

УДК 519.86

Интенсивный экономический рост: проблемы моделирования*

О. Н. Поддубная

Белорусский государственный экономический университет
Республика Беларусь, 220070, Минск, пр. Партизанский, 26
poddubnaya.o@tut.by; +375293540706

В рамках современной теории интенсивного роста формализованы основные эндогенные и экзогенные факторы инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств. С помощью системно-структурного подхода предложена модель системы, объединяющей два подпроцесса: "инвестиции для инноваций" и "инновации для инвестиций", на основе матричных дифференциально-алгебраических систем с запаздывающим аргументом. Рассмотрена методика определяющих уравнений для изучения актуальных вопросов качественной теории управления такими системами.

Ключевые слова: *интенсивный экономический рост; инновационно-инвестиционный цикл; долгосрочное прогнозирование; дифференциально-алгебраическая система с запаздыванием; определяющие уравнения.*

DOI: 10.17072/1993-0550-2016-2-88-97

Введение

В современной теории экономического развития проблема интенсивного экономического роста заняла одно из центральных мест. С начала XX в. стало развиваться моделирование динамики экономических систем. Современная теория роста включает в себя различные экономико-математические модели, в которых формализуются различные концепции и научные гипотезы.

Целью создания динамических моделей экономического роста являются исследование условий достижимости оптимального темпа экономического роста и выработка долгосрочной эффективной экономической политики для каждой конкретной страны. Переход к инновационной экономике требует от государств выработки и реализации стратегии научно-технического и промышленного разви-

тия, которая опиралась бы на имеющийся научно-технический и производственный потенциал и была бы направлена на содействие структурным преобразованиям в экономике в направлении преодоления экспортно-сырьевой зависимости и обеспечение стабильно высокой динамики и качества экономического роста.

В Республике Беларусь общий порядок разработки прогнозов определен Законом "О государственном прогнозировании и программах социально-экономического развития Республики Беларусь" (май 1998 г.), в соответствии с которым прогнозы социально-экономического развития являются основой плановой деятельности органов управления как в целом по стране, так и на уровне регионов. Закон предусматривает разработку долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных прогнозов.

1. Этапы развития теории экономического роста

Теория экономического роста пережила три основных этапа развития. Первый был

© Поддубная О. Н., 2016

*Статья написана по материалам международного симпозиума "Дифференциальные уравнения. Сто лет математической науке Урала". Пермь. 16–19 мая 2016.

связан с работами Р. Харрода [1] и Е. Домара [2], которые появились в конце 30-х и 40-х гг. XX в. Р. Харрод и Е. Домар независимо друг от друга построили простейшую посткейнсианскую модель экономического роста, в которой кейнсианские предпосылки и методы анализа экономической конъюнктуры в коротком периоде использовались для описания экономических процессов в длинном периоде. Однако, как отмечал сам Е. Домар, предтечей его работ была модель долговременного планирования советского экономиста А.Г. Фельдмана [3].

В середине 50-х гг. прошлого века появление неоклассической модели роста Р. Солоу [4] и Т. Свана [5] вызвало вторую волну интереса исследователей-экономистов к данной тематике. В модели Солоу–Свана впервые показано, что в долгосрочном периоде интенсивный экономический рост зависит от темпа технического прогресса, учитывавшийся в модели как экзогенный фактор.

Третий этап исследований начался в середине 1980-х гг. с работ П. Ромера [6] и Р. Лукаса [7] и продолжается до настоящего времени. "Новая теория роста", разработанная П. Ромером и его последователями, поставила во главу угла технологическое развитие.

В последнее десятилетие XX в. были построены качественно новые теоретические модели, в которых предпринята попытка обосновать эндогенную природу технологических изменений, порождающих экономический рост. Принципиальная особенность этих моделей заключается в том, что их производственная функция содержит в той или иной форме новую переменную – человеческий капитал, – характеризующую объем научных знаний и практического опыта, накопленных в процессе обучения.

При формировании тех или иных стратегий экономического развития с помощью математического моделирования, позволяющего количественно описать качественные законы экономической динамики, сторонники новой классической макроэкономики отмечают, что главная проблема в исследовании факторов экономического роста переместилась от статистического анализа количественных переменных к качественному анализу. Потребовались органическое сочетание методов количественного и качественного анализа и разработка специальных методов исследо-

вания качественных переменных с целью включения их в общую структуру моделей. Нобелевские лауреаты по экономике Р. Лукас, Ф. Кюдланд, Э. Прескотт, Э. Фелпс, Т. Сарджент, К. Симс, чьи имена связывают с так называемой неоклассической макроэкономикой и теорией рациональных ожиданий, в своих работах развивали идею о том, что разумные модели макроэкономики должны строиться не на эмпирических закономерностях, найденных в данных, а на обоснованных теоретических предположениях о поведении оптимизирующих агентов.

