

МОДЕЛЬ И ИНДИКАТОРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.Н. Поддубная*

Аннотация. На основе процессно-системной методологии формализованы механизмы прироста капитала разными темпами в инновационно-инвестиционном цикле односекторной экономики. В результате логического обоснования математической модели предложены новые макроэкономические индикаторы: динамический индикатор приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций и показатель потенциала технологического сдвига экономической системы. Для апробации разработанных индикаторов на основе эмпирических данных для Республики Беларусь в качестве оценки долгосрочных внутренних инвестиций модели выбран объем выполненных научных исследований и разработок. Совместный анализ динамики индикатора приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций, нормы накопления основного капитала и доли ВВП в валовом выпуске позволил сформулировать значимые выводы относительно технологической трансформации национальной экономической системы.

Ключевые слова: экономическая динамика, инновационно-инвестиционный цикл, структура инвестиций, технологическая трансформация, динамический индикатор роста внутренних инвестиций.

JEL-классификация: C02, C39, E17, F43, O41.

DOI: 10.46782/1818-4510-2023-2-90-106

Материал поступил 15.03.2023 г.

Развитие исследований современной макроэкономической динамики происходит в магистральном русле теории экономического роста, в котором можно выделить несколько основных этапов. Неокейнсианское направление сформировалось в 1930–1940-е годы благодаря прежде всего трудам Р. Харрода и Е. Домара, в основной парадигме которого экономический рост определялся такими факторами, как спрос и прирост инвестиций, что позволило сформулировать основной вывод о необходимости государственного вмешательства в экономику. В результате интенсивных исследований следующего периода, 1950–1960-х годов, формулируются основные базисы и модели теории неоклассического синтеза, в рамках которого были объединены макро- и микроэкономические методы исследования для двух противоположных направлений анализа равновесия спроса и предложения.

Вслед за разработкой П. Самуэльсоном и Дж. Хиксом моделей бизнес-циклов после недлительного исследовательского затишья были опубликованы работы Р. Солоу, Т. Суона, Дж. Мида, В. Леонтьева, Э. Денисона, которые индуцировали новый виток активности по многоаспектному изучению экономического роста научным сообществом. В этих основополагающих исследованиях неоклассической теории экономического роста базовые модели строятся и анализируются с помощью производственных функций, определенный вид которых позволяет обосновать основную идею неоклассиков о совершенной конкуренции без государственного вмешательства в экономику.

Следующий виток исследований – П. Ромера, У. Нордхауса, Г. Беккера, М. Блуга, П. Клену, Дж. Ли, Ф. Агийона, П. Хуита, Н. Мэнкью, Дж. Минсера, Т. Шульца,

* Поддубная Олеся Николаевна (poddubnaia.o@bseu.by), кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет (г. Минск, Беларусь); <https://orcid.org/0000-0001-9594-6226>

Для цитирования: Поддубная О.Н. 2023. Модель и индикаторы технологических трансформаций экономических систем. *Белорусский экономический журнал*. № 2. С. 90–106. DOI: 10.46782/1818-4510-2023-2-90-106

Д. Вейла, Л. Восманна, Р. Лукаса, Х. Узавы, С. Глазьева, А. Варшавского и других ученых – закладывал основы так называемой новой теории экономического роста (теории эндогенного роста), ее отличительной особенностью стали новые концепции человеческого капитала и инноваций. Основной акцент данного направления делался на социально-экономическую природу экономического роста, тогда как неоклассики трактовали его как технолого-экономический процесс. Очевидно, что экономическая динамика – многоаспектное явление, оно исследуется разными авторами и научными школами с фокусировкой на тех или иных сторонах его анализа, при этом выделяются различные детерминанты роста, которые формируют ядро большого количества модельных конструкций. Наиболее изученными источниками роста являются накопление физического капитала, человеческий капитал и обучение, НИОКР и инновации (Курзенов, Матвеев, 2018).

Начиная с 1950-х годов, параллельно с теорией экономического роста, стало формироваться такое направление исследований, как экономика развития, основу которого составляли идеи, выработанные классической политэкономией. Его ключевой особенностью стало выявление факторов, препятствующих экономическому росту развивающихся стран с учетом их институциональной специфики. Следует отметить еще одно значимое современное направление научных исследований по решению проблемы (в том числе и на основе модельных расчетов) обобщенной макроэкономической оценки качества экономического роста, которая служит одним из ориентиров при формировании национальных стратегий и научно обоснованной экономической политики (Балацкий, 2021; Комков, 2021; Aghion, Howitt, 2006).

В современных моделях макроэкономической динамики теоретически экономический рост определяют как интегральный динамический показатель, характеризующий состояние экономики страны в целом во временном аспекте. На практике целевые показатели экономического роста и развития оцениваются темпами роста реального ВВП и ВВП на душу населения по

паритету покупательной способности соответственно. Несмотря на ведущуюся в литературе дискуссию о корректности использования ВВП для оценки экономического роста, показатель ВВП (при расчете по ППС) позволяет отслеживать экономическую динамику государств и проводить межстрановой компаративный анализ (Григорьев, Макарова, 2019).

В экономической теории факторный анализ является одной из ключевых качественных и количественных методологий, в рамках которой под факторами экономического роста понимаются явления, определяющие возможности увеличения реального объема производства, повышения его эффективности и качества. Успешно используемым инструментом детерминированного факторного анализа выступают производственные функции, описывающие взаимосвязь факторов в определенные периоды времени для изучения стационарных свойств социально-экономических систем. Подавляющее большинство основных моделей экономического роста построены на основе производственных функций и их модификаций, поскольку были ориентированы прежде всего на поиск возможных *источников* роста.

Для формализации *механизмов* экономической динамики более естественным представляется использование процессно-системного подхода, в рамках которого рассматривается взаимосвязь не стационарных факторов, а развивающихся во времени процессов (Поддубная, 2021). Данный подход применяется автором для описания быстро-медленной регулируемой и управляемой динамики процессов производственно-инвестиционного цикла в контексте технологических трансформаций для односекторной модели экономики. Выдвигаемая ключевая гипотеза базируется на идее определения причинно-следственных связей между двумя основными эндогенными процессами модели – валового выпуска и инвестиций – при накоплении капитала¹ разными темпами. Идея трактовки быстрого и медленного прироста капитала

¹ Автор понимает термин «капитал» в широком смысле, т. е. подразумевается не только физический (во всех формах), но и человеческий капитал.

опирается на условное разделение инвестиций на так называемые быстрые (оперативные) и медленные (долгосрочные). Быстрое и медленное накопление капитала порождает разные механизмы взаимодействия указанных процессов во времени, логика которых для математической формализации требует использования разных инструментов.

Следует отметить, что трактовка автором инвестиционного процесса далека от его понимания в неокейнсианской традиции и лучше отражается термином «инвестиционно-инновационный цикл»². В настоящее время инвестиционный процесс сосредоточен не только на воспроизводстве материально-технической базы, но и технологий, включающих в себя помимо материальной компоненты овеществленные и неовеществленные знания. С нашей точки зрения, инвестиции представляют собой ключевой процесс стимулирования экономического роста, это количественная компонента, а инновации, по сути, детерминанта экономического развития. Поскольку долгосрочные инвестиции обеспечивают инновационный цикл экономической системы и ее возможные технологические сдвиги, то макроэкономические индикаторы, построенные на эмпирических оценках данных инвестиций, могут рассматриваться как показатели качественного аспекта экономического роста.

