

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338.1

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМЕЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2016 г.

В.К. Вильданов, А.С. Липин, С.Е. Маркова, О.В. Мичасова

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

michasova@iee.unn.ru

*Статья поступила в редакцию 06.12.2015**Статья принята к печати 18.01.2016*

Исследуется процесс замещения технологий. При внедрении инноваций старые технологии могут быть полностью вытеснены ими или они могут сосуществовать в течение достаточно длительного промежутка времени. Математические модели позволяют лучше понять и прогнозировать тенденции развития процесса замещения или вытеснения технологий. Для его представления используется математическая модель Лотки–Вольтерры, применяемая для моделирования динамики популяций в биологии. Модель реализована в пакете имитационного моделирования iThink, который обладает хорошими возможностями для наглядного представления сложных динамических систем. Для определения параметров модели использовались статистические данные по количеству пользователей коммутируемого и широкополосного доступа к сети Интернет. Применение программных средств имитационного моделирования делает возможным подробный анализ альтернатив развития событий путем задания параметров имитации и несложных преобразований потоковой диаграммы модели.

Ключевые слова: имитационное моделирование, системная динамика, инновации, научно-технологический прогресс, модель Лотки–Вольтерры, модель хищник–жертва.

Введение

Технологический прогресс может быть описан как замена одного материала, процесса или технологии другими. Обычно процесс внедрения инновационной технологии описывается S-образной (логистической) кривой: сначала процесс развивается очень медленно, так как количество пользователей инновации достаточно мало, а количество тех, кто ее не принимает или ничего о ней не знает, очень велико. Постепенно количество пользователей растет, причем с ростом количества происходит и ускорение темпов роста. Через некоторое время темпы роста начинают замедляться, а количество пользователей новой технологии становится близко к уровню насыщения. При этом старая технология, от которой пользователи отказывались при внедрении новой, может исчезнуть вообще (как произошло с аудио- и VHS-кассетами при появлении CD и DVD), а может сохранить некоторое количество приверженцев, которые не перестанут ее использовать (стационарная телефонная связь или грампластинки). Вопрос о степени насыщения рынка пользователей новой технологии и о целесообразности

продолжения поддержки пользователей старой технологии остается весьма важным для менеджеров различных уровней. Вопросы о продолжительности жизненного цикла товаров и услуг – это одна из наиболее интересных тем для изучения с точки зрения менеджмента и экономической теории. Ситуация, когда на смену старой технологии или товару приходит новая, может быть исследована с точки зрения математического моделирования экономических процессов.

Также вопрос смены технологий представляется весьма актуальным с точки зрения макроэкономики, поскольку именно научно-технологический прогресс является фактором экономического роста. Замедление темпов экономического роста – это одна из основных современных проблем развитых стран, и, без сомнений, с точки зрения теории экономического роста, именно развитие существующих технологий и создание новых позволит ее преодолеть. Информационно-коммуникационные технологии являются сегодня именно тем сектором экономики, в котором смена технологий наиболее очевидна и наглядна. Кроме того, в рамках этого сектора существует огромное поле для

создания инноваций, в том числе и вследствие заинтересованности частного бизнеса в исследованиях и внедрении новых разработок.

Целью данной работы является исследование рынка передачи данных на основе имитационного моделирования процесса замещения технологий. В качестве базовой математической модели используется модель Лотки–Вольтерры динамики взаимодействия двух биологических популяций, существующих в одном ареале обитания и конкурирующих между собой. Такое предположение позволяет симитировать взаимодействие двух последовательных поколений новой технологии. Процесс диффузии инноваций и его представление с помощью модели Лотки–Вольтерры описываются в работах [1–6].