При анализе экономической статистики затруднительно что-либо говорить о причинно-следственной связи между факторами – можно наблюдать лишь их корреляции. Но если исследователь стремится использовать эту закономерность для сценарного прогнозирования или макроэкономической политики, то необходимо понять ее природу – при обнаружении эмпирической закономерности он должен в первую очередь предложить внутренне логическую теоретическую модель, основанную на разумных предпосылках и способную объяснить причинно-следственные связи между интересующими факторами.

На следующем этапе необходимо проверять на статистических данных всю модель целиком, чтобы убедиться, что логика рассуждений не противоречит фактам. Если у исследователей в арсенале несколько моделей, то следует выявлять те аспекты, которые максимально отклоняют построенные прогнозы от реальных данных, и либо улучшать модель, либо отказаться от нее в пользу альтернативной. Поскольку экономисты "новой волны" концентрировались на поиске внутренних источников постоянного роста, и связывали возможность возникновения постоянно поддерживаемого роста с поведенческими параметрами модели, ими разрабатывались аналитические модели дедуктивного типа в отличие от статистических (измерительно-отражательных) моделей, при построении которых преобладает индуктивный подход. Такие модели позволяют осуществлять реконструкцию отсутствующих данных о динамике изучаемого процесса на некотором интервале времени; анализ альтернатив экономического развития; теоретическое исследование возможного поведения изучаемого явления (или

класса явлений) по построенной математической модели.

При создании математической модели того или иного процесса исследователь всегда находится перед дилеммой соблюдения разумного баланса между понятностью, простотой модели и ее достаточной детализированностью. По мнению многих авторов, при создании базовых моделей приоритет должен отдаваться простоте модели, в которой, тем не менее, должны быть отражены ключевые факторы и их взаимосвязи. Пройдя верификацию статистическими данными и научным сообществом, работоспособная модель подвергается модификации, обычно усложняясь в результате добавления в нее новых факторов и математических закономерностей, связывающих их.

Выделяя ключевые факторы и описывая общие закономерности, присущие многим экономическим процессам, протекающим на микро-, мезо- и макроуровнях, при создании базовых моделей крайне важно (более того, экономически целесообразно) при выборе математического инструментария учитывать возможность адаптивной настройки такой модели. В качестве примера адаптивной модели можно привести разнообразные матричные модели, которые легко агрегируются с одной стороны, а с другой – детализируются, что крайне актуально при моделировании интеграционных процессов.

Следует отметить, что у экономистов нет единых подходов определения эндогенности или экзогенности переменных величин. Фактически тип фактора зависит от трактовки авторами условий моделей. Автор статьи придерживается мнения, что между эндогенными величинами имеются прямые и обратные связи, в отличие от экзогенных величин, которые не испытывают обратного воздействия в рамках данной модели.

По мнению многих авторов, наиболее точные современные прогнозные модели экономической динамики, учитывающие предпочтительность в макроэкономике правил политики с обратной связью (feedback policy rule), содержат лаговые переменные, характеризующие элементы обратной временной связи и влияния. Например, в модели необходимо учесть фактор, описывающий инвестиции.

В реальной жизни, очевидно, для того, чтобы перевести полученные инвестиции в новые производственные мощности (часто говорят "освоить инвестиции"), требуется время. Экономически разумным подходом, описывающим превращение инвестиций в новые основные фонды, с учетом эффекта запаздывания является введение в динамический фактор временного лага.

2. Модель инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств

Результат любого высокотехнологичного производства можно разделить на две составляющие: непосредственно материальный продукт, который однозначно имеет стоимостную оценку, и множество дифференцированных продуктов, определяемые как знания. Оценка продуцируемых знаний в денежно-материальной форме – одна из основных проблем, возникающая при анализе и моделировании высокотехнологичных производств.

В работах [8–11] автор предлагает подходы к вопросам моделирования инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств.

В качестве оценочного критерия инновационного потенциала и роста отраслей высоких технологий примем величину и динамику объемов реализованной продукции, созданной с использованием высоких технологий (емкость рынка). Данные показатели являются мерой материального продукта. Кроме того, в модели использованы аналогичные показатели объемов коммерческих сделок по торговле технологиями и услугами технического характера, которые, на наш взгляд, отражают возможную оценку продуцируемых знаний в данной отрасли как самостоятельного коммерческого продукта.