Беспрецедентное развитие цифровых технологий в последние два десятилетия позволяет ученым делать акцент на цифровой трансформации, являющейся современным этапом технологической и структурной трансформации³ социально-экономических систем, который обладает своими особенностями и характерными чертами (Поддубная, 2020). Для изучения механизмов современных технологических трансформаций экономик необходима как модер-

низация уже имеющихся концепций и на их основе построенных моделей, так и разработка новых концепций и методологий, которые служат базисом научно обоснованной инновационной и инвестиционной политики государства (Балацкий, Юревич, 2020). Макроэкономический подход по признаку происхождения предполагает классификацию инвестиций на внутренние (национальные) и внешние (зарубежные). Влияние внутренних инвестиций на экономический рост изучено достаточно хорошо и представлено в работах Дж.М. Кейнса, У. Шарпа, П. Самуэльсона и многих других, чего нельзя сказать относительно внешних инвестиций. Так, для анализа открытой экономики зарубежные инвестиции, с одной стороны, являются индикатором многих аспектов внутренней и внешней политики самого государства (например, внутренняя ставка процента), а с другой стороны, могут рассматриваться как управляющее воздействие на систему со стороны экономической среды. Последний аспект недостаточно широко изучен и представлен в математических моделях экономической динамики. Включение управляющего воздействия в динамические экономико-математические модели (в частности, в виде потока внешних инвестиций в авторской модели инновационно-инвестиционного цикла) позволяет существенно расширить как сам класс экономических задач, естественным образом формулируемых на языке качественной теории оптимальных процессов, так и возможности применения математического инструментария для решения этих задач.

Производственно-инвестиционный цикл односекторной экономики и некоторые подходы к его моделированию

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» экономичес-

² Поддубная О.Н. 2010. Динамическая модель инновационно-инвестиционного цикла высокотехнологичных производств. *Научные труды Белорусского государственного экономического университета*. Вып. 3. С. 347–353.

³ Под технологической трансформацией социально-экономической системы понимается широкое применение технологий более высокого уровня, обеспечивающее качественный рост производительности труда. Чаще всего технологическая трансформация предшествует структурной трансформации экономики.

кой системы поступают производственные ресурсы $R(t)$, а выходом является непродуцированное (конечное) потребление $C(t)$, являющееся лишь долей произведенного системой валового продукта $V(t)$. Для упрощения анализа считаем, что оставшая часть $V(t)$ расходуется на так называемое производственное потребление. Внешняя среда проявляет свое воздействие на процесс производства через институты, в том числе через разнообразные регулятивные механизмы и инструменты управления $U(t)$.

Рассмотрим процессы производства и распределения в рамках односекторной модели, полагая, что в воспроизводственном цикле обмен является частью распределения (рис. 1). Блок $K(t)$ иллюстрирует совокупный капитал, вовлеченный в технологический процесс производства продукта. В соответствии с методом распределения дохода в СНС в конечной точке производственного процесса идет разделение товарных и финансовых потоков. Если в распределяющих подсистемах нет потерь, то для каждого блока распределения должны выполняться соотношения динамического баланса. 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:

$$V(t) = Y(t) + W(t). \quad (1)$$

В блоке 2 идет разделение добавочного продукта $Y(t)$ на часть так называемого конечного потребления $C(t)$ и часть, которая вернется в производство в виде внутрисистемных инвестиций $I(t)$. Следует отметить, что блок 2, кроме указанных двух выходов, в реальности имеет еще два: государственные расходы и чистый экспорт (превышение экспорта над импортом), однако в предлагаемой методике они рассматриваются как компоненты конечного потребления. Уравнение баланса для блока 2 имеет вид:

$$Y(t) = I(t) + C(t). \quad (2)$$

На рис. 1 и в формуле (2) рассматриваются чистые инвестиции $I(t)$, т. е. валовые инвестиции за вычетом амортизационных отчислений, учтенных в производственном потреблении $W(t)$. Чистые инвестиции возвращаются в производственную систему в форме прироста капитала, который определяет потенциальный объем производства в будущих периодах.

На рис. 1 приросты капитала обозначены символами dK (так называемый быстрый прирост) и ΔK (медленный прирост), накопленные за разные периоды времени: первый – за короткий период $\Delta t = dt$ (сплошной контур рис. 1), а второй – за длинный период $\Delta t = h$ (пунктирный контур рис. 1). Как уже отмечалось, в осно-

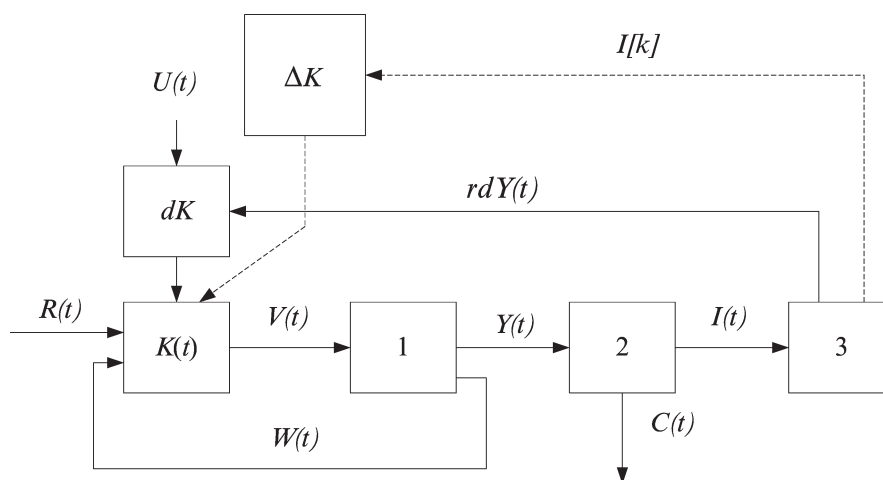


Рис. 1. Быстрая и медленная динамика инновационно-инвестиционного цикла односекторной модели экономики

Источник. Авторская разработка.

ве трактовки быстрого и медленного прироста капитала лежит условное разделение инвестиций на быстрые (оперативные) и медленные (долгосрочные). В классической интерпретации быстрые инвестиции (или, как часто их называют в литературе, «короткие деньги») направлены на расширенное воспроизводство с целью их быстрой отдачи, медленные инвестиции («длинные деньги») являются источником инновационного развития и технологических сдвигов в экономической системе. В отношении используемой в дальнейшем терминологии важно уточнить, что автор употребляет словосочетание «производственно-инвестиционный цикл», формализуя механизмы взаимодействия потоков только сплошного контура, а под термином «инновационно-инвестиционный цикл» понимается взаимосвязь двух контуров – сплошного и пунктирного.

Изображенные на рис. 1 обратные связи отражают эндогенный характер потоков системы, возвращающихся в производство (процесс технологической трансформации капитала, создающий добавленную стоимость).

Согласно основному постулату кейнсианской экономической теории, предприниматели производят не столько, сколько захотят, а в соответствии со спросом. Гипотеза «спрос создает предложение» позволяет построить систему моделей, объясняющих функционирование рыночной экономики. В одном из вариантов математической формализации указанной гипотезы с учетом «феномена номинальной жесткости» постулировалось, что валовой продукт следующего года полностью определяется спросом текущего года. Таким образом, так называемый лаг Лундберга позволяет скорректировать соотношение (2), которое примет вид:

$$Y(t+1) = I(t) + C(t). \quad (3)$$

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

$$Y(t) = (1-a) V(t), \quad 0 < a < 1; \quad (4)$$

$$I(t) = bY(t), \quad 0 < b < 1. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (3), получаем конечно-разностное уравнение для дискретного времени:

$$\begin{aligned} Y(t+1) - Y(t) &= (1-a) \Delta V(t) = \\ &= I(t) + b(a-1)V(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Предполагаем, 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. Ввиду этого в рамках процессного подхода $V(t)$ является дифференцируемой функцией и в уравнении (6) можно перейти от дискретного времени к непрерывному:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{1}{1-a} I(t) - bV(t). \quad (7)$$