Имитационное моделирование проводилось с помощью пакета iThink. Эта программа реализует потоковое представление моделей, которое является основной концепцией системной динамики. Системная динамика представляет одно из направлений системного подхода, в рамках которого предполагается, что мир вокруг нас представляет собой совокупность сложных социальных систем с нелинейным поведением и не всегда очевидной динамикой взаимодействия (в силу существования обратных связей). Более подробные сведения об этом направлении имитационного моделирования можно найти в [7, 8].

Математическая модель процесса замещения технологий

Повсеместное использование ресурсов глобальной сети Интернет делает вопрос исследования технологий доступа с различных точек зрения весьма важным и актуальным. С точки зрения экономистов и маркетологов-аналитиков значимой является проблема определения перспектив развития рынка, определения его емкости и близости к насыщению. На рынке услуг провайдеров по обеспечению доступа в Интернет сначала существовала только одна технология – коммутируемый доступ (КД) через телефонную сеть, по мере развития оптоволоконных сетей появилась возможность широкополосного доступа, который быстро приобретал сторонников в силу большей скорости передачи данных и того факта, что телефонная линия оставалась свободной. Ограниченность скорости распространения новой технологии объяснялась тем фактом, что прокладка оптоволоконной сети требует определенных трудо-временных и материальных затрат. В настоящее время популярность приобретает также мобильный доступ в Интернет, в связи с чем перед интернет-провайдерами встает вопрос о близости

рынка широкополосного доступа (ШПД) к насыщению.

Таким образом, на рынке доступа в Интернет наблюдается замещение одной технологии другой, что может быть представлено математически с помощью модели Лотки–Вольтерры (также известная как модель «хищник–жертва»). Для описания численности двух конкурирующих технологий может быть использована система уравнений, которая является обобщением логистического уравнения [9]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1} - \varepsilon_1 \frac{N_2}{K_2} \right), \\ \frac{dN_2}{dt} &= r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2} - \varepsilon_2 \frac{N_1}{K_1} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь N_1 и N_2 – численности пользователей технологии коммутируемого доступа и технологии широкополосного доступа, соответственно; K_1 и K_2 – емкости рынков соответствующих технологий, r_1 и r_2 – темпы роста количества пользователей при малых численностях (здесь можно пренебречь внутривидовой борьбой, потому что пользователи друг на друга никак не влияют), а $\varepsilon_1 > 0$ и $\varepsilon_2 > 0$ – характеристики конкуренции между технологиями. Установлено, что при $\varepsilon_i \in (0, 1)$, $i = 1, 2$, рассматриваемая модель описывает динамику конкурентного *сосуществования* технологий (или поколений инновационного товара), а при $\varepsilon_1 \in (1, \infty)$, $\varepsilon_2 \in (0, 1)$ описывает динамику конкурентного *вытеснения* первой технологии второй.

Для моделирования были использованы статистические данные [10] по количеству пользователей широкополосного и коммутируемого доступа в Интернет с 2000 по 2011 год по полугодиям (рис. 1).

Более подробно анализ математической модели, а также построение эконометрической модели и идентификация параметров представлены в работе [1]. На основе результатов оценки коэффициентов регрессионной модели были рассчитаны параметры системы (1): $r_1 = 0.5393$; $K_1 = 2.714$; $\varepsilon_1 = 1.3889$; $r_2 = 1.3895$; $K_2 = 1.18870$; $\varepsilon_2 = 0.4163$ [2]. Эти значения использовались для дальнейшего моделирования.

Имитационная модель процесса замещения технологий

Имитационное моделирование предполагает, что система заменяется моделью, на которой и

