

O. Poddubnaya
BSEU (Minsk)

PROCESS-SYSTEM METHODOLOGY OF ECONOMIC GROWTH MODELLING

In the article single-industry models of macroeconomic dynamics of Harrod — Domar, Leontief, Samuelson — Hicks for continuous time are proposed in the context of process methodology. Based on the principles of interdependence and controllability, the author's model is proposed. This model describes the fast-slow dynamics of the production and investment cycle by differential-algebraic system.

Keywords: macro economical dynamics; economic growth; factor analysis; production function; process-system approach; production and distribution cycle; single-industry model; dynamic balance; finite difference equation; differential equation; differential-algebraic system.

О. Н. Поддубная
кандидат физико-математических наук, доцент
БГЭУ (Минск)

ПРОЦЕССНО-СИСТЕМНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА

В статье в рамках процессной методологии представлены одноотраслевые модели макроэкономической динамики Харрода — Домара, Леонтьева, Самуэльсона — Хикса для непрерывного времени. С учетом принципов взаимообусловленности и управляемости предложена авторская модель, на основе дифференциально-алгебраической системы описывающая быстро-медленную динамику производственно-инвестиционного цикла.

Ключевые слова: макроэкономическая динамика; экономический рост; факторный анализ; производственная функция; процессно-системный подход; производственно-распределительный цикл; модель одноотраслевой экономики; динамическое равновесие; конечно-разностное уравнение; дифференциальное уравнение; дифференциально-алгебраическая система.

Истоки и развитие современной макроэкономической динамики тесно связаны с теорией экономического роста. В 1930-е гг. благодаря прежде всего трудам Р. Харрода и Е. Домара сформировалось так называемое неокейнсианское направление теории экономического роста. Следующий период интенсивных исследований в данном направлении пришелся на 1950-е и 1960-е гг. вслед за разработкой П. Самуэльсоном и Дж. Хиксом моделей бизнес-циклов. После недлительного исследовательского затишья были опубликованы работы П. Ромера, Р. Солоу, Т. Суона, Дж. Мида, В. Леонтьева, Э. Денисона, которые индуцировали новый виток активности по многоаспектному изучению экономического роста научным сообществом. Эти исследования принято считать основополагающими в неоклассической теории экономического роста. Благодаря трудам Г. Беккера, М. Блауга, П. Кленоу, Дж. Ли, Ф. Махлупа, Н. Мэнкью, Дж. Минсера, Т. Шульца, Д. Вейла, Л. Восманна, Р. Лукаса, Х. Узавы, С. Глазьева, А. Варшавского и других ученых закладывались основы так называемой новой теории экономического роста (теории эндогенного роста), отличительной особенностью которой стали новые концепции человеческого капитала и технологических инноваций, а также различные методики их измерений.

Экономический рост можно определить как динамический совокупный показатель, характеризующий состояние экономики страны в целом во временном аспекте. Подобный показатель можно рассчитать и для отдельных секторов экономики, отрасли, предприятия.

Существенную помощь в анализе складывающейся ситуации в инновационно-технологической деятельности, а также в принятии управленческих решений по ее регулированию и поддержке оказывают современные экономико-математические методы, использование которых позволяет формализовать взаимосвязи важнейших факторов или процессов, влияющих на инновационную деятельность и современные тенденции ее развития с целью их количественного и качественного оценивания.

Для исследования экономического роста используются и разрабатываются разные методологии, одной из которых является факторный анализ. В экономической теории под факторами экономического роста понимаются те явления и процессы, которые определяют возможности увеличения реального объема производства, повышения его эффективности и качества. Под факторным анализом понимают комплексное и систематическое наблюдение и измерение влияния определенных факторов на результативный показатель с использованием детерминированных (функциональных) или стохастических (корреляционных) моделей. Одним из успешно используемых инструментов прямого детерминированного факторного анализа являются производственные функции, которые описывают взаимосвязь факторов в определенные периоды времени для изучения стационарных свойств социально-экономических систем.

Весь созданный в экономике продукт появляется в результате определенного взаимодействия производственных факторов — труда L , капитала K , земельных и других природных ресурсов N . Это абсолютные факторы экономического роста, представленные в самом общем, т.е. высокоагрегированном виде. Их воздействие на объем совокупного продукта описывается с помощью известной из микроэкономики простейшей производственной функции:

$$V = f(T, R), \quad (1)$$

где $R = (L, K, N)$ — вектор трудовых, капитальных и природных ресурсов, фактор T отражает обобщенное воздействие технологического прогресса на результаты производства.