Таким образом, нами в качестве наиболее общего показателя материального продукта выбрана емкость рынка, хотя совокупность факторов, описывающих материальный продукт, достаточно велика. Прочими, менее значимыми факторами, оказывающими в той или иной мере влияние на динамику развития рынка, на данном этапе создания модели мы пренебрегаем.

Одним из немаловажных факторов, определяющих состояние рынка, являются инве-

стиции. Из всех подходов к классификации инвестиций для нас особую значимость имеет деление инвестиций на амортизационные отчисления и чистые инвестиции (как раз и являющиеся добавочными вложениями), а также на капитальные затраты и текущие.

Производство "чистого" знания компаниями высокотехнологического сектора будет включено в модель в качестве затратной компоненты. Рассматривая инвестиционный цикл, необходимо проводить определенные различия между текущими и капитальными инвестициями. В то же время особенности производств 5-го и 6-го технологических укладов таковы, что, по своей сути, большинство затрат являются капитальными, хотя формально отдельные расходы (например, зарплата работников научных и конструкторских подразделений, другие аналогичные выплаты) являются текущими. Кроме того, далеко не все расходы в НИОКР оправдывают себя в текущем периоде – отдача от них может проявиться спустя некоторое время, а иногда они могут найти реализацию в других отраслях. Кроме того, сами по себе капитальные инвестиции включают в себя как расходы на создание "чистого" знания (по сути – это затраты живого труда), так и материальную составляющую (овеществленный труд).

Однако особенность высокотехнологического сектора состоит в том, что на фоне общих издержек расходы на оборудование могут быть очень незначительны (особенно это характерно для 5-го технологического уклада: сферы информационных технологий, создание и управление базами данных и т.п.). Тем не менее, в модели присутствуют как компонента затрат на "чистое" знание (расходы на НИОКР), так и материальная компонента, связанная с производством знаний опосредованно. При необходимости возможна дальнейшая дезагрегация инновационной составляющей: включение в модель внутренних и внешних затрат сектора на НИОКР, выделение среди капитальных вложений затрат на технологическое оборудование и инфраструктуру, в первую очередь – на информационные системы, влияющие на скорость обмена (и создания) знания.

Объем налоговых льгот, таможенных преференций, амортизационной политики и ряд других факторов рассматриваются в мо-

дели как внешние управляющие воздействия, которые отражают роль государства в современной инновационной экономике, которая состоит не столько в поддержке тех или иных инноваций, направлений, отраслей или "точек роста", сколько в формировании организационных, экономических и нормативно-правовых условий для инновационного процесса. При этом современная тенденция – постепенный переход от прямых методов государственной поддержки к большему использованию преимущественно косвенных методов, направленных на активизацию негосударственных экономических субъектов – как инвесторов, так и самих участников инновационной деятельности.

На этапе логического дизайна разрабатываемой модели необходимо подробно описать взаимосвязи между экономическими факторами, опираясь на различные гипотезы, теории и содержательный анализ собственных посылок. В частности, формализуя логику процесса "инвестиции для инноваций" [9], предполагаем, что темп роста емкости рынка высокотехнологичной продукции линейно и аддитивно зависит от

♦ объема уже реализованной на рынке высокотехнологичной продукции. Данное предположение базируется на концепции жизненного цикла (ЖЦ) товара и рынка, объясняющей различную скорость роста (сокращения) рынка в зависимости от стадии его ЖЦ (фактически – от реакции потребителей на товар, т.е. от вида и характера спроса);

♦ объема реализованных объектов интеллектуальной собственности (ОИС). Данный параметр опосредованно выражает, по нашему мнению, интенсивность производимых знаний в данной отрасли. Непрерывный процесс создания знаний порождает в некоторой степени их избыток у фирм-новаторов, которые оказываются либо не в состоянии воплотить новые знания в своих материальных продуктах в приемлемый для их разработки срок, либо, наоборот, сознательно делают выбор в пользу новых разработок, коммерциализируя тот интеллектуальный продукт, который пока еще востребован рынком. Поступая от разработчика в распоряжение других субъектов рынка, ОИС стимулируют до определенного предела рост производства и продаж высокотехнологичных продуктов в

натурально-вещественной форме. В зависимости от отрасли и степени готовности фирм-последователей воспринять новое знание, полученное от фирм-новаторов, характер взаимосвязи между объемом реализуемых ОИС и создаваемых на их основе инновационных продуктов может быть различным. Необходимо отметить, что влияние данного фактора на скорость роста объемов продаж на конкретном сегменте товарного рынка лежит не только на стороне предложения, но и на стороне спроса, поскольку может стимулировать спрос на отдельные компоненты высокотехнологичной продукции, которые используются при создании товара на основе данных ОИС;