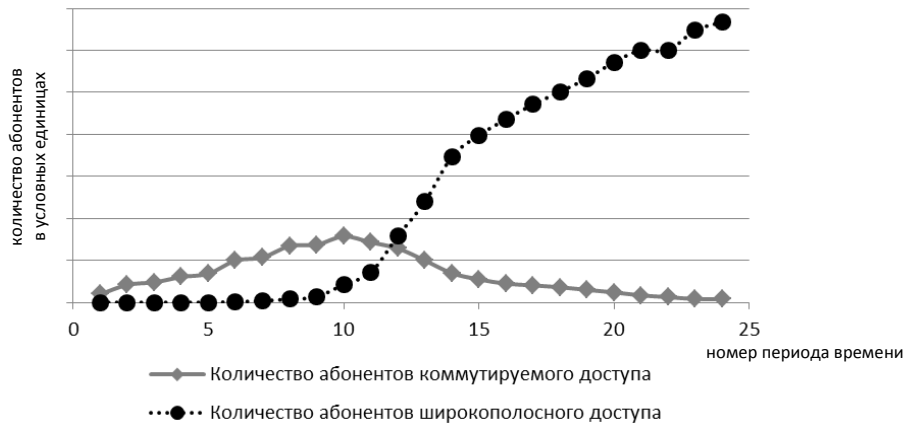


Рис. 1. Количество пользователей различных технологий доступа в Интернет

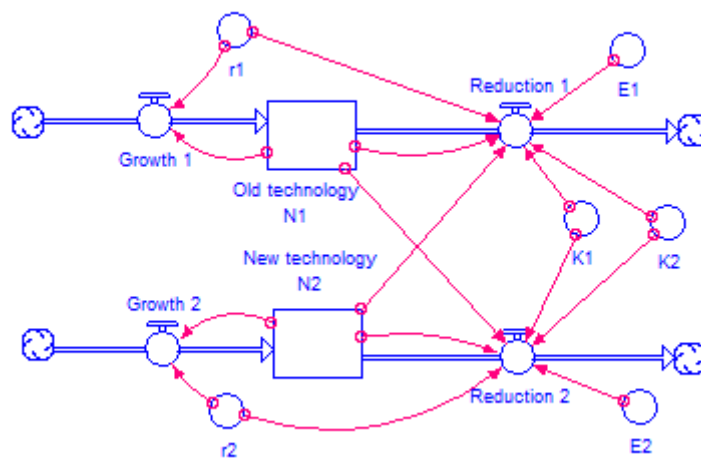


Рис. 2. Поточковая диаграмма модели замещения технологий

проводятся эксперименты [11–13]. В настоящее время имитационное моделирование чаще всего подразумевает создание не опытных образцов, а компьютерных моделей, на основании которых и проводятся испытания. Повсеместное развитие информационных технологий существенно расширило возможности для применения имитационных моделей. Очевидным их достоинством является то, что такие модели можно использовать даже в тех случаях, когда численные и аналитические методы невозможно применить в силу значительной сложности и запутанности реальных систем.

Одним из видов имитационного моделирования является системная динамика, основы которой были заложены в 60-х гг. прошлого века в работах Дж. Форрестера. На основе теории систем, аппарата дифференциальных уравнений и компьютерного моделирования он разработал основную методологию и принципы данного подхода. Основной идеей системной динамики является существование обратной

информационной связи [7, 8, 14]. Контур (цикл, петля) обратной связи – это замкнутый маршрут, который отражает циркуляцию причин и последствий [15]. Обратная связь существует всякий раз, когда решения, принимаемые агентами в системе, влияют на последующие состояния системы, таким образом предоставляя новую информацию, которая учитывается при принятии будущих решений [16].

При создании математических моделей эффект обратных связей учесть достаточно сложно, а применение потокового представления (в виде взаимосвязи запасов и потоков) в рамках системно-динамического подхода позволяет это сделать. Это является существенным преимуществом рассматриваемой концепции, поскольку позволяет лучше понять структуру и взаимозависимости между цепочками событий, а значит, лучше представлять динамику сложных систем.