П. Самуэльсон и Дж. Хикс впервые формализовали структуру потока инвестиций на основе научной гипотезы о линейности функции спроса на инвестиции в текущем году в зависимости от прироста валового выпуска продукта за предыдущий год (Samuelson, 1939; Hicks, 1937):

$$\begin{aligned} I(t) &= I_A + r(Y(t) - Y(t-1)) = \\ &= I_A + r(1-a)\Delta V(t), \quad 0 < r < 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь I_A – автономные инвестиции, уровень которых остается неизменным достаточно долго, поскольку они не зависят от уровня валового продукта. Таким образом, автономные инвестиции в динамической модели бизнес-циклов описывают долгосрочные инвестиции, коэффициент акселерации r характеризует долю прироста валового выпуска, используемого на инвестиции, которая фактически задает оперативные (индуцированные) инвестиции, а сама модель описывается для непрерывного времени неоднородным обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + (1-r)\frac{dV(t)}{dt} + bV(t) = \frac{I_A}{1-a}. \quad (9)$$

Отметим несколько существенных замечаний для рассмотренных выше моделей (7) и (9) производственно-инвестиционного цикла. Во-первых, эти модели, согласно кейнсианской традиции, ориентированы на прогнозирование краткосрочной экономической динамики при условно стабильной структуре социально-экономической системы, т. е. математически формализуют процесс прироста капитала dK , изображенный сплошным контуром (см. рис. 1). Во-вторых, влияние экономической среды на динамику экономической системы реализуется только с помощью регулятивных механизмов (коэффициенты a , b , r), инструменты управления $U(t)$ не рассматриваются. В-третьих, изучается только одностороннее влияние процесса инвестирования $I(t)$ и I_A на процесс валового выпуска $V(t)$. В-четвертых, в рассмотренных моделях процессы-причины $I(t)$ и I_A трактуются как экзогенные к процессу-следствию $V(t)$. В-пятых, теоретической базой рассмотренных моделей является ранний кейнсианский подход к объяснению экономических колебаний в условиях жесткости цен.

Модель инновационно-инвестиционного цикла односекторной экономики

Предлагаемая в данной работе авторская модель ориентирована на системное описание динамики процессов быстрого dK (сплошной контур на рис. 1) и медленного ΔK (пунктирный контур) приростов капитала. В изучаемом инновационно-инвестиционном цикле выделяются два эндогенных, взаимно обусловленных и взаимно зависимых, процесса: процесс валового выпуска и процесс внутренних (национальных) инвестиций. В качестве управляющего воздействия среды в модели рассматривается экзогенный процесс внешнего (инострannого) инвестирования. В авторской методике экономическое время предлагается разбивать на календарные интервалы $t \in [kh, (k+1)h)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ длины h временных единиц, на протяжении которых экономическая система функционирует с относительно стабильными внутренними и внешними параметрами. В моменты $t = kh$ возможно переключе-

ние системы на иной режим функционирования, связанный с ее технологической трансформацией в результате «инновационного скачка» как результат реализации инвестиционного потенциала, который был накоплен в предыдущие временные периоды. На каждом интервале структура инвестиций представляется в виде суммы моментной (запасовой) и интервальной (потокной) компонент (блок 3 рис. 1):

$$I(t) = I[k] + r_k \frac{Y(t) - Y(t - \Delta t)}{\Delta t},$$

$$t \in [kh, (k+1)h), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (10)$$

где на периоде k уровень автономных инвестиций $I[k]$ (дискретная составляющая инвестиций) остается неизменным и определяется их значением на начало периода⁴. В конце текущего k -го периода, исходя из уровня валового продукта, формируется величина автономных инвестиций $I[k+1]$ будущего периода, которые определяют потенциальные возможности капитала для инноваций и технологических изменений экономики в периоде $k+1$. Таким образом, в формуле (10) поток инвестиций состоит из суммы дискретной компоненты медленных инвестиций, закладывающей потенциал для «инновационного скачка» экономической системы, и непрерывной компоненты быстрых инвестиций, направляемых на расширенное воспроизводство. Следует также отметить, что модельное время в формуле (10) имеет разную размерность в первом и втором слагаемых (k определяет номер достаточно длительного временного периода, например пятилетки⁵, h – длина самого периода, которая может выражаться в разных временных единицах⁶ в зависимости от шага дискретизации временной

⁴ С математической точки зрения, в обозначении $I[k]$ использование символа $[k]$, означающего целую часть числа k , избыточно, поскольку $k \in \mathbb{N} \cup \{0\}$, но, по мнению автора, обосновано методологически: усиливает акценты, во-первых, на разную природу временного аргумента (k – дискретно, t – непрерывно), во-вторых, на разграничении компонент инвестиционного процесса, определяющих быструю и медленную динамику инновационно-инвестиционного цикла.

⁵ Это может быть интервал иной размерности, например 7 лет или 10 лет, но ускорение НТП объективно ведет к его уменьшению.

⁶ Год, квартал, месяц и т. д.

оси⁷). Акселератор r_k постоянен только на k -ом периоде и меняет свое значение в любом другом периоде. Аналогично нормы производственного потребления и накопления также не могут оставаться постоянными на долгосрочном интервале прогнозирования, поэтому в модели полагается их постоянство только на k -ом периоде, и этот факт фиксируется в обозначениях соответствующих коэффициентов a_k , b_k .

Подставим (10) в (2) и, учитывая $C(t) = (1-b_k)Y(t)$, после преобразования получим:

$$r_k(a_k - 1) \frac{\Delta V(t)}{\Delta t} = I[k] + b_k(a_k - 1)V(t).$$

Переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получаем дифференциальное уравнение, описывающее динамику валового выпуска, обуславливающую быстрое накопление капитала в рамках действующей технологической структуры производства за счет активации резервных мощностей, привлечения незанятой рабочей силы, а также расширенного воспроизводства в том числе и за счет возможных улучшающих инноваций:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{b_k}{r_k} V(t) - \frac{1}{r_k(1-a_k)} I[k],$$

$$t \in [kh, (k+1)h), k = 1, 2, \dots \quad (11)$$

Важной особенностью вывода уравнения (11) является отказ от раннего кейнсианского подхода к объяснению быстрой экономической динамики в условиях жесткости цен. На наш взгляд, это вполне обосновано тем, что в условиях увеличивающихся и усложняющихся технологий производства предложение инновационных товаров предвосхищает спрос, а не формируется на его основе.

Для математической формализации медленной динамики накопления капитала, основу которой составляют прорывные инновации, лежащие в основе технологических сдвигов экономики, введем индикатор так называемого приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций:

⁷ Здесь речь по сути идет о разных масштабах единицы деления временной шкалы для быстрой и медленной динамики инновационно-инвестиционного циклов.

$$MI_k = \frac{I[k] - I[k-1]}{I[k]} = 1 - \frac{I[k-1]}{I[k]},$$

$$k = 1, 2, \dots, I[k] \neq 0. \quad (12)$$

Данный индикатор, который по сути является темпом прироста долгосрочных инвестиций в обратном времени, показывает отношение прироста инвестиций за интервал k к инвестициям предыдущего периода $k-1$. Предлагаемая интерпретация в формуле (12) темпа прироста долгосрочной компоненты внутренних инвестиций, когда абсолютное изменение показателя относят к величине самого показателя не в момент времени в прошлом (в так называемый базовый период), а в настоящий момент времени, обоснована тем, что именно текущая технологическая структура экономической системы в целом и ее инвестиционная составляющая в частности, а не их состояние в прошлом, определяет перспективы и потенциал инновационного роста и развития данной формации в будущем.