◆ объема чистых инвестиций. Влияние данного фактора на скорость роста рынка вполне очевидно, тем не менее, необходимо указать на то, что данный параметр является затратным. В модели используются две компоненты инвестиций – капитальные затраты на приобретение оборудования и затраты на НИОКР. Несмотря на то, что чисто механически затраты на НИОКР можно подразделить, в свою очередь, на текущие и капитальные. С точки зрения создания знаний все они чаще всего являются капитальными, поскольку возвращают свою стоимость в течение некоторого периода, нескольких производственных циклов. Особо следует выделить затраты на разработки, не нашедшие своего применения в текущем периоде в натурально-вещественном продукте либо коммерческих ОИС. Чтобы поддерживать высокий уровень процесса производства новых знаний, инвесторы вынуждены возмещать указанные расходы. Источниками их финансирования в корпорациях, имеющих собственные крупные исследовательские подразделения, чаще всего является монополия цена реализуемых на рынке товаров и ОИС;

◆ характера управленческих воздействий. Основными управленческими компонентами являются объем налоговых льгот, полученных субъектами данной отрасли при производстве высокотехнологичной продукции, объем таможенных преференций при импорте оборудования и ОИС, амортизационная политика в данной отрасли (численное выражение последний фактор находит в нормах амортизации оборудования и нематериальных активов

при производстве высокотехнологичной продукции и ОИС).

Полагаем также, что имеет место линейная аддитивная зависимость темпа роста объемов сделок с ОИС от:

◆ объемов реализованной высокотехнологичной продукции. Данная гипотеза базируется на том, что увеличение емкости рынка стимулирует приток новых участников этого рынка, так называемых фирм-последователей, которые как раз и выступают основными покупателями ОИС;

◆ объемов реализованных ОИС. Абстрагируясь от специфики ОИС и воспринимая их как объекты купли-продажи, подверженные определенным этапам ЖЦ, полагаем, что скорость продаж ОИС определяется в немалой степени емкостью этого сегмента рынка, хотя границы насыщения таких рынков более размыты;

◆ объемов чистых инвестиций. Поскольку ОИС производятся в отрасли наравне и даже опережая производство высокотехнологичного продукта в натурально-вещественной форме, то и указанная взаимосвязь обусловлена теми же причинами;

◆ характера управленческих воздействий идентично характеру их влияния на темпы роста объема материального продукта.

При формализации логики процесса "инновации для инвестиций" [10] предполагается наличие линейной связи между объемом чистых инвестиций (отдельно для капитальных затрат и затрат на НИОКР) в данной отрасли и такими факторами, как:

◆ объем рынка высокотехнологичной продукции. Включение данной компоненты достаточно очевидно, так как определяет возможности отрасли по внутреннему инвестированию;

◆ объем реализованных объектов ИС. Помимо наличия указанного выше фактора усиления внутренних инвестиционных возможностей корпораций, существование самостоятельного сегмента рынка объектов ИС в данной отрасли выступает мощным стимулом, лежащим на стороне спроса и повышающим привлекательность данной сферы для внешних инвестиций;

◆ объем чистых инвестиций в предыдущий период. Наличие запаздывающего аргумента в данной функции вызвано тем, что

привлекательность отраслей высоких технологий для новых инвесторов (из традиционных отраслей) в немалой степени обусловлена инвестиционной активностью в данной сфере в предыдущие периоды. Объяснений данному феномену может быть несколько, однако главные, на наш взгляд, состоят в следующем. Во-первых, инвестиционный "бум" искусственно расширяет границы рынка и увеличивает его емкость, обещая возврат даже тех вложений, которые сделаны в более поздние периоды. Разумеется, при этом возрастает роль и значение маркетинговых инструментов для создания и поддержания высокого спроса, и значительная часть новых инвестиций идет уже на организационные инновации. Во-вторых, значительный объем инвестиций, сделанных на предыдущем этапе, свидетельствует о большой сумме накопленных знаний и высоком "разогреве" рынка, когда даже незначительное нововведение может превратиться в коммерчески выгодный продукт. Типичный пример подобного "самовозрастания" инвестиций демонстрировали в последнее десятилетие различные сегменты IT-рынка, особенно рынок т.н. "dot-com'ов". И хотя в определенный момент времени произошел обвал данного рынка, взаимозависимость между объемом прошлых и настоящих инвестиций в высокотехнологичных отраслях стала вполне очевидной;

- ♦ характер управленческих воздействий.

