

АДАПТАЦИЯ К ПРОЦЕССАМ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ В АВС-МОДЕЛЯХ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

A.В. Набойкина,
И.Е. Тимченко, И.И. Тимченко***

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

* Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков

** Харьковский национальный политехнический университет – ХПИ, г. Харьков

Исследована адаптация модельных сценариев развития к внешним влияниям, приложенным к эколого-экономическим системам. Рассмотрен пример ABC-модели подобной системы, основанной на уравнениях логистического типа. Показана быстрая сходимость решений уравнений модели к состоянию динамического баланса с процессами в окружающей среде, что обеспечивает управляемость эколого-экономической системы.

В виду сложных взаимодействий, существующих между эколого-экономическими процессами развития, необходимо поддерживать баланс между экономической пользой от потребления природных ресурсов и экологическими нормами сохранения природной среды. Для этой цели разрабатываются интегральные модели эколого-экономических систем, позволяющие прогнозировать сценариями развития при различных вариантах использования ресурсов. В монографии [1] был предложен новый метод моделирования интегральных процессов в подобных системах, который был назван методом адаптивного баланса влияний или ABC-методом (от Adaptive Balance of Causes). В настоящей работе мы рассматриваем свойства адаптации моделей, построенных этим методом, к процессам в окружающей среде, которые управляют сценариями развития.

Модульная система уравнений ABC-метода. Универсальное правило построения формальных моделей процессов, сформулированное Ньютоном, гласит, что мгновенная скорость изменения любого процесса $x(t)$ является некоторой функцией от самого процесса и от действующих на него внешних влияний $f(t)$. Поэтому динамическое уравнение для процесса $x(t)$ должно иметь следующий вид:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, f)$$

Цель моделирования состоит в том, чтобы найти явный вид функции $F(x, f)$ и обеспечить быструю сходимость решения уравнения к равновесному состоянию, т.е. к состоянию динамического баланса процесса $x(t)$ с функцией внешнего влияния $f(t)$. Системный принцип адаптивного баланса влияний [1], постулирует существование равновесия в любой динамической системе, которое должно быть обеспечено балансом положительных и отрицательных обратных связей. Этот принцип будет соблюден, если ввести в правую часть уравнения (2.1) одновременно зависимости от x и $-x$ с некоторыми коэффициентами $F^{(-)}(x)$ и $F^{(+)}(x)$, которые были названы «базовыми функциями влияния». Тогда уравнение процесса принимает вид

$$\frac{dx}{dt} = F^{(-)}(x)x - F^{(+)}(x)x. \quad (1)$$

Базовые функции призваны сдерживать как рост, так и убывание x , направляя его сценарий к устойчивому постоянному значению. Для этого достаточно потребовать, чтобы с ростом x базовая функция $F^{(-)}(x)$ монотонно убывала, а базовая функция $F^{(+)}(x)$ монотонно росла. Для обеспечения общего баланса необходимо поставить дополнительное условие нормировки базовых функций влияния

$$F^{(-)}(x) + F^{(+)}(x) = 1. \quad (2)$$

С учетом этого условия модульное уравнение системной модели процесса x принимает следующую форму

$$\frac{dx}{dt} = x[1 - 2F^{(+)}(x)], \quad (3)$$

где $F^{(+)}(x)$ - любая монотонно растущая функция. Если выбрать ее в виде $F^{(+)}(x) = x$, уравнение (2.7) примет вид логистического уравнения

$$\frac{dx}{dt} = x[1 - 2x] \quad (4)$$

решение которого имеет вид

$$x = \frac{x_0}{[2x_0 + (1 - 2x_0)e^{-t}]}, \quad (5)$$

где через x_0 обозначено начальное условие при $t = 0$.

Из формулы (5) следует, что при любых положительных x_0 решение стремится к постоянному равновесному значению $x = 0.5$. Это доказывает, что уравнение динамического баланса в форме уравнения (4) обеспечивает постоянный во времени сценарий развития $x = 0.5$ безразмерных единиц. Таким образом, системный модуль, представляемый уравнением (4), приходит в состояние равновесия и находится в нем до тех пор, пока на него не будет оказано внешнее влияние.

Рассмотрим теперь случай, когда к процессу x приложено постоянное внешнее влияние $f = c$. Следуя принципу аддитивного баланса влияний, необходимо предположить, что реакция процесса x на это влияние должна привести к установлению нового стационарного состояния x^* , поддерживаемого внешним воздействием на процесс x . Для выполнения этого условия в ABC-методе внешнее влияние добавляется к аргументу базовой функции $F^{(+)}(x)$

$$\frac{dx}{dt} = x[1 - 2F^{(+)}(x - c)],$$

$$\frac{dx}{dt} = x[1 - 2(x - c)],$$

Представив последнее уравнение в конечных разностях по схеме Эйлера, находим

$$x(n) = 2x(n-1)\{1 - [x(n-1) - c]\}. \quad (6)$$

Результаты исследования сходимости решения при постоянных внешних воздействиях приведены на рис. 2.2.2, а - г.