Из формул (12), (10), (4) и (5) вытекает разностное уравнение, описывающее изменение долгосрочных инвестиций, определяющих динамику медленного накопления капитала:

$$I[k] - I[k-1] = m_k V(kh), \quad k = 1, 2, \dots \quad (13)$$

где $m_k = MI_k b_k (1-a_k)$ определим как показатель потенциала технологического сдвига в экономике, оцениваемый в момент $t = kh$, но инвестиционные резервы для которого закладывались и накапливались за период $[(k-1)h, kh)$. Экономическая суть уравнения (13): инвестиции, осуществленные в инновации в период $[(k-1)h, kh)$, увеличивают валовой выпуск на начало следующего периода за счет качественного изменения режима функционирования экономики. Медленная динамика долгосрочных инвестиций закладывает потенциал экономической системы на $(k-1)$ периоде для «инновационного скачка», который ожидается на начало k периода, но реализация которого зависит от комплексной эффективности экономической системы в прошлом. По аналогии с тем, как акселератор r_k быстрой динамики отражает чувствительность инвес-

тий к краткосрочному изменению дохода (уравнение (10)), акселератор $\frac{1}{m_k}$ медленной динамики отражает чувствительность валового выпуска к изменению долгосрочных инвестиций (уравнение (13)).

Таким образом, для средне- и долгосрочного прогнозирования быстро-медленную динамику процессов инновационно-инвестиционного цикла односекторной модели экономики предлагается описывать системой дифференциально-разностных уравнений (11), (13) с непрерывной $V(t)$ и дискретной $I[k]$ компонентами вектора фазовых координат и начальными условиями вида $V(+h) = V(h) = V_h$, $I[0] = I_0$.

Отметим важную особенность описанных механизмов взаимодействия внутренних потоков в данной модели инновационно-инвестиционного цикла: уравнение (11) системы описывает быструю динамику (сплошной контур на рис. 1) валового выпуска, отражая зависимость мгновенной скорости валового выпуска от национальных инвестиций, а уравнение (13) характеризует медленную динамику (пунктирный контур) национальных инвестиций, формализуя зависимость средней скорости долгосрочных инвестиций от валового выпуска.

Для дальнейшего анализа качественных свойств системы (11), (13) целесообразно перейти к непрерывному времени, тем самым решая и проблему унификации единиц его измерения в модели. Для этого осуществим ряд преобразований.

Из уравнения (11) на основе формулы Коши получаем:

$$\begin{aligned} V(kh) &= e^{\frac{b_k(kh-(k-1)h)}{r_k}} V(kh-h) - \\ &- \frac{1}{r_k(1-a_k)} \int_{kh-h}^{kh} e^{\frac{b_k(kh-\tau)}{r_k}} d\tau I[k-1] = \\ &= e^{\frac{b_k h}{r_k}} V(kh-h) + \frac{1-e^{\frac{b_k h}{r_k}}}{b_k(1-a_k)} I[k-1], k=1,2,\dots \end{aligned}$$

Обозначив $S(t) = \begin{bmatrix} V(kh) \\ I[k] \end{bmatrix}$ для $t \in [kh, (k+1)h)$,

$k=1, 2, \dots$, систему (11), (13) представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt}(t) = A_1(t)V(t) + A_2(t)S(t), \\ S(t) = A_3(t)V(t) + A_4(t)S(t-h), \\ t \in [kh, (k+1)h), k=1,2,\dots, \end{cases} \quad (14)$$

где $A_1(t) = \frac{b_k}{r_k}$, $A_2(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{r_k(1-a_k)} \end{bmatrix}$, $A_3(t) = 0$,

$$A_4(t) = \begin{bmatrix} e^{\frac{b_k h}{r_k}} & \frac{1-e^{\frac{b_k h}{r_k}}}{b_k(1-a_k)} \\ m_k e^{\frac{b_k h}{r_k}} & 1 + \frac{m_k(1-e^{\frac{b_k h}{r_k}})}{b_k(1-a_k)} \end{bmatrix}.$$

Начальные условия для системы (14) имеют вид:

$$\begin{aligned} V(h) &= V_h, \\ S(\tau) &= \begin{bmatrix} e^{-\frac{b_0 \tau}{r_0}} \left(V_h - \frac{1-e^{-\frac{b_0 h}{r_0}}}{b_0(1-a_0)} I_0 \right) \\ I_0 \end{bmatrix}, \tau \in [0, h). \end{aligned} \quad (15)$$

Вектор $S(t) = \begin{bmatrix} V(kh) \\ I[k] \end{bmatrix}$, описывающий

медленную динамику системы, назовем вектором потенциала технологической трансформации системы. Отметим, что данный вектор обладает двойственной природой. Действительно, с одной стороны, обе его компоненты (уровень валового выпуска и внутренних медленных инвестиций) описывают состояние, достигнутое системой в результате ее быстрой динамики на конец периода $t \in [(k-1)h, kh)$, т. е. с помощью этого вектора на конец периода $(k-1)$ можно оценить степень реализации потенциала, которым обладала экономическая система на начало указанного периода. С другой стороны, этот вектор закладывает потенциал экономической системы для реализации ее быстрой динамики на новом k -ом периоде, т. е. с математической точки зрения, задает начальные условия для динамики системы в новом периоде $t \in [kh, (k+1)h)$. Анализ полученной оценки (с возможными дополнительными модельными сценариями) позволит в ретроспективе оценить узкие места и

реперные точки реального состояния экономической системы к текущему моменту. Отклонения оценок от реальных данных и формализованные для системы критерии ее поведения в будущем (например, достижения определенных значений вектором фазовых координат в заданных точках следующего временного отрезка) позволят сделать выводы о необходимости корректировки на начало нового периода некоторых макроэкономических регуляторов (например, коэффициентов a_k , b_k , r_k , которые формируют динамические параметры модели). Отметим, что для реализации алгоритмов параметрической идентификации модели номер k текущего периода определяют по формуле $k = \left\lceil \frac{t}{h} \right\rceil$.

Будем полагать, что формирование потока конечного, или непроизводственного, потребления («выход» системы) обусловлено не только потоками валового продукта и производственного накопления («вход»), но также управляющим воздействием со стороны экономической среды. В авторской модели инновационно-инвестиционного цикла односекторной экономики предлагается наряду с национальными инвестициями $I(t)$, которые являются очевидно эндогенным потоком, рассматривать в качестве инструмента управления быстрым приростом основного капитала dK (см. рис. 1) экзогенный поток чистых зарубежных инвестиций $U(t)$, которые составляют разницу между величиной внутренних активов, приобретаемых иностранными инвесторами, и величиной, вкладываемой в иностранные активы отечественными инвесторами. Чистые зарубежные инвестиции зависят от ряда факторов, среди которых можно выделить, например, внутреннюю ставку процента и экономическую политику зарубежных государств, тарифные и нетарифные ограничения, кризисные шоки и другие. Очевидно, что для модели закрытой экономики $U(t) \equiv 0$. Для любой открытой экономики, если $U(t) > 0$ на изучаемом временном интервале, то она является инвестиционно привлекательной для зарубежного капитала, и наоборот, если $U(t) < 0$, то рассматриваемую экономику

можно назвать инвестиционным донором. С учетом этого система (14) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt}(t) = A_1(t)V(t) + A_2(t)S(t) + U(t), & t > h \\ S(t) = A_3(t)V(t) + A_4(t)S(t-h), & t \geq h. \end{cases} \quad (16)$$

Следует отметить, что ввиду заинтересованности большинства иностранных инвесторов в отдаче вложений на краткосрочном временном интервале экзогенный поток в качестве управления явно воздействует на быструю динамику системы, описываемую первым уравнением модели (16) ($V(t)$ непосредственно зависит от $U(t)$). Однако, исходя из взаимной обусловленности и взаимного влияния быстрой и медленной динамики системы, поток иностранных инвестиций неявно влияет и на динамику технологической трансформации экономической системы, описываемую вторым уравнением модели (16) (вектор потенциала технологической трансформации системы $S(t)$ опосредованно зависит от $U(t)$).