С целью прогнозирования конъюнктуры рынка высокотехнологичной продукции, целесообразности инвестиций и их ожидаемой отдачи в работе [8] обсуждается подход к формализации экономических отношений, возникающих в процессе инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств, рассматривая его в неразрывности и двунаправленности таких подпроцессов, как "инвестиции для инноваций" [9] и "инновации для инвестиций" [10] (см. рис. 1).

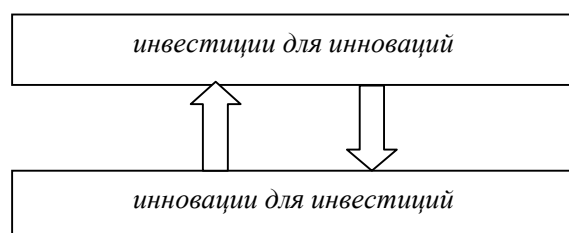


Рис. 1. Инновационно-инвестиционный цикл высокотехнологичных производств

В основу предлагаемой управляемой модели рынка высокотехнологичной продукции, связывающей объем производимых знаний и материального продукта с инвестиционной активностью субъектов данного рынка (эндогенные факторы) и вектором государственной политики (экзогенный фактор), легла матричная система дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dV(t)}{dt} &= A V(t) + B I(t) + C U(t), \\ I(t) &= G V(t) + K I(t-h) + L U(t), \end{aligned} \quad (2.1)$$

$t \geq h, \quad h = const.$

Здесь $V(t), I(t) \in R^2, U(t) \in R^4$ – факторы модели, являющиеся векторными функциями от временного аргумента, выраженные в каждый момент в денежных единицах:

$V(t) = [v_1(t) \ v_2(t)]^T$ – емкость рынка (где $v_1(t)$ – объем выпускаемых товаров и услуг; $v_2(t)$ – объем коммерческих сделок по торговле объектами интеллектуальной собственности);

$I(t) = [i_1(t) \ i_2(t)]^T$ – объем инвестиций (где $i_1(t)$ – общие затраты сектора рынка высокотехнологичных производств за исключением затрат на НИОКР; $i_2(t)$ – инвестиции в новые знания (затраты на НИОКР));

$U(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ u_3(t) \ u_4(t)]^T$ – экзогенные управляющие воздействия (где $u_1(t)$ – объем налоговых льгот и таможенных преференций; $u_2(t)$ – объем амортизационных отчислений; $u_3(t)$ – денежно-кредитная политика; $u_4(t)$ – уровень патентно-правовой защиты авторских прав).

Соответствующие элементы матриц $A, B, G, K \in R^{2 \times 2}, C, L \in R^{2 \times 4}$ задают вес каждого компонента отрасли, инвестиционной программы, управленческой политики в процессе высокотехнологичного производства, которые можно назвать структурными характеристиками системы.

Следует отметить, что размер матриц A, B, G, K, C, L , вообще говоря, определя-

ются размерностями параметров $V(t), I(t), U(t)$ модели, которые в случае необходимости могут быть уточнены, т.е. система может быть "настроена" исследователем с помощью расширения векторов $V(t)$, и/или $I(t)$, и/или $U(t)$ и соответственно добавления в (1) одноподобных уравнений, что, тем не менее, не скажется на общем виде матричной системы (2.1). Матричные системы очень удобны, если в дальнейшем предполагается агрегирование или дезагрегирование экономических категорий, входящих в модель.

Начальные условия для системы зададим в виде:

$$V(h) = V_h, I(\tau) = \psi(\tau), \tau \in [0, h]. \quad (2.2)$$

С точки зрения экономики начальные условия (2.2) могут быть интерпретированы следующим образом. В момент времени t от 0 до h осуществляются инвестиции в технологические инновации, закладывающие основу будущего рынка. Особенностью кардинальных инноваций, запускающих механизмы инновационного скачка, можно считать то, что в большинстве случаев они возникают после паузы, необходимой для превращения фундаментальных научных идей в прикладные или технологические разработки. $V(h) = V_h$ – объем потенциальных инноваций, который необходим для инновационного скачка. Стадия принятия решения относительно коммерциализации инновации – подготовительная стадия – характеризуется тем, что на формирующихся рынках высокотехнологичной продукции первоначальный спрос, с одной стороны, может присутствовать в неявном виде – в ожидании технических и технологических решений, способных его удовлетворить, а с другой стороны, система или социальная среда во многих случаях может оказаться совершенно не готовыми к восприятию инноваций. На этой стадии осуществляющиеся инвестиции в технологические инновации, закладывающие основу будущего рынка, являются абсолютно затратными и способными окупиться только на последующих временных интервалах.

