УДК 519.6

# ИННОВАЦИОННАЯ И ИНВЕСТИЦИОННАЯ ПОЛИТИКА: МОДЕЛЬ СМЕНЫ ТЕХНОЛОГИЙ

А.А. Иващенко, Р.М. Нижегородцев, Д.А. Новиков

(*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва*)

Формулируется и исследуется динамическая модель смены технологий, в рамках которой ставится задача выбора инновационной политики (в какие моменты времени начинать разработку и/или внедрение той или иной новой технологии) и инвестиционной политики – каков оптимальный график инвестиций в новые технологии.

## Введение

Аппарат дифференциальных уравнений и оптимального управления давно и успешно используется для построения моделей развития сложных систем [1-6]. Настоящая работа посвящена формулировке и исследованию динамической модели смены технологий, в рамках которой ставится задача выбора инновационной политики [7, 8] (в какие моменты времени начинать разработку и/или внедрение той или иной новой технологии, включая принятие решений о целесообразности ее внедрения вообще) и инвестиционной политики [9] – каков оптимальный график инвестиций в новые технологии. Предлагаемая модель является достаточно общей – она применима для любого объекта (экономического агента, принимающего решение относительно инновационного развития), начиная с уровня государства, разрабатывающего стратегию стимулирования инноваций, и заканчивая фирмой или крупной корпорацией, реализующей стратегию инновационного прорыва на отдельных рыночных нишах.

## 1. Описание модели

Рассмотрим следующую модель. Предположим, что рассматривается динамика развития $n \geq 1$ *технологий* (последовательно сменяющих друг друга технологических укладов [4, 7] или отдельных инноваций – содержательный их смысл в рамках рассматриваемой модели одинаков) на *плановый горизонт* $T$, который фиксирован и считается известным. Динамика развития $i$-ой технологии (ее *жизненный цикл*) описывается следующим дифференциальным уравнением:

(1) $\dot{x}_i(t) = \{\gamma_i(x_{i-1}(t_i), u_i(t))\, x_i(t)\, [Q_i - x_i(t)]\}\, I(t \geq t_i),$

где $I(\cdot)$ – функция-индикатор, $t \in [0; T]$, $u_i(\cdot)$ – управление (инвестиции), $Q_1 \le Q_2 \le \ldots \le Q_n$ – известные *предельные уровни* развития технологий (технологические пределы – разность между «соседними» технологическими пределами характеризует *технологический скачок*), $i \in N = \{1, 2, \ldots, n\}$ – упорядоченному множеству технологий, $t_1 = 0 \le t_2 \le \ldots \le t_n \le T$ – конечная последовательность моментов «переключения» – перехода от одной технологии к следующей. Зададим начальные и конечные условия: $x_1(0) = x_0 \ge 0$, $x_i(t) = 0$, $t \in (t_{i+1}, T]$, $i \in \{1, 2, \ldots, n-1\}$,

(2) $x_i(t_i) = \max\,[x_0, x_{i-1}(t_i) - q_i]$, $i \in N$.

Содержательно, моменты времени $\{t_i\}_{i \in N}$ соответствуют «*переключению*» (переходу) на новую технологию, известные величины $\{q_i\}_{i \in N}$ – потерям, связанным с переходом, $u_i(\cdot) \ge 0$ – динамике изменения *ресурсов*, вкладываемых в развитие технологий, $i \in N$. Динамика $i$-ой технологии описывается *обобщенным логистическим уравнением* (1) [4, 5] со скоростью роста, описываемой известной функцией $\gamma_i(x_i(t_i), u_i(t))$, зависящей от уже достигнутого на предыдущем этапе уровня $x_i(t_i)$ развития (точнее – «стартового» для данного этапа уровня – см. (2)) и количества ресурсов $u_i(\cdot)$.

Траектория $x(t) = x_i(t)$, $t \in [t_i; t_{i+1})$, характеризует уровень развития технологий.

Определим достигнутый к концу планового горизонта $T$ *уровень развития* технологий $X(T)$:

(3) $X(T) = \max\limits_{i \in N} \{x_i(T)\}$.

## 2. Оптимизационная задача

Пусть заданы:

- *функция «дохода»* $H(X(T))$, отражающая доход, получаемый в конце планового периода (зависящий от достигнутого уровня $X(T)$ развития технологий),

- *функционал «дохода»* $F(x(\cdot)) = \int_0^T f(x(t))dt$,

отражающий доход, получаемый в процессе развития технологий;

-*функция затрат* $C(u(\cdot)) = \int_0^T \sum_{i \in N} u_i(t) e^{-\delta_i(t)\,t} dt$,

где $\forall t \in (0; T)$ $\delta_i(t) \in (0; 1]$ – это коэффициенты дисконтирования, отражающие темпы морального износа научно-технической информации, овеществленной в данном технологическом решении, $u(\cdot) = (u_1(\cdot), u_2(\cdot), \ldots, u_n(\cdot))$ – вектор динамики ресурсов, который отражает

***инвестиционную политику***, $\Theta = (t_1, \ldots, t_n)$, где $t_1 = 0 \le t_2 \le \ldots \le t_n \le T$, – вектор моментов времен смены технологий, который отражает ***инновационную политику***.