Производственная функция (1) характеризует только количественное воздействие одного или всех факторов производства на объем совокупного выпуска, не затрагивая их качественных характеристик. Рост объема производства, происходящий за счет расширенного использования капитала, труда и природных ресурсов, носит весьма ограниченный характер, поскольку предел экстенсивного экономического роста определяется физическим запасом всех доступных для использования ресурсов, имеющихся в экономике любой страны либо в мировой экономике.

В основе качественного анализа, в котором рассматривается, как изменение качества факторов производства воздействует на темпы экономического роста, используются относительные показатели, характеризующие качество факторов производства, а следовательно, и качество экономического роста: предельный продукт труда $MP_L = \frac{\partial V}{\partial L}$, предельный продукт капитала $MP_K = \frac{\partial V}{\partial K}$ и предельный продукт природных ресурсов $MP_N = \frac{\partial V}{\partial N}$, с помощью которых определяется вклад каждой дополнительной единицы ресурса в совокупный продукт. Чем больше предельный продукт ресурса, тем лучше его качество, тем больший вклад в объем совокупного производства способен внести данный ресурс при постоянных масштабах его использования. Интенсивный рост объема производства возникает только за счет улучшения качества факторов производства, и для его анализа используют соотношение

$$f(T, dV, V, MP, R) = 0, \quad (2)$$

где $MP = (MP_L, MP_K, MP_N)$ — вектор предельного продукта трудовых, капитальных и природных ресурсов.

Формулы (1) и (2) концептуально описывают процесс трансформации ресурсов в готовый продукт в моделях экстенсивного и интенсивного экономического роста соответственно [1].

Для изучения экономической динамики более естественным представляется использование процессно-системного подхода, в рамках которого рассматривается взаимосвязь не стационарных факторов, а развивающихся во времени процессов [2]. В качестве математического инструментария для решения задач не только аналитического описания и осмысления, но и управления экономикой оказываются востребованными теория неавтономных (неоднородных) дифференциальных уравнений, а также аппарат теории оптимального управления.

Методология процессно-системного подхода при моделировании самоорганизующихся сложных систем использует одно из положений системного анализа — «кибернетическое представление», согласно которому некоторую систему (техническую, биологическую, социально-экономическую) рассматривают с точки зрения соотношения «вход — управление — выход». Будем считать, что на вход экономической системы поступают производственные ресурсы, а выходом является конечное потребление, очевидно являющееся лишь долей произведенного системой валового продукта $V(t)$. Для упрощения считаем, что остальная часть расходуется на так называемое производственное потребление. Эта схема представлена на рис. 1, где введены следующие обозначения: $R(t)$ — ресурсы, $C(t)$ — непроизводственное (конечное) потребление. Внешняя среда проявляет свое воздействие на процесс производства через институты, в том числе через разнообразные регулятивные механизмы и инструменты управления $U(t)$.

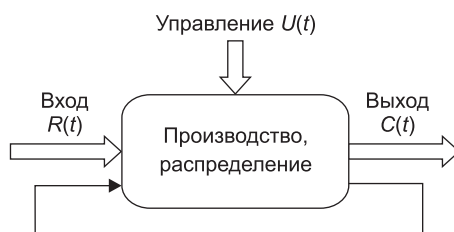


Рис. 1. Общее кибернетическое представление социально-экономической системы

Источник: разработано автором на основе [3].

Будем считать, что обмен и потребление в рамках нашей концептуальной модели являются частью распределения, что отражено при ее процессном представлении (рис. 2). В рамках модели одноотраслевой экономики рассмотрим процессы производства и распределения, представленные на рис. 1 в виде «черного ящика», более подробно (рис. 2).

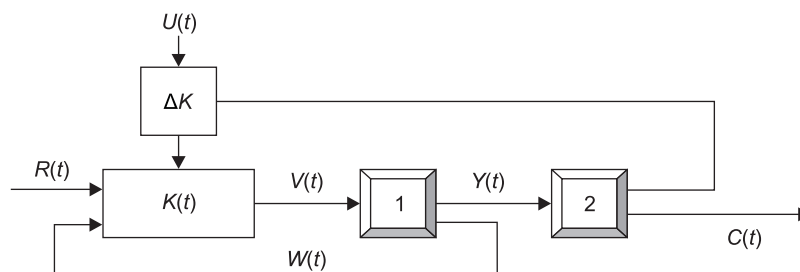


Рис. 2. Производственно-распределительный цикл модели одноотраслевой экономики

Источник: разработано автором.