Следует отметить, что переменная $V(t)$ может описывать как емкость рынка, так и объем выпуска в зависимости от того, какая

динамика прогнозируется – спроса или предложения. С точки зрения сбора статистического материала, безусловно, легче моделировать и прогнозировать динамику объема выпуска.

Теоретические основы концепции человеческого капитала, различные методики его измерения, а также способы учета в динамических моделях экономического роста разрабатывались такими учеными, как Г. Беккер (G. Becker), М. Блауг (M. Blaug), Э. Денисон (E.F. Denison), П. Кленов (P.J. Klenow), Дж. Ли (J. Lee), Ф. Махлуп (F. Machlup), Н. Мэнкью (N.G. Mankiw), Дж. Минсер (J. Mincer), Т. Шульц (T.W. Schultz), Д. Вейл (D.N. Weil), Л. Восманн (L. Wosmann), С. Глазьев, А. Варшавский, и другие. Большой вклад в разработку теоретических и методологических аспектов исследования проблем экономического роста и развития, построение и исследование их математических моделей внесли такие ученые, как К. Эрроу (K.J. Arrow), Д. Касс (D. Cass), Т. Купманс (T. Coopmans), Е. Домар (E.D. Domar), Р. Харрод (R.F. Harrod), Н. Калдор (N. Kaldor), Р. Лукас (R. Lucas), Ф. Рамсей (F.P. Ramsey), П. Ромер (P. Romer), Р. Солоу (R.M. Solow), Х. Узава (H. Uzawa), Н. Кондратьев, В. Макаров и другие.

Несмотря на то, что исследования в области моделирования инновационной и инвестиционной составляющих современной экономики ведутся достаточно интенсивно, предложенная автором формализация инновационно-инвестиционной динамики высокотехнологичных производств в виде системы (2.1), (2.2) ранее в литературе не встречалась.

Описание инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств с помощью дифференциально-алгебраической системы (2.1), (2.2) отражает общее свойство экономических систем – полиструктурность, т.е. взаимопроникновение разнокачественных подсистем. Первое уравнение системы (2.1) является дифференциальным, которое описывает связь таких факторов, как темп усвоения инноваций с емкостью рынка, объемом инвестиций и рядом управляющих факторов, характеризующих политику государства, формирующую среду для развития наукоемких, высокотехнологичных секторов производства. Темп усвоения инновации – это скорость, с которой она принимается членами

социальной системы. На темп усвоения инновации в наибольшей степени влияет уровень ее соответствия существующим ценностям и нуждам потребителя, а также прошлому опыту.

Из теории дифференциального исчисления известно, что если функция дифференцируема, то она является непрерывной, что не противоречит тому факту, что процесс накопления знаний (человеческого капитала) является непрерывным во времени. В рассматриваемой модели траектория изменения во времени фактора $V(t)$, описывающего инновационную динамику, непрерывна. Второе уравнение системы (2.1) является алгебраическим, связывающим объем текущих инвестиций с текущими емкостью рынка и управляющими воздействиями, а также объемом инвестиций в предыдущем периоде. Как следует из структуры второго уравнения системы (2.1), траектория изменения во времени фактора $I(t)$, описывающего инвестиционную динамику, является кусочно-непрерывной (отличной от нуля только в дискретные моменты времени в частном случае), что не противоречит реальности.

Следует также отметить, что, по мнению автора, более адекватное моделирование экономической динамики возможно с учетом в модели зависимости ряда переменных от одного или нескольких лагов. Любая экономическая система в своем развитии во времени использует информацию из прошлых периодов, информация накапливается и не забывается, т.е. любая экономическая система обладает памятью.

Более того, в отличие от технических систем, для которых возможность принудительного возвращения текущего состояния в исходное ("сброс на ноль") никак не повлияет на состояние системы при повторном ее запуске, для экономических процессов любой начальный момент времени $t = 0$, с которого систему начинают изучать, относительно момента $t = h$ (моментов $t_i = h_i, i = 1, 2, \dots, n$), т.е. любое состояние экономической системы в настоящий момент времени определяется ее состояниями в прошедших периодах. Поэтому любые прогнозные модели экономической динамики должны содержать лаговые переменные. Наличие временного лага характеризует не только элементы обратной связи и об-

ратного влияния, но и цикличность в динамике процесса. Величина лага h может определяться продолжительностью коротких, средних и длинных циклов экономической динамики, что настраивает модель на соответствующее кратко-, средне- или долгосрочное сценарное прогнозирование.