В функционале затрат множитель вида $e^{-\delta(t)\, t}$ означает, что в промежутках между моментами технологических сдвигов действует так называемый закон убывающей производительности капитала (закон тенденции средней нормы прибыли к понижению), и моральный износ научно-технической информации в это время носит монотонно убывающий характер.

Наложим следующие *ограничения*:

(4) $u_i(t_i) \ge c_i$, $u_i(t) = 0,\ t \notin [t_i; t_{i+1}),\ i \in N$,

где константы $\{c_i \ge 0\}$ могут интерпретироваться как инвестиции в приобретение и/или начало внедрения соответствующих технологий.

*Критерий эффективности* можно записать в виде разности между доходом и затратами, тогда оптимизационная задача примет вид: максимизировать критерий эффективности выбором последовательности $\Theta$ смены технологий и вектора $u(\cdot)$ динамики ресурсов, то есть:

(5) $H(X(T)) + F(x(\cdot)) - C(u(\cdot)) \to \max\limits_{\Theta,\, u(\cdot)}$,

при условии, что динамика технологий описывается системой уравнений (1) с начальными условиями (2), а ресурсы удовлетворяют ограничению (4).

Альтернативой может быть использование коэффициента рентабельности (эффективности) инвестиций:

(6) $\gamma(\Theta, u(\cdot)) = \dfrac{H(X(T)) + F(x(\cdot))}{C(u(\cdot))}$.

Введем следующее предположение: функции $\gamma_i(x_{i-1}, u_i)$ не убывают по всем переменным, $\gamma_i(x_{i-1}, 0) = 0$, $i \in N$; функция $H(\cdot)$ также является неубывающей. Содержательные интерпретации этих предположений очевидны (то есть доход от наличия *уже достигнутого* технического уровня может разве лишь накапливаться).

Отметим, что частным случаем решения задачи (5) может являться реализация любого подмножества множества технологий $N$, что может происходить при совпадении соответствующих времен переключений.

Каждое из уравнений, входящих в систему (1), может быть решено независимо:

(7) $x_i(t, u_i(\cdot)) = \dfrac{x_i(t_i)\, Q_i\, I(t \ge t_i)}{[x_i(t_i) \int\limits_{t_i}^{t-t_i} \gamma_i(r_i, x_{i-1}(t_i), u_i(\tau) e^{\int_{t_i}^{\tau} \gamma_i(r_i, x_{i-1}(t_i), u_i(\xi)) d\xi} d\tau + Q_i] e^{-\int_{t_i}^{t-t_i} \gamma_i(r_i, x_{i-1}(t_i), u_i(\xi)) d\xi}}$, $i \in N$.

Если $u_i(t) = u_i$ при $t \in [t_i; t_{i+1})$, $i \in N$, то из (7) получим набор логистических кривых (связанных соотношением (2)):

(8) $x_i(t, u_i) = \dfrac{x_i(t_i)\, Q_i\ I(t \in [t_i; t_{i+1}))}{x_i(t_i) + (Q_i - x_i(t_i)) e^{-\gamma_i(r_i, x_{i-1}(t_i), u_i)t}}$, $t \geq t_{i+1}$, $i \in N$.

Задача (5) является «аддитивной», так как в ней критерий эффективности представляет собой разность функционала от терминального значения траектории и функционала, зависящего от всей траектории, причем моменты переключений априори упорядочены. Поэтому данная задача может быть отнесена к классу задач оптимального управления [10-12]с фазовыми координатами, разрывными во внутренних точках [11]. Для ее решения, в случае известных моментов переключений, могут быть использованы известные методы [12], в общем же случае следует сначала искать оптимальные управления при фиксированных моментах переключений, а затем – применять метод динамического программирования для поиска моментов переключения при условии, что оптимальные инвестиции между моментами переключений ищутся из решения соответствующих задач оптимального управления (авторы признательны за данную идею проф. А.Г. Бутковскому).

Решение задачи (5) в ряде случаев может быть получено численно, что позволяет, во-первых, при заданных исходных данных находить оптимальную инновационную и инвестиционную политику. Во-вторых, появляется возможность посредством имитационного моделирования анализировать различные инвестиционные стратегии, оценивать их эффективность, сравнивать между собой и т.д. Кроме того, отметим, что в предложенной модели фигурирует достаточно много параметров, поэтому, опуская часть из них, можно получать более простые модели, вводя для которых содержательно интерпретируемые предположения, можно получать аналитические решения (см. (8)).

## 3. Качественное обсуждение

Итак, в предложенной модели фигурируют следующие параметры (разбиение параметров на группы достаточно условно, так как в зависимости от моделируемой ситуации один и тот же параметр может быть отнесен к различным группам).

1. Характеристики технологий: $\{q_i, c_i, Q_i, \gamma_i(\cdot)\}$, где $q_i$ – одномоментные потери (или выигрыш) в уровне развития технологий, связанные с внедрением новой технологии, $c_i$ – инвестиции в новую технологию, $Q_i$ – максимальный уровень ее развития (технологический предел), $\gamma_i(\cdot)$ – зависимость скорости развития от инвестиций и характеристик объекта, внедряющего новые технологии, $i \in N$.

