

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ И МОДЕЛЕЙ КИНЕТИКИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АНАЛИЗЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Варшавский Л.Е.

В статье рассматриваются примеры использования методов теории управления и моделей физико-химических систем при исследовании экономических систем. Рассматриваются примеры применения стандартных методов теории управления к задачам исследования стратегий догоняющих экономических агентов, а также влияния санкций и импортозамещения на показатели рынка. Для анализа взаимосвязи между объемами исследований и разработок и патентной активностью используется модель кинетики ядерных реакторов. Приводятся примеры использования моделей динамических игр применительно к задачам анализа показателей рынка пассажирских авиаперевозок, прогнозирования динамики показателей рынка микропроцессоров, анализа влияния введения форвардного рынка на показатели развития рынка электроэнергии, исследования эволюции рынка высокотехнологичной продукции с догоняющим участником.

doi: 10.20537/mce2025econ04

Введение. В середине XX-го века было достигнуто понимание того, что методы исследования экономических процессов имеют много общего с методами теории управления (control theory), которая в основном ориентирована на исследование физико-технических систем. Однако в экономике ситуация сложнее из-за изменчивости режимов функционирования и параметров экономических систем.

Тем не менее, на начальной стадии прогнозирования экономических систем использование методов теории управления позволяет достаточно адекватно исследовать взаимодействие между различными показателями. При этом весьма полезными могут быть методы, не требующие сложных вычислительных процедур, и, в частности, методы операционного исчисления (z -преобразования), которые могут быть реализованы в электронных таблицах, широко используемых экономистами.

1. Примеры использования стандартных методов теории управления. Существуют 2 подхода к исследованию динамических систем.

1. В частотной области (frequency domain approach). Этот подход основан на использовании операционного исчисления (преобразования Лапласа, Фурье, Z-преобразования) для исследования систем с постоянными параметрами. Он обеспечивает упрощение расчетов за счет перехода к анализу алгебраических выражений (см. далее).

2. В пространстве состояний (state space approach). Подход основан на анализе свойств дифференциальных и разностных уравнений, описывающих систему.

Эти подходы взаимно дополняют друг друга.

Ниже вначале рассматриваются примеры использования первого подхода к исследованию стратегий догоняющих агентов и влиянию санкций на показатели рынка.

1.1. Моделирование динамики показателей догоняющих экономических агентов. Для того, чтобы безнадежно не отстать в гонке технологий в деглобализованном мире санкций, экономическим агентам и странам необходимо непрерывно отслеживать динамику мирового производства продукции и обеспечивать её выпуск в объемах, необходимых для потребителей. При этом в капиталоемких производствах особую важность приобретает проблема правильной оценки инвестиций. Для решения этой проблемы у догоняющих агентов есть некоторые преимущества перед инноваторами, так как они могут использовать данные о свойствах и динамике технико-экономических показателей производства уже выпускаемой инновационной продукции.

Для решения этой задачи нами предложен метод, основанный на использовании догоняющим экономическим агентом динамической зависимости, связывающей объемы товарного производства продукции Q_t со входной переменной u_t (инвестициями, оборудованием), в виде передаточной функции [1]:

$$Q_t = \frac{A(z)}{B(z)} u_t = W(z) u_t; z x_t = x_{t+1}. \quad (1)$$

Перед догоняющим агентом стоит, в частности, задача отслеживать необходимые для потребителей объемы продукции Q^* , (они могут быть связаны с объемами продукции передовых экономических агентов) и определять требуемые для её производства инвестиции. С этой целью он

может использовать различные виды отрицательной обратной связи, например:

$$u_t = R(z)(Q_t^* - Q_t); \quad (2)$$

или использование обобщенного закона обратной связи:

$$R(z)u_t = T(z)Q_t^* - S(z)Q_t \quad (3)$$

Задача состоит в нахождении значений параметров регулятора $R(z)$, $S(z)$, $T(z)$, обеспечивающего отслеживание показателя Q_t^* , в соответствии с задаваемой передаточной функцией $H(z)$:

$$Q_t = H(z)Q_t^* = \frac{M(z)}{N(z)}Q_t^* \quad (4)$$

Параметры регулятора определяются из следующего соотношения:

$$\frac{A(z)T(z)}{A(z)S(z) + R(z)B(z)} = \frac{M(z)}{N(z)} \quad (5)$$

Так, если, например:

$$W(z) = \frac{a_0 z + a_1}{(z - b_1)(z - b_2)}, \quad (1a)$$

и

$$H(z) = \frac{M(z)}{N(z)} = \frac{(1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2)z}{(z - \lambda_1)(z - \lambda_2)}, \quad (4a)$$