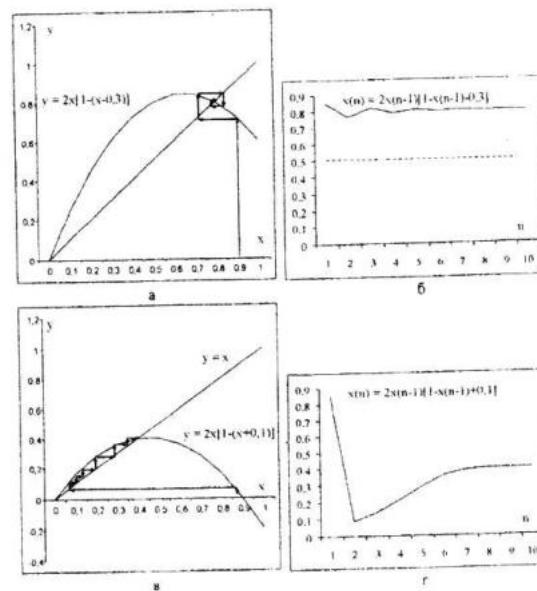


Рис. 1. Сходимость решения уравнения (6) к стационарному значению при постоянных внешних влияниях: (а) графики левой и правой частей уравнения при $c = 0,3$; (б) временной сценарий при $c = 0,3$; (в) графики левой и правой частей уравнения при $c = -0,1$; (г) временной сценарий при $c = -0,1$

Графики на рисунке 1,а показывают изменения значений левой и правой частей уравнения (6) с ростом переменной x . Левые части представляют прямая линия $y = x$, правые – парабола $y = 2x(1 - x)$. Так как при достижении решением уравнения стационарного состояния его левая и правая части должны стать равными друг другу, это условие выполняется в точке пересечения двух графиков. В процессе решения уравнения происходит быстрое стремление точки, изображающей решение, к аттрактору. Движение этой точки показывает последовательность стрелок на рис. 1, а. Результаты расчетов по формуле (6) приведены на рис. 1, б. Временной сценарий процесса решения, изображенный на этом рисунке, демонст-

рирует практическое достижение стационарного решения $x = 0,5$ уже на 6 – 8 итерациях.

Быстрая сходимость к равновесным состояниям позволяет предположить, что процесс x , представляемый уравнением ABC-метода, будет реагировать подобным же образом на переменное внешнее влияние $f(t)$, непрерывно меняя свое стационарное решение в соответствии с текущим значением этого влияния. Таким путем реализуется системный принцип адаптивной подстройки системного модуля к переменному внешнему воздействию. Модульное уравнение с переменным внешним влиянием принимает вид

$$\frac{dx}{dt} = x\{1 - 2[x - f(t)]\} \quad (7)$$

В качестве примера на рис. 2 показан процесс адаптации решения конечно-разностного варианта уравнения (7) к внешнему воздействию вида $f(t) = 0,25 \sin[0,3t - \cos(0,6t)]$. Уравнение отслеживает внешнее воздействие, отображая его на область значений процесса (0,1).

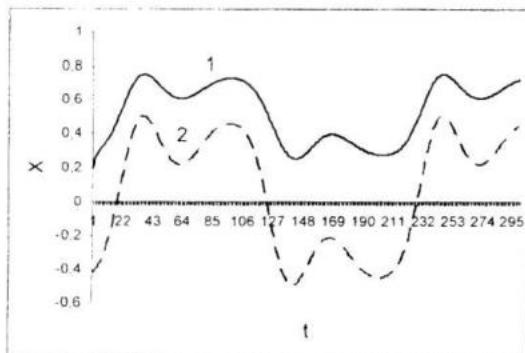


Рис.2. Адаптация решения уравнения (7) (кривая 1) к внешнему влиянию $f(t) = 0,25 \sin[0,3t - \cos(0,6t)]$ (кривая 2)

Рассмотренные выше основные свойства ABC-метода позволяют выписать общую систему уравнений для n взаимосвязанных процессов. В этом общем случае система динамических уравнений ее ABC-модели и ее конечно-разностная аппроксимация принимают следующий вид

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[1 - 2 \left(x_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} x_j - f_i \right) \right], \\ (i, j = 1, 2, \dots, n), (i \neq j). \quad (8)$$

$$x_{ik} = 2x_{ij} \left[1 - \left(x_{ij} - \sum_{m=1}^{n-1} a_{im} x_{mj} - f_{ij} \right) \right], \\ (i, m = 1, 2, \dots, n), (i \neq m), (k = j+1), \\ (j = 0, 1, 2, 3, \dots), t_k - t_j = 1 \quad (9)$$

Как показывают исследования [76, 23, 25], системы уравнений вида (8) при правильном выборе коэффициентов влияний обладают быстрой сходимостью к стационарным решениям. Несомненным достоинством ABC-моделей является простота перехода от концептуальной модели системы к ее формальному описанию. Кроме того, существуют различные методы экспертных оценок коэффициентов влияний, которые используются при построении моделей конкретных систем [1 – 3].