При моделировании использовалась программа iThink [17], которая реализует системно-динамический подход и позволяет суще-

```

□ New_technology_N2(t) = New_technology_N2(t - dt) + (Growth_2 - Reduction_2) * dt
INIT New_technology_N2 = 0.00008
INFLOWS:
  ↳ Growth_2 = r2*New_technology_N2
OUTFLOWS:
  ↳ Reduction_2 =
    r2*New_technology_N2*New_technology_N2/K2+r2*New_technology_N2*Old_technology_N1*
    E2/K1
□ Old_technology_N1(t) = Old_technology_N1(t - dt) + (Growth_1 - Reduction_1) * dt
INIT Old_technology_N1 = 0.392
INFLOWS:
  ↳ Growth_1 = Old_technology_N1*r1
OUTFLOWS:
  ↳ Reduction_1 =
    r1*Old_technology_N1*Old_technology_N1/K1+r1*New_technology_N2*Old_technology_N1*E1
    /K2
○ E1 = 1.3868
○ E2 = 0.4233
○ K1 = 2.6786
○ K2 = 12.2531
○ r1 = 0.5393
○ r2 = 1.4002

```

Рис. 3. Программный код модели замещения технологий

ственно упростить процесс моделирования, заключающийся в создании комбинаций из встроенных блоков программы (своеобразных «кирпичиков» при построении компьютерной модели). Полученная потоковая диаграмма является наглядным и удобным представлением реальной системы, с которым можно проводить компьютерные эксперименты для различных значений параметров. Пример приложения принципов системной динамики к популяционной модели Лотки–Вольтерры можно найти в [18, 19].

Для представленной ранее модели замещения технологий была построена компьютерная имитационная модель в программе iThink. Потоковая диаграмма представлена на рис. 2.

Модель состоит из двух запасов (прямоугольники), которые отображают количество пользователей коммутируемого доступа (Old technology N1) и широкополосного доступа (New technology N2). Люди могут становиться пользователями того или иного вида интернет-соединения (за это отвечают потоки Growth 1 и Growth 2) или прекращать пользоваться указанными технологиями (потоки Reduction 1 и Reduction 2). Кружочки (конвертеры) обозначают параметры модели: r1 и r2 – темпы роста численностей пользователей технологий, E1 и E2 – параметры, характеризующие конкуренцию между технологиями и, соответственно, влияющие на отток пользователей для каждой технологии, K1 и K2 описывают емкости рынка для коммутируемого и широкополосного доступа в Интернет. Стрелки показывают направление влияния параметров. Также модель следует дополнить графиком и двумя автономными конвертерами (OT1 и NT1), в

которые вносятся сведения о фактических значениях численностей пользователей двух технологий, для сравнения с результатами имитационного эксперимента.

При создании модели программный код генерируется автоматически (рис. 3).

Таким образом, применение пакета iThink не требует знания специальных языков программирования, а визуальное представление модели упрощает понимание механизмов взаимодействия между технологиями в системе. После того как будут заданы параметры модели, вычисленные ранее, и указаны элементы модели, отображаемые на графике, можно осуществлять запуск модели. Результаты имитационного эксперимента представлены на рис. 4.

Из рисунка видно, что построенная системно-динамическая модель чистой конкуренции двух технологий доступа в Интернет весьма хорошо описывает исходные данные. Также можно сказать, что количество пользователей широкополосного доступа в Интернет близко к уровню насыщения. Однако, с точки зрения практического использования, полученные результаты могут быть подвержены одному, очень важному, критическому замечанию, что расчетный уровень насыщения для широкополосного доступа в Интернет меньше, чем реально наблюдаемое количество пользователей. Этот недостаток модели может быть вызван тем фактом, что рассматриваемые емкости рынков каждой из технологий являются постоянными величинами. На самом деле емкость рынка определяется численностью населения, а численность населения во времени демонстрирует возрастающий тренд.