где λ_i задаются экспертным путём с целью обеспечения желаемой скорости достижения Q_t^* , причём $0 < \lambda_i < 1, i=1,2$, то в результате решения диофантовых уравнений можно показать, что управление (например, объём инвестиций) определяется следующим образом:

$$u_t = \frac{T(z)}{R(z)}Q_t^* - \frac{S(z)}{R(z)}Q_t = \frac{T_0}{(a_0 z + a_1)}Q_t^* - \frac{s_0 z + s_1}{(a_0 z + a_1)}Q_t, \quad (6)$$

где параметры T_0, s_0, s_1 определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} T_0 &= (1 - \lambda_1)(1 - \lambda_2); \\ R_0 &= 1; \\ s_0 &= (b_1 + b_2) - (\lambda_1 + \lambda_2); \\ s_1 &= \lambda_1 \lambda_2 - b_1 b_2 \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 1а,б представлена динамика объёмов производства и инвестиций в следящей системе с обобщенным регулятором при $b_1 = 1.00; b_2 = 0.374; \alpha_0 = 0.821; \alpha_1 = 0.771$ и при разных значениях $\lambda_1 > 0$, (принято, что $\lambda_2 = 0$),

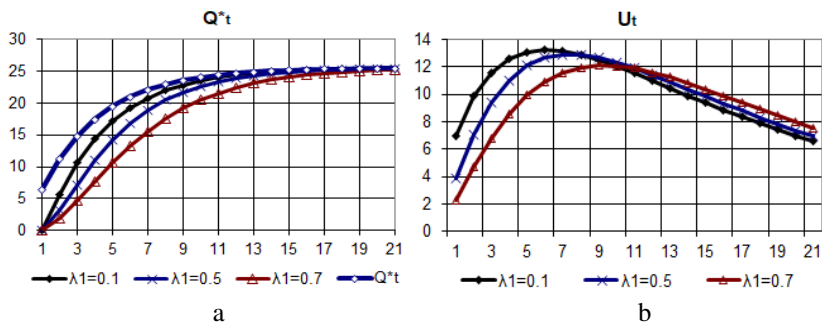


Рис.1. Динамика объёмов производства Q_t (а) и инвестиций U_t (б) при разных значениях λ_1 .

1.2. Моделирование влияния санкций и импортозамещения на показатели рынка. Ниже рассматривается подход к моделированию влияния санкций и импортозамещения на показатели рынков высокотехнологичной продукции [2]. В модели предполагается, что компания-производитель оборудования поставляет уникальное оборудование в компанию-производитель высокотехнологичной продукции (ВП), которая доминирует на рынке потребителей оборудования. Компания-производитель ВП, опасаясь нарушения поставок оборудования из-за введения всевозможных ограничений и санкций, за счёт отчислений от своей прибыли инвестирует в развитие импортозамещающего производства оборудования в третьей компании, которое может также найти применение на внешнем рынке.

При этом компания-производитель оборудования, ориентируясь на спрос компании-производителя ВП, максимизирует критерий:

$$J_1 = \sum_{i=0}^{\infty} \beta^t (p_t - PL_1) Q_{1t} - \frac{1}{2} \rho_1 I_{1t}^2 \rightarrow \max_{I_{1t}}, \quad (8)$$

где p_t — стоимость единицы оборудования, определяемая с помощью обратной функции спроса

$$p_t = a - b(Q_{1t} + (1 - v)Q_{3t}), \quad (9)$$

Другие соотношения, использованные в модели, имеют следующий вид [2]:

$$Q_{1t} = W_1(z)I_{1t} + Q_{10t}, \quad (10)$$

$$Q_{3t} = W_3(z)m_2\gamma_2Q_{2t}, \quad (11)$$

$$\text{Re } v_{2t} = Q_{2t} = W_2(z)(Q_{1t} + vQ_{3t}) + Q_{20t}, \quad (12)$$

где Q_{it} , $i = 1, 2, 3$ — объёмы производства в компаниях производителе оборудования, ВП, и импортозамещающего оборудования, Q_{i0t} , $i = 1, 2$ — объёмы производства в компаниях, связанные с инвестициями и оборудованием, введенными и поставленными до периода прогнозирования

(они характеризуют вклад начальных условий), $W_i(z) = \frac{\Phi_i z}{(z - \lambda_i)^2}$ — соот-

ветствующие передаточные функции, m_2 — доля инвестиций, на развитие производства импортозамещающей компании, в прибыли компании-производителя ВП, γ_2 — доля прибыли в доходах этой компании, v — доля оборудования импортозамещающей компании, поставляемого в компанию-производитель (ВП).

Анализировалось влияние на показатели условного рынка следующих факторов и действий: 1) степени инерционности процессов разработки и развития производства в компании; 2) доли оборудования импортозамещающей компании, поставляемого в компанию-производитель (ВП); 3) санкций (общих и выборочных) на поставку оборудования в компанию-производитель ВП, а также блокирования процесса импортозамещения в третьей компании со стороны первой компании.