Таким образом, в работе с учетом принципов системности в контексте экономики сложности и управляемости в контексте институционального направления экономической теории модель инновационно-инвестиционного цикла односекторной экономики описана системой (16) дифференциально-алгебраических уравнений с запаздыванием h и управлением. Для полной математической формализации модели оператор ее эволюции дополняется начальными условиями (15). Важнейшим параметром модели является h – длина интервала относительной стабильности технологического режима функционирования социально-экономической системы, представленная в модели (16), (15) в виде лага. В идентификации данного параметра важную роль играют практическое исследование и анализ индикатора приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций MI_k .

Динамический индикатор приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций

Теоретически MI_k изменяется в интервале $(-\infty; 1]$, который разбивается на два подынтервала $(-\infty; 0]$ и $(0; 1]$. Оценки

динамического индикатора приведенного роста внутренних инвестиций из интервала $(-\infty; 0]$ для периода k свидетельствуют о формирующемся дефиците долгосрочных инвестиций в экономической системе на интервале $[(k-1)h, kh)$. Для оценок индикатора из интервала $(0; 1]$ рассмотрим случаи $MI_k \rightarrow 0+0$ и $MI_k \rightarrow 1-0$. Близость индикатора к 1, при $L[k] \gg L[k-1]$, с формальной точки зрения может быть интерпретирована как скачкообразный рост долгосрочных инвестиций, объяснение которому вариативно. С одной стороны, можно полагать, что значительный уровень внутренних долгосрочных инвестиций, осуществленный в экономику за k период, был обусловлен качественными технологическими и институциональными изменениями в структуре исследуемой экономики, произошедшими на предыдущих этапах, которые сами по себе генерировались не только долгосрочными, но и краткосрочными инвестициями. С другой стороны, наращенную величину ΔK можно рассматривать как инвестиционный потенциал, накопленный системой благодаря удачной внешней и внутренней конъюнктуре для реализации ее быстрой динамики ускоренными темпами, для будущего «инновационного скачка» экономической системы за счет ее технологической трансформации. Кроме того, величина приведенного роста внутренних инвестиций, близкая к 1, может быть обусловлена их невысоким начальным уровнем.

Ситуация, когда $MI_k \rightarrow 0+0$, при $L[k] \approx L[k-1]$, может означать, что система на оцениваемом k интервале находится в устойчивом состоянии нулевого роста долгосрочных инвестиций и не формирует внутренних инвестиционный потенциал для инновационного скачка и технологической трансформации в будущем.

Таким образом, при $MI_k \rightarrow 0+0$ можно говорить о превалировании эффекта масштаба в обеспечении экономического роста (экстенсивный экономический рост); при $MI_k \rightarrow 1-0$ наряду с другими признаками можно говорить об инвестициях в инновации и об интенсивном характере экономического роста.

С точки зрения практической реализации и интерпретации MI_k , ключевую роль играют методические подходы к оценке долгосрочных инвестиций $L[k]$. В рамках данной работы предлагается для измерения величины индикатора приведенного роста внутренних долгосрочных инвестиций использовать объем выполненных научных исследований и разработок. В основе предлагаемого подхода лежат следующие факты:

- НИОКР, наряду с другими факторами, являются основой создания материальных и нематериальных активов в дальнейшем;
- процессы как создания, так и использования НИОКР пролонгированы во времени;
- основной результат НИОКР – новые знания (и их производственное воплощение – технологии), которые по своему содержанию представляют нематериальный, неубывающий в процессе потребления фактор производства.

В отличие от традиционного индикатора (уровня расходов на исследования и разработки в ВВП⁸), используемого для оценки способности экономики к инновационному развитию, авторская методика акцентирует внимание именно на выполненных (поступивших в экономический оборот) научных исследованиях, учитывая прямую связь между инвестиционным и инновационным процессами. При данном подходе также косвенно принимается во внимание и внешнее финансирование научно-исследовательских работ. Кроме того, авторский подход обоснован методологией, используемой Национальным статистическим комитетом Республики Беларусь, включившим с 2016 г. объем выполненных исследований и разработок в состав накопления основного капитала.

Исследование проводилось на временном интервале T с 1996 по 2021 г., который был выбран, исходя из доступных данных Национального статистического комитета Республики Беларусь⁹. На подготовительном этапе нами рассчитаны следующие показатели модельных параметров:

⁸ Показатели Европейского табло, МВФ, ВБ и др.

⁹ URL: <https://www.belstat.gov.by/>

- оценка валового выпуска $V(t)$, пересчитанная по индексу дефлятора ВВП в сопоставимые цены 2020 г. (в денежных единицах 2020 г.);

- оценка валового внутреннего продукта $Y(t)$, вычисленная методом распределения и приведенная в сопоставимые цены 2020 г. с помощью индекса дефлятора ВВП;

- оценка промежуточного потребления $W(t)$, приведенная в сопоставимый вид с помощью индекса дефлятора ВВП;

- оценка объема валового накопления основного капитала $I(t)$ в ценах 2020 г. (по дефлятору ВВП);

- оценка объема выполненных научных исследований и разработок $R\&D(t)$ в ценах 2020 г. (по дефлятору ВВП).

Дефлятор ВВП был пересчитан в сопоставимые цены 2020 г. на основе цепных индексов к 1990 г. и верифицирован методом расчета обратных цепных индексов к 2020 г. с учетом деноминаций. Таким образом, во всех расчетах нами использованы сопоставимые единицы измерения. При этом, исходя из логики модели, оценки валового выпуска $V(t)$ и промежуточного потребления $W(t)$ даны на основе производственного метода расчета, а для показателя ВВП $Y(t)$ и валового накопления $I(t)$ основного капитала использован распределительный метод. Поэтому, исходя из методологии формирования статистических показателей, допускается невыполнение модельного равенства

блока 1 (см. рис. 1).

Как уже было отмечено выше, для расчета динамического индикатора роста внутренних инвестиций MI_k по теоретической формуле (12) могут быть предложены различные подходы. Поскольку номер k текущего периода, который определяют по формуле

$k(t, h) = \left\lceil \frac{t}{h} \right\rceil$, зависит от двух временных параметров t и h , для обозначения оценки динамического индикатора роста внутренних инвестиций MI_k , применяемого в описании модели, будем использовать символ h , который, на наш взгляд, более полно отражает многоаспектную динамическую суть индикатора. Аналогично для

параметров модели b_k , $1-a_k$ и m_k их оценки, полученные в результате обработки эмпирических данных, будем обозначать символами $b_{t,h}$, $1-a_{t,h}$ и $m_{t,h}$ соответственно.

В рамках настоящей статьи для расчетов оценок модельных параметров задаем длину временного лага h в 5 и 7 лет. В основе данного выбора лежат длительность пятилетних планов социально-экономического и научно-технического развития¹⁰ страны; продолжительность среднего срока морального и физического износа активной части основных средств, являющихся носителями технологических новаций (7 лет).

Определение границ двух соседних интервалов $(t-h, t]$ и $(t-2h, t-h]$ осуществляется методом обратного хода, задавая правую границу по последним имеющимся данным (в наших расчетах $t = 2021$ г.), само расположение этих интервалов в пределах T изменялось по «скользящему» принципу с шагом в 1 год. Оценки нормы валового накопления основного капитала в ВВП $b_{t,h}$ и нормы валового внутреннего продукта в валовом выпуске $1-a_{t,h}$ рассчитаны по данным на соответствующем интервале $(t-h, t]$ по формулам:

$$b_{t,h} = \frac{\sum_{j=t-h+1}^t I(j)}{\sum_{j=t-h+1}^t Y(j)}, \quad 1-a_{t,h} = \frac{\sum_{j=t-h+1}^t Y(j)}{\sum_{j=t-h+1}^t V(j)},$$

где $I(j)$, $Y(j)$, $V(j)$ – оценки объемов валового накопления основного капитала¹¹, валового внутреннего продукта и валового выпуска в j -ом году в ценах 2020 г. соответственно.

