствующих блоков этих моделей полностью взаимозаменяемы. Если одно из этих описаний можно использовать в новой модели, то можно использовать и любые его вариации.

Распознать вариацию модели сложно, но вариации сами возникают в процессе исследования модели, когда соотношения меняются десятки, даже сотни раз. В большинстве эти изменения являются локальными вариациями. Система ЭКОМОД будет хранить все эти вариации, систематизировать их и предоставлять для использования в новых моделях. Можно будет также поручить системе исследовать суперпозиции вариаций, изучавшихся по отдельности.

Преобразование исключения агентов заключается в том, что мы рассматриваем описание взаимодействия нескольких агентов вместе с описанием поведения этих агентов как единое более сложное взаимодействие остальных агентов. В отличие от предыдущих это преобразование изменяет набор блоков модели и, возможно, уничтожает инвариантные имена, однако система соотношений модели в результате этого преобразования остается математически эквивалентной исходной. Если исключить всех агентов, получится описание экономики как нерасчлененного взаимодействия природной среды и человека. Заметим, что такая форма модели может быть удобна для аналитического исследования.

В моделях САРЭ обычно не больше десяти агентов. Можно перебрать все возможности исключения агентов в данной модели и затем сравнить результаты с другими моделями, сопоставляя только набор блоков и инвариантные имена. Так можно будет найти сходство моделей, не являющихся вариациями друг друга.

5. Функции и архитектура системы ЭКОМОД

Проектируемая система предназначена для поддержки всех этапов работы с математическими моделями САРЭ:

- построения новой модели⁴;
- информационного наполнения модели;
- проведения численных экспериментов;
- интерпретации результатов.

Пользователями системы будут специалисты высокой квалификации как в области разработки и исследования моделей экономики, так и в области инженерии знаний.

Построение новой модели. На входе мы имеем поток поступающих математических соотношений модели. На выходе мы должны получить каноническую форму этих соотношений. Эта цель достигается следующей последовательностью операций, осуществляемых отдельными модулями системы ЭКОМОД:

1. *Ввод модели* через окна разных типов автоматически определяет, к какому блоку, подблоку, группе принадлежит вводимое соотношение. Это гарантирует выполнение некоторых правил канонической формы, например, что разные блоки не пересекаются между собой.
2. *Редактор* обеспечивает ввод, поиск, просмотр и замену соотношений модели.
3. *Синтаксический анализатор* проверяет выполнение правил записи отдельного соотношения, обновляет список переменных и соотношений, классифицирует соотношения и величины.
4. *Семантический анализатор* проверяет совместимость введенного соотношения с остальными соотношениями модели в силу правил построения канонической формы, которые записаны как аксиомы формальной теории.
5. *Генератор* порождает некоторые соотношения, необходимость которых по умолчанию вытекает из правил построения канонической формы.
6. *Система модификации* обеспечивает поиск подходящих фрагментов других моделей и включение их в данную модель. Важнейшая функция этой системы - работа с библиотекой стандартных операций, которая в принципе организуется так же, как библиотеки стандартных процедур в системах программирования.

⁴или сборки из уже существующих блоков готовых моделей.

7. Система визуализации показывает функциональные и потоковые схемы модели. Визуализация модели позволяет пользователю быстро ориентироваться в системе уравнений и создать целостный образ модели. Образ модели поможет найти в архиве модель, которую можно использовать частично или целиком.

Информационное наполнение моделей. Чтобы найти решения системы уравнений модели, необходимо задать: а) конкретный вид некоторых функций и распределений случайных факторов; б) значения констант; в) начальные условия для дифференциальных уравнений.

Если бы статистические показатели исчислялись строгими процедурами агрегирования, как индексы потребительского спроса и цен потребительских товаров, задача информационного наполнения моделей была бы гораздо проще. В существующих же обстоятельствах приходится решать задачу накопления *модельной* базы статистических данных. Для этого нужно

- Создавать базы исходных данных экономической статистики с указанием методов получения этих данных.
- Проверять, удовлетворяют ли исходные данные уравнениям материальных и финансовых балансов. Если нет, то корректировать данные.
- Оценивать непосредственно параметры модели по исходным данным методами математической статистики.
- Оценивать косвенно по совпадению модельных и статистических данных те параметры модели, которые не поддаются непосредственной оценке.

Проведение численных экспериментов. Вычислительные эксперименты с моделью САРЭ проводятся с целью решить одну из трех взаимосвязанных, но все же различных задач:

- косвенная оценка параметров модели;
- исследование качественных свойств модели как динамической системы;
- выявление качественных и количественных характеристик развития рассматриваемой социально-экономической системы.

Решение каждой из этих задач требует своего подхода к планированию эксперимента, но сам эксперимент всегда сводится к многократным вычислениям решений системы уравнений модели.

Вычислительная математика обычно сталкивается с достаточно узким классом заведомо трудоемких задач. Ставится вопрос о выборе метода решения конкретной задачи данного класса с максимальной точностью за приемлемое время. Решается этот вопрос с помощью априорных оценок погрешности численного метода для данного класса задач через производные правых частей уравнений, кривизну граничных кривых, и т. п.

В экспериментах с моделями САРЭ нам обычно не требуется высокая точность, а отдельный расчет не слишком труден. Зато сама форма уравнений весьма разнообразна и нестабильна. В нашей практике, например, встречались дифференциальные уравнения с разрывной правой частью или с переменным запаздыванием. Для такого широкого класса систем нет каких-либо общих априорных оценок точности и устойчивости численных методов решения. Более того, установление окончательной формы соотношений - это одна из целей эксперимента. В этих условиях в случае возникновения вычислительных трудностей часто самым разумным будет просто заменить "нехорошие" уравнения.

Исходя из этих особенностей вычислительного эксперимента с моделями САРЭ, мы решили в системе ЭКОМОД отказаться от идеи выбора вычислительного метода на основе строгих априорных оценок или экспертных рекомендаций. Вместо этого система будет автоматически проводить пробные расчеты с помощью нескольких различных простых методов (явная схема Эйлера, неявная схема Эйлера, метод Ньютона, и т. п.) и по результатам этих расчетов, опять-таки автоматически, но уже *a posteriori* выбирать вычислительный метод для данной модели.