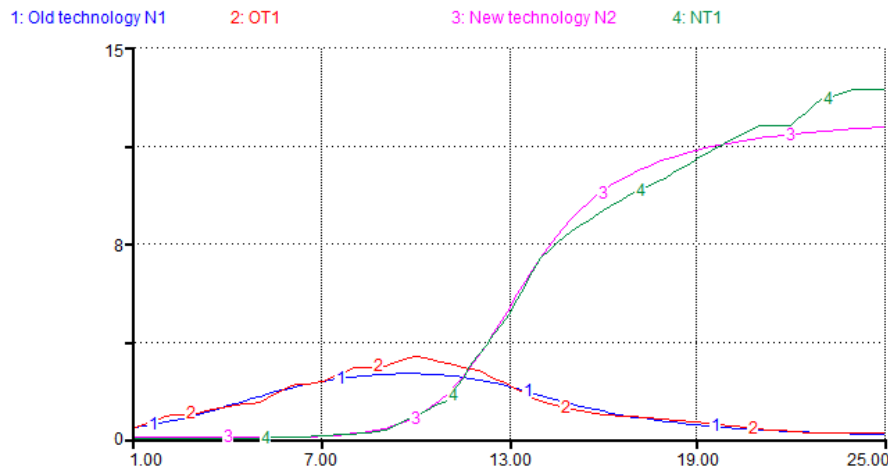


Рис. 4. Результаты имитационного эксперимента для модели замещения технологий

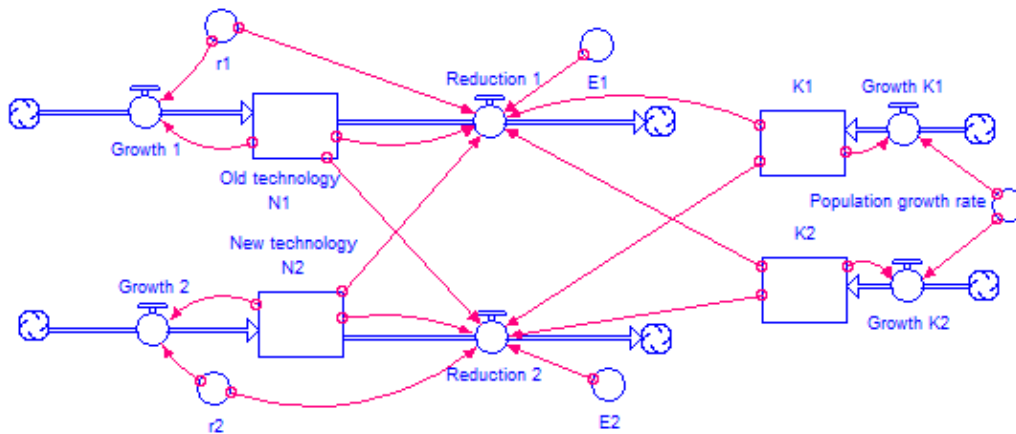


Рис. 5. Потокная диаграмма для модели замещения технологий с учетом роста емкости рынков

Имитационная модель процесса замещения технологий с учетом роста емкости рынков технологий

Внесем изменения в имитационную модель, которые позволят учесть рост емкости рынков для каждой технологии. Пусть темп роста одинаков для обеих технологий и постоянен во времени (в качестве значения возьмем средний темп прироста населения России, в тех годах, когда наблюдается некоторое расхождение траекторий). Емкость рынка для каждой технологии теперь описывается запасами K_1 и K_2 , прирост объясняется соответствующими потоками и определяется конвертером Population growth rate (0.11%). Потокная диаграмма представлена на рис. 5, результаты имитационного эксперимента – на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что рост емкости рынка со скоростью роста населения в стране не дает желаемого результата. Отсюда, вероятно, следует, что емкость рынков технологий, может быть, растет быстрее, чем численность населения, потому что темп роста населения определяется изменением численности населения любого возраста, а потенциальными пользователями сети Интернет являются в основном молодежь и люди среднего возраста. В результате серии имитационных экспериментов было получено, что увеличение емкости рынка пользователей двух рассматриваемых технологий доступа в Интернет происходит с темпом приблизительно 0.75% за период (рис. 7). Причем следует отметить, что увеличение емкости рынка практически не влияет на динамику численности пользователей коммутируемого доступа, которая сохраняет убывающий тренд.