Для оценки динамического индикатора роста долгосрочных внутренних инвестиций воспользуемся формулой:

¹⁰ В частности, Государственная программа научных исследований, Государственная программа инновационного развития, Государственная программа «Наукоемкие технологии и техника», «Цифровое развитие Беларуси» и др.

¹¹ Отметим, что валовой внутренний продукт включает в свой состав также и потребление основного капитала, которое, строго говоря, не является внутренним источником роста. Но отсутствие общепризнанных методологических подходов к процедуре «очистки» ВВП от амортизационных отчислений не позволяет нам на данном этапе использовать в расчетах модельные показатели, которые представляют из себя, по сути, внутренние инвестиции на чистой основе (как часть валового накопления).

$$MI_{t,h} = 1 - \frac{\sum_{j=t-2h+1, \atop t-h \in T}^{t-h} R \& D(j)}{\sum_{j=t-h+1}^t R \& D(j)},$$

где $R \& D(j)$ – оценка объема выполненных научных исследований и разработок в j -ом году в ценах 2020 г.

Далее представим результаты расчета $MI_{t,h}$, $b_{t,h}$, $1 - a_{t,h}$ и $m_{t,h}$ для интервалов h длины 5 лет (табл. 1) и 7 лет (табл. 2). Для удобства восприятия интервалы, для которых рассчитывались значения показателей, расположены построчно, а сами расчетные значения – по столбцам.

Анализируя представленные в табл. 1 оценки ключевых параметров модели на 5-летних интервалах, можно сформулировать несколько выводов относительно динамики прироста долгосрочной инвестиционной компоненты валового внутреннего продукта на

периоде наблюдения T , характеризуемого показателем $MI_{t,h}$, а также совместного влияния данного показателя, нормы накопления основного капитала и нормы ВВП в валовом выпуске¹² на индикатор потенциала технологических сдвигов $m_{t,h}$:

- начиная с пятилетки 2001–2005 гг. и вплоть до пятилетки 2006–2010 гг., наблюдалось существенное приращение (по отношению к оцениваемому периоду) объемов выполненных научно-исследовательских работ, что способствовало, если рассматривать с количественной точки зрения, накоплению в экономике в указанные периоды значимых внутренних источников, обеспечивших в последующем устойчивую повышательную

¹² Показатель доли ВВП в валовом выпуске характеризует возможности экономики направлять часть созданного продукта на валовое накопление и конечное потребление (с учетом экспорта/импорта на чистой основе), т. е., наряду с производительностью труда как удельным показателем, позволяет также косвенно оценивать ее валовую эффективность.

Таблица 1
Расчетные значения параметров модели по объему выполненных научных исследований и разработок для $h = 5$

Период ($t - h, t$]	Период ($t - 2h, t - h$]	$MI_{t,h}$ (НИОКР)	Норма ВВП (с учетом чистых налогов) в валовом выпуске ($1 - a_{t,h}$) в период ($t - h, t$]	Норма валового накопления основного капитала в ВВП $b_{t,h}$ в период ($t - h, t$]	Коэффициент $m_{t,h}$
2001–2005	1996–2000	0,26	0,489	0,242	0,031
2002–2006	1997–2001	0,27	0,499	0,258	0,035
2003–2007	1998–2002	0,31	0,500	0,277	0,043
2004–2008	1999–2003	0,33	0,497	0,296	0,049
2005–2009	2000–2004	0,32	0,501	0,316	0,051
2006–2010	2001–2005	0,22	0,496	0,340	0,037
2007–2011	2002–2006	0,14	0,485	0,355	0,024
2008–2012	2003–2007	0,06	0,479	0,358	0,010
2009–2013	2004–2008	-0,01	0,481	0,365	-0,002
2010–2014	2005–2009	-0,05	0,484	0,360	-0,009
2011–2015	2006–2010	-0,08	0,494	0,340	-0,013
2012–2016	2007–2011	-0,10	0,508	0,317	-0,016
2013–2017	2008–2012	-0,14	0,518	0,302	-0,022
2014–2018	2009–2013	-0,22	0,521	0,280	-0,032
2015–2019	2010–2014	-0,02	0,520	0,267	-0,003
2016–2020	2011–2015	-0,14	0,521	0,261	-0,019
2017–2021	2012–2016	-0,13	0,521	0,255	-0,017

Источник. Авторская разработка по данным Белстата.

динамику медленного инвестиционного цикла, а с качественной – трансформации этих возможностей в технологический сдвиг, потенциал которого для данного интервала h может быть оценен посредством модельного индикатора $m_{t,h}$;

- на показатель $m_{t,h}$ оказывал также влияние и рост доли валового накопления основного капитала в самом ВВП ($b_{t,h}$), характеризующей в инвестиционном цикле его агрегированную на интервале $(t-h, t]$ быструю динамику. Здесь следует отметить: поскольку в модели медленная и быстрая динамика тесно взаимосвязаны, характеризуя с разных сторон единый инновационно-инвестиционный процесс, пролонгированное воздействие на быстрый цикл показателя прироста выполненных исследований и разработок (индикатор $MI_{t,h}$) сказалось самым непосредственным образом. Индикатор $b_{t,h}$ продолжал возрастать на протяжении еще нескольких пятилетних периодов, вплоть до интервала 2009–2013 гг., и даже на следующем он был еще достаточно высок по сравнению со стартовыми условиями оценки, после чего наступил переломный момент в динамике этого показателя в отрицательную сторону (см. табл. 1). При рассмотрении относительно закрытой экономической системы подобное сопутствие факторов модели с определенным лагом свидетельствовало бы об исчерпании внутренних возможностей перехода инвестиций из стадии медленного цикла оборота, описывающего в данной модели процесс создания и потребления новых знаний, в быстрый цикл, т.е. в создание и потребление овециествленных знаний – материальных и нематериальных активов. Для открытой же экономики целесообразно дополнять полученные оценки анализом внешнеторгового баланса оборудования и нематериальных активов. Тем не менее даже без учета импорта оборудования и патентов сложившаяся, начиная с 2009–2013 гг., и продолжающаяся до настоящего времени тенденция сокращения доли накопления основного капитала в ВВП (быстрая динамика инвестиций), поддерживаемая снижением выпуска научной продукции (медленная динамика инвестиций), отражает процесс уменьшения прежде все-

го инновационной составляющей инновационно-инвестиционного цикла, ее эксплуатации без восполнения;

- наиболее благоприятное сочетание параметров модели, которое привело к формированию максимального уровня потенциала технологического сдвига $m_{t,h}$ на всем наблюдаемом периоде развития экономики Республики Беларусь, сложилось в пятилетке 2005–2009 гг.;

- примечательной особенностью предлагаемых модели и индикатора $MI_{t,h}$ является то, что они позволяют увидеть, что с определенным лагом на изменение прироста инвестиций длинного цикла реагирует не только норма накопления, но и доля ВВП в валовом выпуске (см. табл. 1). Возможности национальной экономики отвлекать средства на конечное потребление и валовое накопление росли до 2012–2016 гг., после чего с интервала 2013–2017 гг. произошла их стабилизация на достаточно высоком уровне – более 50%, что протекало на фоне восстановления темпов прироста инвестиций длинного цикла, характерного для периода с 2013–2017 гг. по 2015–2019 гг., при том что норма накопления основного капитала в это время продолжала падение (созданная добавленная стоимость перераспределялась в пользу потребления);

- исходя из последнего тезиса, поскольку после интервала 2013–2017 гг. отрицательный рост долгосрочных внутренних инвестиций $MI_{t,h}$ сопровождался, как минимум, не убыванием нормы ВВП, мы можем (с известными ограничениями, обусловленными возможным более эффективным использованием внешних инвестиций, в том числе связанных с перемещением нематериальных активов) говорить о том, что к 2013 г. в экономике были сформированы определенные инвестиционные условия, трансформировавшиеся в технологический сдвиг, достаточный для поддержания нормы ВВП в последующие периоды на относительно высоком уровне;

- продолжающееся до настоящего момента сохранение на длительном временном отрезке отрицательной динамики индикатора $MI_{t,h}$, характеризующего как раз поддер-

жание внутренних источников длинного инвестиционного цикла, является, безусловно, негативным трендом, поскольку истощает эти источники (в том числе по причине устаревания знаний).