Ввиду линейности системы (2.1), (2.2), ее решение может быть представлено в виде суперпозиции векторных функций, одна из которых зависит только от начальных данных, а другая – от управляющего воздействия, а именно:

$$\begin{bmatrix} V(t; V_h, \psi, U) \\ I(t; V_h, \psi, U) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V(t; V_h, \psi, 0) \\ I(t; V_h, \psi, 0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V(t; 0, 0, U) \\ I(t; 0, 0, U) \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

В данном контексте линейность модели инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств можно рассматривать как существенное преимущество. Именно линейность модели позволяет отдельно изучить динамику системы без воздействия внешних управлений (если $U(\cdot) \equiv 0$), описываемую первым слагаемым в правой части формулы (2.3), а также динамику системы только под воздействием линейной комбинации компонент внешнего управления $U(t)$ (если $V_h \equiv 0, \psi(\cdot) \equiv 0$), описываемой вторым слагаемым в правой части формулы (2.3). Такое представление удобно, в первую очередь, ввиду возможности моделирования экономик различного типа. Первое слагаемое формулы (2.3) описывает инновационно-инвестиционную динамику промышленности государств, экономика которых функционирует в режиме, когда управляющие воздействия со стороны государства близки к нулю, но имеются начальные инвестиции (внешние или внутренние). Второе же слагаемое формулы (2.3) формирует инновационную $V(t)$ и инвестиционную $I(t)$ траектории экономической динамики государств, не обладающих достаточным объемом начальных инвестиций, при этом вектор государственного регулирования экономики значителен. Безусловно, рассмотренные ситуации крайне идеализированы, и трудно назвать страны, экономическая динамика которых полностью описывается либо первой, либо второй компонентой суммы (2.3). А вот наложение этих двух компонент позволяет адекватно описывать экономиче-

скую динамику на макро- уровне. Более того, суперпозиция (2.3) собственной и управляемой динамик системы (2.1), (2.2) придает гибкость промышленной политике государства, позволяя в определенный промежуток времени варьировать соотношением слагаемых.

Стоит отметить, что экономический рост – это естественный процесс, в основе которого лежит закон циклического развития экономики, а не результат успешной политики государства. Роль и заслуга государства состоит в том, чтобы эффективно управлять экономической системой для достижения приоритетных целей (для максимизации положительных эффектов и минимизации отрицательных) в рамках многокритериальной экономической политики.

С точки зрения теории управления для линейных систем вида (2.1), (2.2) разработаны подходы для решения вопроса о ее управляемости – существовании вектора допустимого управления $U(\cdot)$ (промышленной политики государства), такого, что для любых начальных данных вида (2.2) система способна через определенный промежуток времени достичь любого наперед заданного состояния.

Для проведения детального анализа происходящих процессов, моделируемых такими системами, в качественной теории управления для решения многих задач (построение решений, вопросы управляемости и наблюдаемости, коррекции) используются так называемые определяющие уравнения (являющиеся в некоторой степени аналогом известных характеристических уравнений из теории обыкновенных дифференциальных уравнений). Для системы (2.1) определяющие уравнения можно представить в виде рекуррентных соотношений [11]:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_k(jh) &= A\tilde{V}_{k-1}(jh) + B\tilde{I}_{k-1}(jh) + C\tilde{U}_{k-1}(jh), \\ \tilde{I}_k(jh) &= G\tilde{V}_k(jh) + K\tilde{I}_k(jh-h) + L\tilde{U}_k(jh), \\ k &= 0, 1, \dots; \quad j = 0, 1, \dots; \end{aligned} \quad (2.4)$$

с начальными условиями вида:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_k(jh) &= 0, \quad \tilde{I}_k(jh) = 0, \quad \text{если } k < 0 \text{ и } j < 0; \\ \tilde{U}_0(0) &= E_{4 \times 4}, \quad \tilde{U}_k(jh) = 0_{4 \times 4}, \quad \text{если } k^2 + j^2 \neq 0. \end{aligned}$$

Здесь $\tilde{V}_k(jh), \tilde{I}_k(jh) \in R^{2 \times 4}; k, j \in Z$.

Замечание

Нетрудно видеть, что $\tilde{V}_0(jh) \equiv 0, j \geq 0$.

Уравнения (2.4) определяют математическую структуру системы (2.1). Системы вида (2.4) относятся к классу дискретных линейных 2D систем (Two-dimensional systems) с запаздыванием по обоим переменным (k и j). Возможность изучения свойств системы (2.1) с помощью ее структуры (2.4) базируется на дискретизации непрерывного времени и аргументируется соображениями философского характера, выраженных словами Н.Н. Моисеева [12] о том, что любое детальное исследование неизбежно требует перехода к *дискретному* описанию. Следует отметить, что система (2.4) имеет одно существенное отличие от классических 2D систем, в которых одна переменная, например k , характеризует пространственное состояние системы, а другая – j – ее временное состояние, тогда как в системе (2.4) обе переменные и k , и j – временные переменные. Переменная k позволяет описать дискретный аналог производной $\frac{dV(t)}{dt}$, определяющей темп изменения емкости рынка высокотехнологичной продукции, а с помощью переменной j дискретизируется само время t протекания процесса.