2. Характеристики объекта: $x_0$ – начальный уровень развития технологий, $T$ – горизонт планирования.

3. Характеристика внешней среды: $\{\delta_i(t)\}$ – коэффициенты дисконтирования.

Задача (5) заключается в совместном (!) выборе инновационной политики (в какие *моменты времени* начинать внедрение той или иной новой технологии, включая принятие решений о целесообразности ее внедрения вообще) и инвестиционной политики – каков оптимальный *график инвестиций* в новые технологии.

Содержательные интерпретации задачи (5) могут быть самыми разными – начиная от анализа государственной политики стимулирования инновационного развития экономики, отраслей и отдельных предприятий, и заканчивая выбором стратегии инновационного развития на уровне фирмы или многоотраслевой корпорации.

**Заключение**

Таким образом, в настоящей работе предложена динамическая модель смены технологий, в рамках которой сформулирована задача совместного выбора инновационной и инвестиционной политики. Перспективными представляются следующие направления дальнейших исследований (помимо численной реализации методов решения задачи (5) и получения для нее условий оптимальности).

1. Анализ чувствительности – изучение зависимости оптимального решения от начальных данных и параметров модели.

2. Введение неопределенности – получение решения, оптимального в условиях априорной неопределенности относительно различных параметров модели.

3. Сценарный анализ – исследование свойств оптимальных решений в зависимости от предположений, вводимых относительно диапазонов значений параметров модели (обобщение пп. 1 и 2). Данный этап является существенным, так как необходимо различать предпосылки и следствия из них – бессмысленно сравнивать различные стратегии инвестиций в новейшие технологические уклады и сценарии их развития, если в их основе лежат отличающиеся между собой *оценки эффективности* инвестиций.

4. Обобщение результатов пп. 1-3 на случаи, когда динамика развития технологий описывается другим дифференциальным уравнением, нежели (1) – общая постановка задачи при этом сохранится.

5. Управление портфелем технологий – обобщение модели на случай выбора из нескольких технологий в момент переключения, причем множество альтернатив на каждом шаге может зависеть от множества уже реализованных технологий.

В последнем случае теряется аддитивный характер задачи и, соответственно, усложняются методы ее решения. Но, появляются и новые возможности – например, допуская зависимость $q_i$ от $c_i$, $i \in N$, получаем возможность анализировать различные стратегии – ориентацию на приобретение технологий (имитационный характер деятельности) или на собственные новации (инновационный характер деятельности), или на разработку и внедрение уже имеющихся технологических решений (стратегия «подхватывания» – catching up) и т.д.

6. Следующим этапом может служить разработка и исследование игровой модели, в которой имеются несколько агентов, и отдача от инвестиций в новые технологии каждого зависит от действий его конкурентов.

**Литература**


1 Венда В.Ф. Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика. М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

2 Малинецкий Г.Г. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент: введение в нелинейную динамику. М.: Наука, 1997. – 255 с.

3 Милованов В.П. Неравновесные социально-экономические системы: синергетика и самоорганизация. М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 264 с.

4 Нижегородцев Р.М. Информационная экономика. М.: МГУ, 2002. т. 1 – 163 с., т. 2 – 173 с., т. 3 – 170 с.

5 Новиков Д.А. Закономерности итеративного научения. М.: ИПУ РАН, 1998. – 96 с.

6 Новиков Д.А., Суханов А.Л. Модели и механизмы управления научными проектами в ВУЗах. М.: ИУО РАО, 2005. – 80 с.

7 Трифилова А.А. Управление инновационным развитием предприятия. М.: Финансы и статистика. – 176 с.

8 Управление инновациями / Под ред. Ю.В. Шленова. М.: Высшая школа, 2003. Том 1. – 252 с. Том 2. – 295 с. Том 3. – 240 с.

9 Шарп У., Александер Г., Бэйли Д. Инвестиции. М.: ИНФРА-М, 2001. – 530 с.

10 Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972. – 576 с.

11 Брайсон А., Ю-ши Х. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. – 544 с.

12 Бутковский А.Г. Фазовые портреты управляемых динамических систем. М.: Наука, 1985. – 136 с.

# INNOVATIVE AND INVESTMENT POLICY: MODEL OF TECHNOLOGIES CHANGE

A.A. Ivashenko, R.M. Nizhegorodtsev, D.A. Novikov
(Institute of Control Sciences, RAS, Moscow)

Dynamic model of technologies change is formulated an explored. The problem of optimal innovative policy (what are the optimal moments for the beginning of R&D and their results application) and optimal investment policy (what is the optimal sequence of investments in new technologies) is solved.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

Иващенко Андрей Александрович - к.т.н., докторант ИПУ РАН, 3349051, ai@ipu.ru

Нижегородцев Роберт Михайлович - д.э.н., в.н.с. ИПУ РАН, 3349051, bell44@rambler.ru

Новиков Дмитрий Александрович - д.т.н., в.н.с. ИПУ РАН, 3349051, novikov@ipu.ru