Совокупность рассмотренных выше трендов достаточно наглядно представлена на графике (рис. 2), построенном на непересекающихся интервалах в соответствии с внутренней логикой модели (для

наблюдаемых данных их всего четыре, выделены в табл. 1).

Аналогичное исследование было проведено для $h = 7$ лет (см. табл. 2). Стабильность технологического режима функционирования экономики можно наблюдать на интервалах с 2003–2009 по 2008–2014 гг. (высокий положительный уровень индикатора $MI_{t,h}$ и рост $b_{t,h}$), затем на интервалах с 2010–2016 по 2015–2021 гг. (значитель-

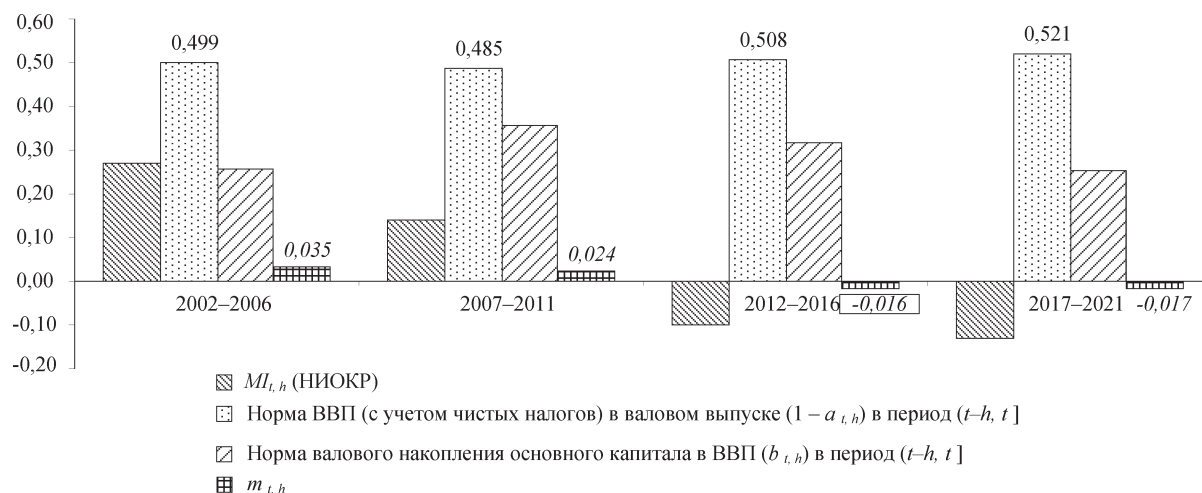


Рис. 2. Индикаторы модели, характеризующие потенциал технологических сдвигов на непересекающихся отрезках t

Таблица 2

Расчетные значения параметров модели по объему выполненных научных исследований и разработок для $h = 7$

Период $(t-h, t]$	Период $(t-2h, t-h]$	$MI_{t,h}$ (НИОКР)	Норма ВВП (с учетом чистых налогов) в валовом выпуске $(1 - a_{t,h})$ в период $(t-h, t]$	Норма валового накопления основного капитала в ВВП $b_{t,h}$ в период $(t-h, t]$	Коэффициент $m_{t,h}$
2003–2009	1996–2002	0,37	0,501	0,300	0,06
2004–2010	1997–2003	0,35	0,497	0,321	0,06
2005–2011	1998–2004	0,32	0,489	0,338	0,05
2006–2012	1999–2005	0,24	0,483	0,345	0,04
2007–2013	2000–2006	0,22	0,484	0,35	0,04
2008–2014	2001–2007	0,13	0,489	0,36	0,02
2009–2015	2002–2008	0,03	0,494	0,35	0,01
2010–2016	2003–2009	-0,04	0,496	0,33	-0,01
2011–2017	2004–2010	-0,10	0,500	0,32	-0,02
2012–2018	2005–2011	-0,13	0,509	0,30	-0,02
2013–2019	2006–2012	-0,17	0,517	0,29	-0,03
2014–2020	2007–2013	-0,26	0,523	0,27	-0,04
2015–2021	2008–2014	-0,24	0,523	0,26	-0,03

Источник. Авторская разработка по данным Белстата.

ное падение $MI_{t,h}$ и снижение $b_{t,h}$). Результаты анализа данных обеих таблиц показывают, что относительная стабильность технологической структуры в реальности сохраняется в рассматриваемом нами периоде наблюдений T для Республики Беларусь на интервалах различной длины.

Возвращаясь к анализу рис. 2, отметим неотрицательное значение индикатора $MI_{t,h}$ в сочетании с положительной динамикой доли валового накопления в периоды с 2002 по 2006 г. и с 2007 по 2011 г. С другой стороны, на интервалах с 2012 по 2016 г. и с 2017 по 2021 г. наблюдается иной характер поведения данных индикаторов:

принимает отрицательные значения, а норма валового накопления имеет тенденцию к снижению, что позволяет вполне обоснованно выделить два десятилетних периода с относительно стабильными технологическими режимами. Гипотеза о стабильности технологического режима функционирования экономической системы, характеризуемая параметрами модели на паре последовательных непересекающихся десятилетних интервалах наблюдения, приводит к целесообразности оценить указанные индикаторы для $h = 10$ лет (табл. 3).

При содержательной оценке параметров модели на интервале $h = 10$ лет еще более отчетливо прослеживается непрерывное сокращение потенциала технологических сдвигов начиная с периода 2006–2015 гг.

Факторами подобного снижения являются уменьшение нормы валового накопления основного капитала и низкий темп прироста выпуска научно-исследовательских работ и услуг. При этом за счет сформированного в период до 2015 г. технологического базиса удастся поддерживать относительно высокий уровень добавленной стоимости в выпуске.

Сохранение высокой нормы ВВП в выпуске обеспечивается за счет роста экспорта на чистой основе и поддержания на достаточно высоком уровне удельного веса конечного потребления, что с точки зрения структуры ВВП является в целом положительным явлением, поскольку также косвенно свидетельствует о произошедшем в период до 2015 г. изменении технологических возможностей экономики. Оценивая изменение структуры конечного потребления, можно наблюдать опережающий рост расходов государственных организаций, особенно в период 2020–2021 гг., что в немалой степени обусловлено перераспределением в указанные годы средств государственного бюджета с инвестиций в основной капитал производящих отраслей в пользу поддержки здравоохранения (преодоление последствий COVID-19) и сохранения социальной направленности экономики.

В то же время следует иметь в виду, что по причине истощения долгосрочных инвестиционных возможностей доля валового накопления и на более длинных h в последние

Таблица 3

Расчетные значения параметров модели по объему выполненных научных исследований и разработок для $h = 10$

Период ($t - h, t$]	Период ($t - 2h, t - h$]	$MI_{t,h}$ (НИОКР)	Норма ВВП (с учетом чистых налогов) в валовом выпуске ($1 - a_{t,h}$) в период ($t - h, t$]	Норма валового накопления основного капитала в ВВП $b_{t,h}$ в период ($t - h, t$]	Коэффициент $m_{t,h}$
2006–2015	1996–2005	0,29	0,495	0,340	0,049
2007–2016	1997–2006	0,22	0,497	0,335	0,037
2008–2017	1998–2007	0,15	0,499	0,329	0,025
2009–2018	1999–2008	0,07	0,500	0,322	0,011
2010–2019	2000–2009	0,04	0,501	0,313	0,006
2011–2020	2001–2010	-0,03	0,507	0,300	-0,005
2012–2021	2002–2011	-0,09	0,514	0,285	-0,013

Источник. Авторская разработка по данным Белстата.