ABC-модель простейшей эколого-экономической системы. Рассмотрим в качестве примера два взаимосвязанных процесса развития в эколого-экономической системе. Будем считать, что экологическое состояние природной среды интегрально оценивается одним параметром x_1 , а экономическая рентабельность потребления природных ресурсов – параметром x_2 . Объединение процессов x_1 и x_2 в систему показано на рис. 3.



Рис. 3. Концептуальная модель простейшей эколого-экономической системы

В системе действует отрицательная обратная связь поскольку принято предположение о том, что повышение экономической рентабельности производства увеличивает потребление природных ресурсов, что негативно сказывается на экологическом состоянии природной среды. В

свою очередь, ухудшение экологического состояния тормозит рост экономической рентабельности производства.

ABC-модель этой экологической системы должна описывать динамический баланс влияний экономической и экологической частей этой системы друг на друга. Изменения баланса обусловлены двумя функциями внешних влияний: f_1 , представляющей природоохранные действия, и f_2 , учитывающей спрос на природные ресурсы

Весовые коэффициенты функций x_1 и x_2 отражают степени влияния каждого из процессов друг на друга. Будем считать, что влияние процесса x_2 на процесс x_1 может быть представлено зависимостью $x_1 = a_{12}x_2$, а обратное влияние – зависимостью $x_2 = a_{21}x_1$. Тогда в соответствии с ABC-методом динамическая модель эколого-экономической системы принимает следующий вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_1 [1 - 2(x_1 + a_{12}x_2 - f_1)], \quad (9)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = x_2 [1 - 2(x_2 - a_{21}x_1 - f_2)].$$

Объединение двух процессов в систему (9) дает эмерджентный эффект, заключающийся в адаптации процессов друг другу и к внешним воздействиям f_1 и f_2 . Система уравнений (9) устанавливает новые равновесные состояния для адаптированных процессов x_1 и x_2 .

Для иллюстрации адаптации процессов друг к другу построим сценарии x_1 и x_2 при отсутствии внешних влияний, т.е. когда $f_1 = f_2 = 0$. Степени влияний процессов друг на друга определим заданием коэффициентов модели: $a_{12} = -0,8$ и $a_{21} = 0,3$. Систему уравнений (2.13) представим в конечных разностях

$$x_{1k} = 2x_{1j} [1 - (x_{1j} - 0,8x_{2j})], \\ x_{2k} = 2x_{2j} [1 - (x_{2j} + 0,3x_{1j})], \quad (k = j+1), \\ (j = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (10)$$

Графики левых и правых частей уравнений системы (10) показаны на рис. 2.3.2, а.

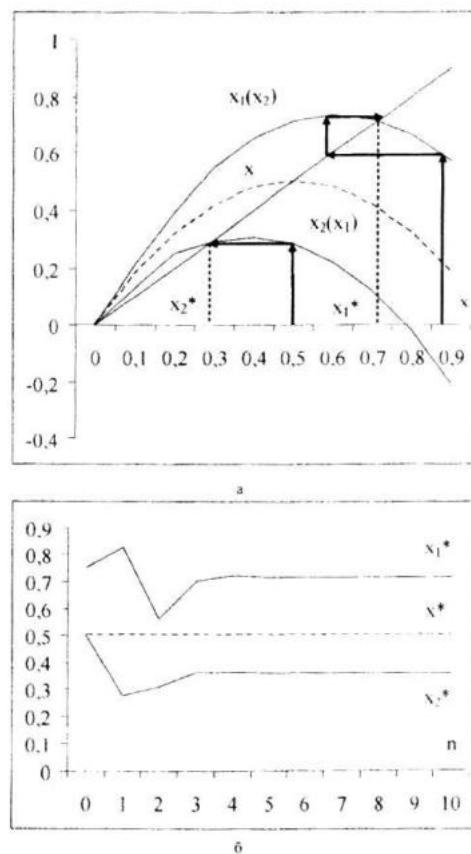


Рис. 4. Адаптация процессов x_1 и x_2 друг другу при коэффициентах влияний $a_{12} = -0,8$ и $a_{21} = 0,3$.