На рис. 2 блок $K(t)$ иллюстрирует основной и оборотный капиталы, которые необходимы для процесса производства продукта. В блоках 1 и 2 происходит разделение товарного и финансового потоков. Если в распределяющих органах не происходит потерь или хищений, то должны выполняться соотношения баланса, т.е. то, что пришло в блок распределения, должно быть равно сумме того, что из него вышло. В блоке 1 происходит разделение валового продукта $V(t)$ на производственное потребление $W(t)$, включая амортизацию для поддержания простого воспроизводства, и конечный продукт $Y(t)$, поэтому уравнение баланса для блока 1 имеет вид

$$V(t) = Y(t) + W(t). \quad (3)$$

В блоке 2 происходит разделение конечного продукта $Y(t)$ на часть так называемого конечного потребления $C(t)$ и часть, которая вернется в производство в виде внутренних инвестиций $I(t)$ (или валового накопления). Следует отметить, что блок 2 помимо указанных двух выходов имеет еще два: государственные расходы и чистый экспорт (превышение экспорта над импортом), однако в предлагаемой методике они агрегированы с частью конечного продукта, которая потребляется населением, и обозначены $C(t)$. Уравнение баланса для блока 2 имеет вид

$$Y(t) = I(t) + C(t). \quad (4)$$

На рис. 2 и в формуле (4) рассматриваются чистые инвестиции $I(t)$, т.е. валовые инвестиции за вычетом амортизационных отчислений, которые учтены в производственном потреблении $W(t)$. Чистые инвестиции возвращаются в производственную систему в форме прироста капитала, который определяет потенциальный объем выпуска в будущих периодах.

Подставляя (4) в (3), имеем:

$$Y(t) = I(t) + W(t) + C(t). \quad (5)$$

На рис. 1 и 2 отражены обратные связи, которые отражают эндогенный характер потоков системы, возвращающихся в производство.

Одной из научных гипотез Харрода постулировалось, что валовой продукт следующего года полностью определяется спросом текущего года [4]. Эта гипотеза корректирует соотношение (4), которое примет вид

$$Y(t+1) = I(t) + C(t). \quad (6)$$

Для блоков распределения 1 и 2 введем коэффициенты распределения a и b соответственно. Коэффициент a можно интерпретировать как норму (долю) производственного потребления, а коэффициент b — как норму производственного накопления. Тогда имеем:

$$Y(t) = (1 - a)V(t), \quad 0 < a < 1; \quad (7)$$

$$I(t) = bY(t), \quad 0 < b < 1. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (6), получаем конечно-разностное уравнение для дискретного времени:

$$Y(t+1) - Y(t) = (1 - a)\Delta V(t) = I(t) + b(a - 1)V(t). \quad (9)$$

Предполагая, что изменение валового продукта происходит эволюторно без скачков и изломов (что в достаточной мере соответствует действительности, если рассматривать макроэкономическую динамику, где практически любой процесс неизбежно является результатом агрегирования и осреднения), т.е. $V(t)$ является дифференцируемой функцией.

Ввиду этого в рамках процессного подхода в последнем уравнении можно перейти от дискретного времени к непрерывному, заменяя $t + 1$ на $t + \Delta t$ и получая в пределе при $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{1-a} I(t) - bV(t). \quad (10)$$

Если в модели (10), согласно гипотезе Кейнса, объем инвестиций рассматривается как экзогенный фактор для экономической системы, то, задавая программу инвестирования $I(t)$ и начальные условия $V(t_0)$ (до-предиктивный валовой выпуск), находим функцию $V(t)$ на заданном горизонте планирования $(t_0, T]$, описывающую изменение уровня валового производства во времени. При решении обратной задачи по заданному уровню валового выпуска в конечном периоде $V(t)$ (в последнее время актуальной считается постановка задачи вывода экономики страны в конечном периоде на удвоенный валовой выпуск по сравнению с выпуском в базовом периоде, т.е. $V(T) = 2V(t_0)$) определяют требуемый для этого поток инвестирования $I(t)$. Данные задачи являются классическими задачами качественной теории управления.