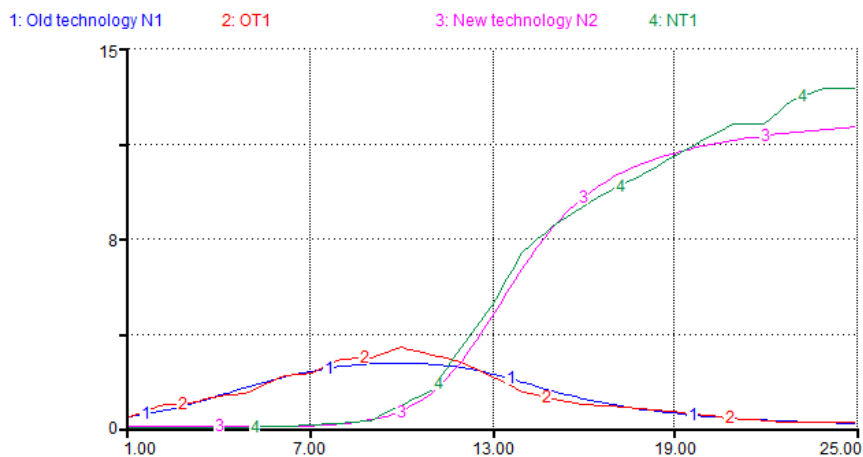


Рис. 6. Результаты имитационного эксперимента для модели замещения технологий с учетом роста емкости рынков (темп роста – 0.11%)

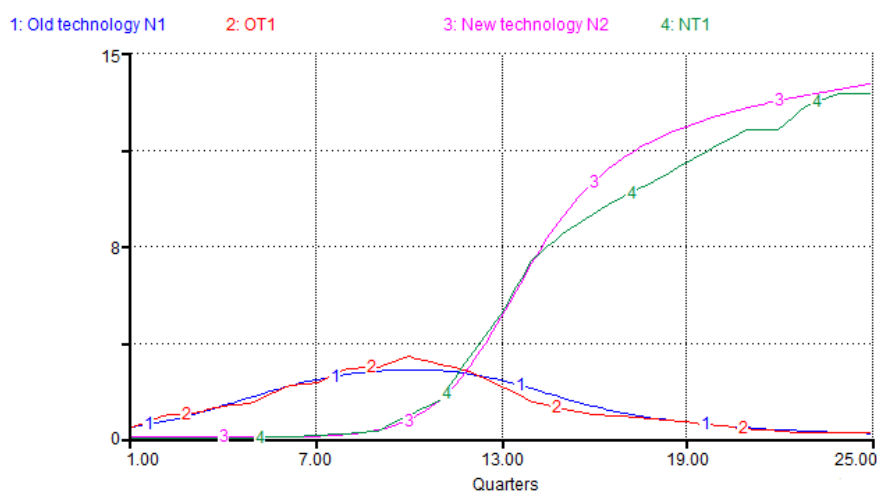


Рис. 7. Результаты имитационного эксперимента для модели замещения технологий с учетом роста емкости рынков (темп роста – 0.75%)

Заключение

В работе построена имитационная модель процесса замещения двух технологий на примере доступа в Интернет. Научно-технологический прогресс, в результате которого происходит диффузия инноваций и вытеснение старых технологий новыми, является важным объектом исследования, поскольку служит одним из определяющих факторов экономического роста. Применение имитационных моделей позволяет проводить численные эксперименты там, где это практически невозможно, а использование средств системной динамики существенно облегчает процесс построения и корректировки моделей. В работе было показано, что модель Лотки–Вольтерры вполне адекватно описывает процесс смены технологий, а учет изменения

емкости рынков существенно повышает точность модели. В качестве направления для дальнейших исследований следует отметить возможность включения в модель третьей технологии доступа в Интернет – мобильного Интернета (например, 3G или LTE).