Следует отметить, что изучение систем вида (2.4) интересно и актуально как в связи с ее структурной взаимосвязью с динамической системой (2.1), так и с точки зрения ее самостоятельного прикладного аспекта. Авторы некоторых публикаций [13] считают преимуществом описания экономических процессов с помощью таких математических моделей то, что эти модели изменяют свое состояние в определенные (дискретные) моменты времени, а приращения или разности значений величин являются аддитивными алгебраическими различителями дифференциальных и интегральных операторов. Такой подход аргументирован новой веткой математического анализа – квантовым исчислением, образно характеризуемым как "математический анализ, или дифференциальное исчисление, без взятия пределов". Однако, на наш взгляд, при изучении сложных разнокачественных подпроцессов, взаимодействующих в реальных экономических процессах, подход, при котором две системы (2.1) и (2.4) рассматриваются в концепции структурно-системной взаимосвязи,

более предпочтителен. В этом случае в арсенале исследователя остается классический математический инструментарий и используются новые современные теории и методы.

Таким образом, рассмотренная в настоящей работе экономико-математическая модель предлагает новый взгляд на формализацию взаимосвязей между ключевыми факторами современных высокотехнологичных производств, оказывающих влияние на динамику рынков наукоемкой продукции и коммерциализированного знания (в виде ОИС), и может быть использована при разработке долгосрочных прогнозных сценариев систем различного уровня. Такой подход позволяет, варьируя параметрами сценарной карты (управляющие воздействия, начальные условия, матричные коэффициенты), получать многовариантные сбалансированные прогнозы на задаваемую перспективу.

Список литературы

1. *Harrod R.* An essay in dynamic theory // *Economics Journal*, 1939. Mar. Vol. 49.
2. *Domar E.* Expansion and employment // *American Economic Review*, 1947. Mar. Vol. 37.
3. *Фельдман Г.А.* К теории темпов народного дохода // *Плановое хозяйство*. 1928. № 11–12.
4. *Solow R.M.* A Contribution to the Theory of Economic Growth // *Quarterly Journal of Economics*. 1956. P. 63–94.
5. *Swan T.* Economic Growth and Capital Accumulation // *Economic Record*. 1956. Vol. 32.
6. *Romer P.M.* Endogenous technological change // *Journal of Political Economy*. 1990. October. Vol. 98, № 5. P. 71–102.
7. *Lucas Jr.R.E.* On the Mechanics of Economic Development // *Journal of Monetary Economics*. 1988. Vol. 22, № 1. P. 3–42.
8. *Поддубная О.Н.* Динамическая модель инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств // *Тр. БГЭУ*, 2010. С. 347–353.
9. *Поддубная О.Н.* Особенности построения динамической модели рынка высокотехнологичной продукции // *Вестник БГЭУ*. 2009. № 6. С. 45–51.
10. *Поддубная О.Н., Шутилин В.Ю.* Подходы к моделированию инвестиционного цикла высокотехнологичных производств // *Вестник БГЭУ*. 2009. № 4. С. 30–38.
11. *Поддубная О.Н.* Структура динамической модели инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств // *Тр. БГЭУ*. 2011. С. 323–329.
12. *Муссеев Н.Н.* Человек. Среда. Общество. М.: Наука, 1982. 240 с.
13. *Блюмин С.Л.* Дискретность против непрерывности при системном моделировании во времени и/или пространстве // *Системы управления и информационные технологии*. 2004. № 1(13). С. 4–9.

Intensive economic growth: problems of modeling

O. N. Poddubnaya

Belarus State Economic University; 26, Partizanskiy prospekt, Minsk, 220070, Republic of Belarus
poddubnaya.o@tut.by; +375293540706

Within the bounds of the intensive economic growth theory, the main endogenous and exogenous factors of the innovation-investment cycle in high-technology production are formalized. A model of a system integrating the "investment for innovation" and "innovation for investment" subprocesses is proposed. This dynamical model of the innovation-investment cycle is described on the basis of matrix differential-algebraic systems with a delayed argument. Its structure is proposed as determinative equations being a discrete two-dimensional system. This approach is based on quantum calculus, which is a new branch of mathematical analysis.

Keywords: *intensive economic growth; innovation-investment cycle; long-term prediction; differential-algebraic system with a delayed argument; determinative equations.*