Подставляя в уравнение (10) соотношение $I(t) = (1-a)V(t) - C(t)$, выраженное из (5) с учетом $W(t) = aV(t)$, получаем соотношение, именуемое открытой моделью Леонтьева одноотраслевой экономики

$$\frac{dV(t)}{dt} = (1-b)V(t) - \frac{1}{1-a} C(t), \quad (11)$$

которое используют для прогнозирования тренда валового продукта $V(t)$ при его заданном начальном уровне $V(t_0)$ и тренда конечного потребления $C(t)$. Задавая тренд валового выпуска продукта $V(t)$, из (11) также прогнозируется тренд конечного потребления $C(t)$.

Будем считать, что в конечном счете формирование потока конечного или производственного потребления (выход системы) обусловлено потоками валового продукта и производственного потребления (вход), а также управляющим воздействием.

Самуэльсоном и Хиксом была выдвинута научная гипотеза о том, что спрос на инвестиции в текущем году является линейной функцией от прироста валового выпуска продукта за предыдущий год [5, 6]:

$$I(t) = I_A + r(Y(t) - Y(t-1)) = I_A + r(1-a)\Delta V(t), \quad (12)$$

здесь I_A — автономные инвестиции, чей уровень остается неизменным в долгосрочном периоде, поскольку они не зависят от уровня дохода валового продукта. Акселератор r — параметр, характеризующий зависимость, умножается на величину, фактически определяющую индуцированные инвестиции. Подставляя (12) и $C(t) = (1-b)Y(t)$ в (6), получаем конечно-разностное уравнение динамического равновесия для дискретного времени:

$$V(t+1) - 2V(t) + V(t-1) = -bV(t) + (r-1)(V(t) - V(t-1)) + \frac{1}{1-a} I_A.$$

Модель Самуэльсона — Хикса для непрерывного времени имеет вид

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + (1-r)\frac{dV(t)}{dt} + bV(t) = \frac{I_A}{1-a} \quad (13)$$

и представляет собой неоднородное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами относительно неизвестной функции валового выпуска продукта $V(t)$, определить которую можно, задавая либо начальные $(V(t_0), V'(t_0))$, либо граничные условия $(V(t_0), V(T))$.

Отметим некоторые существенные замечания для всех рассмотренных выше моделей производственно-распределительного цикла. Во-первых, влияние экономической

среды на динамику экономической системы реализуется с помощью регулятивных механизмов, инструменты управления $U(t)$ не рассматриваются. Во-вторых, рассматривается только одностороннее влияние процессов (например, процесса инвестирования $I(t)$ в модели (10) или процесса конечного потребления $C(t)$ в модели (11)) на процесс валового выпуска. В-третьих, все рассмотренные модели, согласно кейнсианской традиции, ориентированы на прогнозирование краткосрочной макроэкономической динамики.

В авторской модели производственно-инвестиционного цикла одноотраслевой экономики предлагается наряду с внутренними (национальными) инвестициями $I(t)$, которые являются очевидно эндогенным потоком, рассматривать в качестве инструмента управления приростом основного капитала экзогенный поток иностранных инвестиций $U(t)$. С учетом этого уравнение (10) примет вид

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{1-\alpha} I(t) - bV(t) + cU(t). \quad (14a)$$

Обратную зависимость динамики национальных инвестиций $I(t)$ от валового выпуска продукта $V(t)$ предлагается формализовать исходя из гипотезы о том, что прирост внутренних инвестиций в экономику за определенный долгосрочный период h (освоенные инвестиции за период h) пропорционален объему валового выпуска продукции в текущем году:

$$I(t) - I(t-h) = k_h V(t), \quad t \geq h, \quad h = \text{const}. \quad (14b)$$

Для моделирования динамики инвестиций $I(t)$ и валового выпуска продукта $V(t)$ с помощью дифференциально-алгебраической системы (14a), (14b) необходимо задать начальные условия: $V(h) = V_h$, $I(\tau) = \psi(\tau)$, $\tau \in [0, h)$. Коэффициент зависимости k_h характеризует структурный технологический сдвиг в экономике, происходящий в момент t , но потенциал для которого закладывался и накапливался за период h .

Следует отметить, что для производственно-инвестиционного цикла уравнение (14a) описывает быструю динамику валового выпуска в зависимости от национальных и иностранных инвестиций, а уравнение (14b) характеризует медленную динамику национальных инвестиций в зависимости от валового выпуска.