Список литературы

1. Кузнецов Ю.А., Маркова С.Е., Мичасова О.В. Математическое моделирование динамики конкурентного замещения поколений инновационного товара // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 2 (1). С. 170–179.
2. Кузнецов Ю.А., Маркова С.Е., Мичасова О.В. Экономико-математическое моделирование динамики смены поколений телекоммуникационных услуг // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2014. № 34 (220). С. 43–55.

3. Кузнецов Ю.А., Маркова С.Е. Некоторые качественные особенности развития российского рынка информационных и коммуникационных технологий // Экономический анализ: теория и практика. I. 2013. № 29(332). С. 2–12; II. 2013. № 30 (333). С. 12–21.
4. Morris S.A., Pratt D. Analysis of the Lotka – Volterra competition equations as a technological substitution model // Technological Forecasting & Social Change. 2003. Vol. 70. № 2. P. 103–133.
5. Wang Y., Wu H. Dynamics of a cooperation–competition model for the WWW market // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2004. Vol. 339. № 3–4. P. 609–620.
6. Chiang S.-Y. An application of Lotka – Volterra model to Taiwan's transition from 200mm to 300mm silicon wafers // Technological Forecasting and Social Change. 2012. Vol. 79. № 2. P. 383–392.
7. Каталевский Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: Учеб. пособие. М.: Издательство Московского университета, 2011. 304 с.
8. Sterman J. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: McGraw-Hill Companies, 2000.
9. Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.
10. Ежегодный отчет группы компаний «Связь-инвест», 2011. URL: <http://www.svyazinvest.ru/invest/reports/> (дата обращения: 15.10.2011).
11. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.
12. Максимей И.В. Имитационное моделирование сложных систем: Учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 1. Математические основы. Минск: Изд. центр БГУ, 2009. 264 с.
13. Нейлор Т. и др. Машинные имитационные эксперименты с моделями экономических систем: Пер. с англ. М.: Издательство «Мир», 1975. 500 с.
14. Лычкина Н.Н. Ретроспектива и перспектива системной динамики. Анализ динамики развития // Бизнес-информатика. 2009. № 3 (9). С. 55–67.
15. Сидоренко В.Н. Системная динамика. М.: ТЕИС, 1998. 200 с.
16. Thygesen H.H. System dynamics in action. Copenhagen: Copenhagen Business School, 2004. 247 p.
17. <http://www.iseesystems.com/Softwares/Business/ithinkSoftware.aspx>.
18. Поздеев А.Г., Сапцин В.П., Кузнецова Ю.А. Обобщение модели экологии популяции Лотки–Вольтерры на основе принципов системной динамики // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2011. № 2. С. 94–101.
19. Романов В.П., Ахмадеев Б.А. Моделирование инновационной экосистемы на основе модели «хищник–жертва» // Бизнес-информатика. 2015. № 1. С. 7–17.

SIMULATION OF THE TECHNOLOGY REPLACEMENT PROCESS

V.K. Vildanov, A.S. Lipin, S.E. Markova, O.V. Michasova

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The article investigates the process of technology replacement. Old technologies may be completely replaced by innovations or they may coexist for a long enough period of time. Mathematical models allow a better understanding and prediction of trends in the development of the process of technology replacement or displacement. The Lotka-Volterra mathematical model is used to represent the process. It is usually applied for modeling populations dynamics in biology. The model is realized using the iThink simulation software, which has good potentialities for visual representation of complex dynamic systems. The statistical data on the number of users of dial-up and broadband access to the Internet are used to determine the parameters of the model. The application of simulation software enables detailed analysis of alternatives of events development by setting the simulation parameters and simple transformations of the model stocks-and-flows diagram.

Keywords: simulation, system dynamics, innovations, technological change, Lotka-Volterra model, predator-prey model.