годы неуклонно снижается, причем с неблагоприятным прогнозом фактора эндогенного роста (отрицательное значение $MI_{t,h}$).

Таким образом, использование предлагаемого в работе модельного инструментария позволило, во-первых, установить наличие логически обоснованной связи между индикатором $MI_{t,h}$, характеризующим длинный инвестиционный цикл через приращение выпуска научной продукции в обратном времени, и индикатором (норма накопления основного капитала), характеризующим короткий инвестиционный цикл, а во-вторых, используя показатель потенциала технологической трансформации $m_{t,h}$, выявить интервалы, в которых изменение технологической структуры экономики является важным фактором эндогенного роста. Такими интервалами являются периоды, по окончании которых показатель валовой эффективности экономики $1-a_{t,h}$ (норма ВВП) растет сопоставимыми или более высокими темпами, чем показатель потенциала технологических сдвигов $m_{t,h}$ ¹³, либо сохраняет свой уровень на последующих интервалах при снижении $m_{t,h}$. Сам индикатор $m_{t,h}$ позволяет оценить возможности, или готовность экономики к очередному технологическому сдвигу. Его переход через 0 в отрицательные значения свидетельствует о сокращении таких возможностей на анализируемом временном интервале. При этом сохранение отрицательных значений $m_{t,h}$ при увеличении временного интервала оценки является сигналом формирования технологической ловушки, выход из которой без внешнего притока технологий проблематичен.

* * *

На основе процессно-системной методологии построена математическая модель производственно-инвестиционного цикла односекторной экономики в контексте технологических трансформаций, представленная системой дифференциально-алгебраических уравнений с запаздыванием. В результате логического обоснования модели разработаны новые макроэкономические индикаторы $MI_{t,h}$

¹³ То есть темп роста доли ВВП в валовом выпуске сопоставим или превышает темп прироста выпуска научной продукции и разработок в обратном времени.

и $m_{t,h}$. Динамический индикатор приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций $MI_{t,h}$ определен как темп прироста долгосрочной компоненты внутренних инвестиций в обратном времени на временном интервале длины h . При апробации разработанных индикаторов на эмпирических данных для Республики Беларусь долгосрочные внутренние инвестиции модели оценивались объемом выполненных научных исследований и разработок. Для расчета $m_{t,h}$ – интегрального показателя потенциала технологического сдвига экономической системы – проведен совместный анализ динамики индикатора приведенного роста долгосрочных внутренних инвестиций, нормы накопления основного капитала и доли ВВП в валовом выпуске на временных интервалах разной длины h (5, 7 и 10 лет), который позволил сформулировать значимые выводы о технологических сдвигах национальной экономической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

Балацкий Е.В., Юревич М.А. 2020. Технологический эффект масштаба и экономический рост. *Terra Economicus*. Т. 18. № 1. С. 43–57. [Balatsky E.V., Yurevich M.A. 2020. Technological Economies of Scale and Economic Growth. *Terra Economicus*. Vol. 18. No 1. PP. 43–57. (In Russ.)] DOI: 10.18522/2073-6606-2020-18-1-43-57

Балацкий Е. 2021. Идентификация технологического фронта. *Форсайт*. Т. 15. № 3. С. 23–34. [Balatsky E. 2021. Identification of the Technology Frontier. *Forsajt*. Vol. 15. No 3. PP. 23–34. (In Russ.)] DOI: 10.17323/2500-2597.2021.3.23.34

Григорьев Л.М., Макарова Е.А. 2019. Норма накопления и экономический рост: сдвиги после Великой рецессии. *Вопросы экономики*. № 12. С. 24–46. [Grigoryev L.M., Makarova E.A. 2019. Capital Accumulation and Economic Growth After the Great Recession. *Voprosy ekonomiki*. No 12. PP. 24–46. (In Russ.)] DOI: 10.32609/0042-8736-2019-12-24-46

Комков В.Н. 2021. Экономический рост при нулевом качестве: особенности и последствия. *Банкаўскі веснік*. № 3. С. 3–10. [Kamkou V. 2021. Economic Growth at Zero Quality: Peculiarities and Consequences. *Bankawski vesnik*. No 3. С. 3–10. (In Russ.)]

Курзев В.А., Матвеев В.Д. 2018. *Экономический рост*. Санкт-Петербург: Питер.

[Kurzenev V.A., Matveenko V.D. 2018. *Economic Growth*. Sankt-Peterburg: Piter. (In Russ.)]

Поддубная О.Н. 2020. Теоретические и концептуальные подходы к моделированию экономической динамики в контексте цифровой трансформации. *Белорусский экономический журнал*. № 4. С. 79–90. [Poddubnaia O. 2020. Theoretical and Conceptual Approaches to Economic Dynamics Modeling Tailored to the Digital Transformation. *Belorusskiy ekonomicheskii zhurnal*. No 4. PP. 79–90. (In Russ.)] DOI: 10.46782/1818-4510-2020-4-79-90

Поддубная О.Н. 2021. Процессно-системный подход в исследовании социально-экономических систем: от концепций к моделям. *Белорусский экономический журнал*. № 3. С. 70–82. [Poddubnaia O.

2021. Process-system Approach in Studying Socio-economic Systems: From Concepts to Models. *Belorusskiy ekonomicheskii zhurnal*. No 3. PP. 70–82. (In Russ.)] DOI: 10.46782/1818-4510-2021-3-70-82

Aghion Ph., Howitt P. 2006. Appropriate Growth Policy: A Unifying Framework. *Journal of the European Economic Association*. Vol. 4. No 2–3. PP. 269–314. DOI: 10.1162/jeea.2006.4.2-3.269

Hicks J.R. 1937. Mr. Keynes and the «Classics»: A Suggested Interpretation. *Econometrica*. Vol. 5. No 2. PP. 147–159.

Samuelson P. 1939. Interaction between the Multiplier Analysis and the Principle of Acceleration. *The Review of Economics and Statistics*. Vol. 21. No 2. PP. 75–78.

MODEL AND INDICATORS OF TECHNOLOGICAL TRANSFORMATIONS OF ECONOMIC SYSTEMS

Olesia Poddubnaia¹ (<https://orcid.org/0000-0001-9594-6226>)

¹ Belarusian State Economic University (Minsk, Belarus).

Corresponding author: Olesia Poddubnaia (poddubnaia.o@bseu.by).

ABSTRACT. Based on the process-system methodology, the mechanisms of capital growth at different rates in the innovation-investment cycle of a one-sector economy are formalized. New macroeconomic indicators are proposed as a result of the logical rationale of the model: a dynamic indicator of the long-term growth of domestic investment and an indicator of the potential for a technological shift in the economic system. To test the developed indicators on empirical data for the Republic of Belarus, the volume of carried out research and development was chosen as an assessment of the long-term domestic investment of the model. Advanced analysis of the dynamics of the indicator of the growth of long-term domestic investment, the share of accumulation of fixed capital and the share of GDP in gross output made it possible to formulate significant conclusions regarding the technological transformation of the national economic system.

KEYWORDS: economical dynamics, innovation and investment cycle, investment structure, technological transformation, dynamic indicator of domestic investment growth.

JEL-code: C02, C39, E17, F43, O41.

DOI: 10.46782/1818-4510-2023-2-90-106

Received 15.03.2023

In citation: Poddubnaia O. 2023. Model and indicators of technological transformations of economic systems. *Belorusskiy ekonomicheskii zhurnal*. No 2. PP. 90–106. DOI: 10.46782/1818-4510-2023-2-90-106 (In Russ.)