В статье в контексте эволюционной теории описана процессная методология моделирования роста одноотраслевой экономики. В рамках данного подхода представлены модели макроэкономической динамики Харрода — Домара, Леонтьева, Самуельсона — Хикса для непрерывного времени. С учетом принципов системности в контексте экономики сложности и управляемости в контексте институционального направления экономической теории предложена авторская модель производственно-инвестиционного цикла, быстро-медленная динамика которого описывается системой дифференциально-алгебраических уравнений.

Источники

1. Казакова, М. В. Анализ свойств производственных функций, используемых при декомпозиции экономического роста [Электронный ресурс] / М. В. Казакова // РАНХиГС. — Режим доступа: <https://pps.ranepa.ru/Publication2/2013/6efe336c-cebf-e611-80d0-005056a06105/5492ef944e2fc.pdf>. — Дата доступа: 27.11.2021.

Kazakova, M. V. Analysis of the properties of production functions used in the decomposition of economic growth [Electronic resource] / M. V. Kazakova // RANЕandPA. — Mode of access: <https://pps.ranepa.ru/Publication2/2013/6efe336c-cebf-e611-80d0-005056a06105/5492ef944e2fc.pdf>. — Date of access: 27.11.2021.

2. Поддубная, О. Н. О моделях экономической динамики / О. Н. Поддубная // Науч. тр. / Белорус. гос. экон. ун-т ; редкол.: В. Н. Шимов (гл. ред.) [и др.]. — Минск, 2014. — Вып. 7. — С. 331–337.

Poddubnaya, O. N. On models of economic dynamics / O. N. Poddubnaya // Sci. works / Belarus State Econ. Univ. ; ed. board: V. N. Shimov (chief ed.) [et al.]. — Minsk, 2014. — Iss. 7. — P. 331–337.

3. Поддубная, О. Н. Процессно-системный подход в исследовании социально-экономических систем: от концепций к моделям / О. Н. Поддубная // Белорус. экон. журн. — 2021. — № 3. — С. 70–82.

Poddubnaya O. N. Process-system approach in studying socio-economic systems: from concepts to models / O. N. Poddubnaya // Belarusian Econ. J. — 2021. — № 3. — P. 70–82.

4. Харрод, Р. Теория экономической динамики / Р. Харрод ; под ред. В. Г. Гребенникова. — М. : ЦЭМИ РАН, 2008. — 210 с.

Harrod, R. Theory of economic dynamics / R. Harrod ; ed. by V. G. Grebennikov. — Moscow : SEMI RAS, 2008. — 210 p.

5. Самуэльсон, П. А. Основания экономического анализа / П. А. Самуэльсон. — СПб. : Экон. шк., 2002. — 634 с.

Samuelson, P. A. Foundations of economic analysis / P. A. Samuelson. — St Petersburg : Econ. School, 2002. — 634 p.

6. Hicks, J. R. Mr. Keynes and the classics — a suggested interpretation / J. R. Hicks // *Econometrica*. — 1937. — Vol. 5. — P. 147–159.

Статья поступила в редакцию 06.12.2021 г.

УДК [338.49+339.97+656] (476)

N. Podobed
Yu. Enin
BSEU (Minsk)

FORMATION OF THE DIGITAL ECOSYSTEM OF TRANSPORTATION AND LOGISTICS COMPLEX OF THE EAEU

The article provides methodological and practical recommendations for the formation of a digital ecosystem of the EAEU transport and logistics complex in the context of clustering, identifies the main differences in automation and digitalization, proposes the stages of development of Industry 4.0, identifies the main digitalization tools and trends in their use, identifies the main components of the methodology for determining the level digital readiness of the EAEU transport and logistics complex.

Keywords: transport and logistics complex; integration; EAEU; cluster; digitalization; digital transformation.

Н. А. Подобед
кандидат экономических наук, доцент
Ю. И. Енин
доктор экономических наук, профессор
БГЭУ (Минск)

ФОРМИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ЭКОСИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЕАЭС

В статье даны методические и практические рекомендации по формированию цифровой экосистемы транспортно-логистического комплекса ЕАЭС в контексте кластеризации, выявлены основные различия автоматизации и цифровизации, предложены этапы развития индустрии 4.0, определены инструменты цифровизации и тенденции их использования, обозначены основные компоненты методологии определения уровня цифровой готовности транспортно-логистического комплекса ЕАЭС.

Ключевые слова: транспортно-логистический комплекс; экономическая интеграция; ЕАЭС; кластер; цифровизация; цифровая трансформация.