Эффекты взаимного влияния процессов выразились в смещении параболы правой части первого уравнения вверх, а второго уравнения – вниз от положения, которое они занимают в отсутствие влияний (изображено пунктиром). В процессе адаптации решения системы разностных уравнений (10) двигались к своим атTRACTорам по траекториям, показанным стрелками. На рис. 4, б приведены временные сценарии решений системы уравнений (10). При начальных условиях $x_{10} = 0,88$ и $x_{20} = 0,5$ оба процесса достигают своих стационарных значений $x_1^* = 0,725$ и $x_2^* = 0,282$ практически уже после 3–5 итераций.

Добавим в правые части уравнений модели функции внешних влияний, прогнозирующих эффективность природоохранных действий f_1 и спрос на природные ресурсы f_2

$$f_1 = 0,5 \sin[0,3t - \cos(0,6t)],$$

$$f_2 = \cos[0,5t + \sin(0,7t)],$$

с коэффициентами – 0,4 f_1 и 0,25 f_2 . Тогда уравнения (10) принимают вид

$$\begin{aligned} x_{1k} &= 2x_{1j} \left[1 - \left(\begin{array}{l} x_{1j} - 0,8x_{2j} + \\ 0,2 \sin[0,3t_j - \cos(0,6t_j)] \end{array} \right) \right] \\ t_k - t_j &= 1, (k = j+1), \\ x_{2k} &= 2x_{2j} \left[1 - \left(\begin{array}{l} x_{2j} + 0,3x_{1j} - \\ 0,25 \cos[0,5t_j + \sin(0,7t_j)] \end{array} \right) \right] \\ (j &= 0,1,2,3...) \end{aligned} \quad (11)$$

На рис. 5, а показаны графики функций внешних влияний f_1 и f_2 , а на рис. 2.4, б – результирующие сценарии x_1 и x_2 .

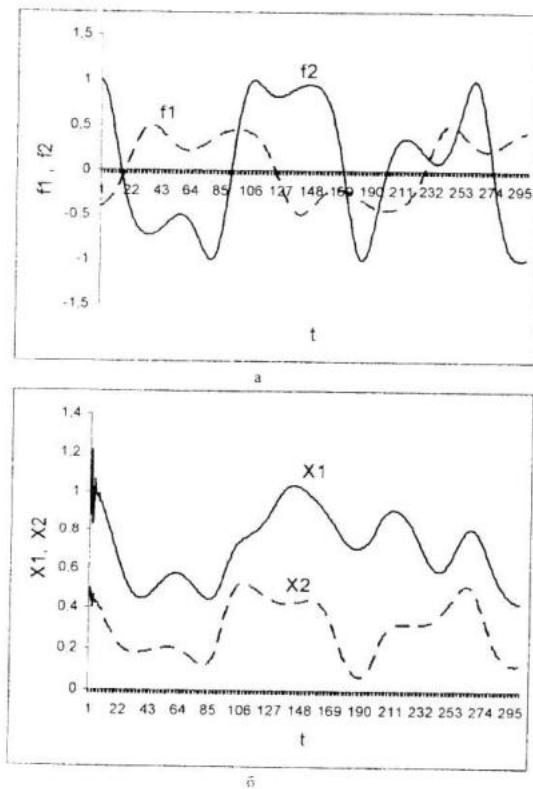


Рис. 5. Одновременная адаптация процессов x_1 и x_2 друг к другу и к внешним влияниям f_1 и f_2 : а) внешние влияния, б) результаты одновременной адаптации

В этом варианте модели эколого-экономический баланс потребления ресурсов достигается при условии, что интегральные индексы состояния каждой их

частей системы x_1 и x_2 должны одновременно адаптировать свои значения друг к другу и к внешним влияниям f_1 и f_2 . Если бы процессы в системе не влияли друг на друга, то следовало бы ожидать, что их сценарии будут похожими на сценарии приложенных к ним внешних воздействий. Учет взаимных связей между процессами x_1 и x_2 приводят к тому, что влияние природоохранной деятельности f_1 распространяется не только на экологическое состояние природной среды x_1 , но и на экономическую рентабельность производства x_2 . Аналогичная ситуация имеет место и по отношению к влиянию спроса f_2 на процесс x_2 и на процесс x_1 . Поэтому результирующие сценарии процессов заметно отличаются от приложенных к ним внешних воздействий. Следует ожидать, что это отличие будет возрастать по мере увеличения числа взаимосвязанных процессов, объединенных в структуру системы, и количества приложенных к ним внешних воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 224 с.
2. Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 527 с.
3. Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World, Irwin/McGraw-Hill. 1999. – 490 p.
4. Игумнова Е.М., Набойкина А.В., Тимченко И.Е., Тимченко И.И. Системное моделирование социальных эколого-экономических процессов. //Системы контроля окружающей среды / Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь, 2008. – С. 194 – 197.