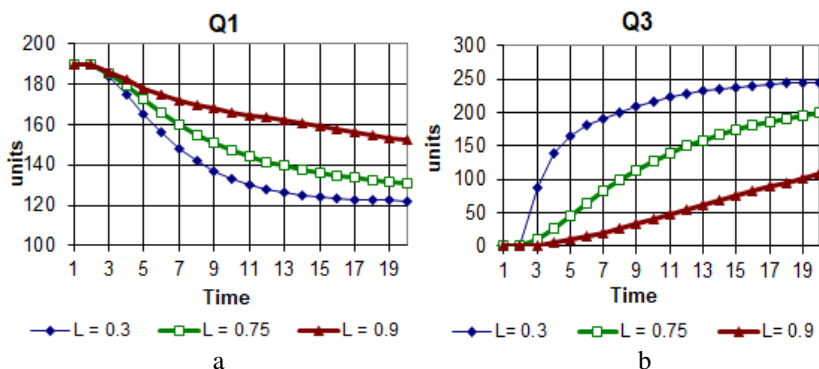


Рис. 2. Влияние значений параметров $L = \lambda_1 = \lambda_3$ на динамику производства оборудования в первой Q_1 (a) и третьей Q_3 (b) компаниях.

На рис.2 представлена динамика производства оборудования в первой и третьей компаниях при разных значениях параметра, $\lambda_1 = \lambda_3$, характеризующего инерционность процессов разработки и развития производства оборудования в компаниях. При ускорении процессов разработки и развития производства оборудования (это отражается в уменьшении параметров $\lambda_1 = \lambda_3$) существенно повышается объём производства импортозамещающей компании, пользующейся поддержкой государства, и одновременно уменьшается объём производства первой компании.

Проведенные расчёты показывают также, что увеличение доли оборудования импортозамещающей компании, потребляемой второй компанией, может приводить к резкому росту объёмов производства во второй и третьей компаниях, а также к стабилизации объёмов производства в первой компании.

2. Агрегированная модель взаимосвязи динамики макроэкономических показателей.

В построенной в [3] агрегированной макромодели экономики США использовались балансовое соотношение, связывающее ВВП (Y_t), конечное потребление (C_t), валовые инвестиции (I_t), государственные

расходы G_t , а также нетто-экспорт т.е. разница между экспортом Exp_t и импортом Im_t : $NE_t = Exp_t - Im_t$,

$$Y_t = C_t + I_t + G_t + NE_t, \quad (13)$$

а также лаговые зависимости, связывающие инвестиции с ВВП и ставку процента Федерального резерва fed_t с инвестициями:

$$Y_t = W_Y(z)I_t = \frac{b_Y z^2}{(z - \lambda_Y)^2} I_t; \quad (14)$$

$$I_t = \frac{b_{I0}z + b_{I1}}{(z - \lambda_I)^2} fed_t + \frac{d_I}{(z - \lambda_I)^2}$$

(b_{Yk}, b_{Ik}, d_I — постоянные параметры).

Операторные соотношения (14) можно представить в пространстве состояний:

$$X_{t+1} = AX_t + Bu_t \quad (15)$$

где $u_t = b_{I0}fed_t + d_I$; $X_t = (x_{1t}, x_{2t}, x_{3t}, x_{4t})' = (I_{t-1}, I_t, Y_{t-1}, Y_t)'$.

Исходной переменной для расчетов ключевых макроэкономических показателей является целевой темп прироста ВВП. Входными переменными в (15), обеспечивающими целевой темп прироста ВВП y^* , являются u_t и fed_t .

Для решения рассматриваемой обратной задачи удобно использовать формулу Акермана, которую также можно реализовать в электронных таблицах. Эта формула позволяет вычислить ставку процента fed_t в функции от объема ВВП и инвестиций (в форме обратной связи):

$$u_t = -gX_t, \quad (16)$$

$$g = (0 \ 0 \dots 1) \Omega_c^{-1} F(A)$$

где $\Omega_c = [B \ AB \dots AB^{n-1}]$ — матрица управляемости, n — размерность вектора X_t , $F(A)$ — матричный многочлен

$$F(A) = A^n + s_{n-1}A^{n-1} + \dots + s_0I, \quad (17)$$

коэффициенты которого соответствуют коэффициентам характеристического многочлена системы с обратной связью с матрицей $A_1 = A - Bg$:

$$\det(zI - A) = f(z) = z^n + s_{n-1}z^{n-1} + \dots + s_0 \quad (17.1)$$

одним из характеристических корней которого является желаемый темп роста ВВП — $\lambda_1^* = 1 + y^*$. Например, если $1 + y^* = 1.03$; $n = 4$, то $s_i, i = 0, 1, 2, 3$ могут соответствовать значениям корней

$\{\lambda_i^*\} = (1.03 : 0.3 : 0.1 : 0.1)$. Значения остальных корней, которые должны быть в диапазоне $0 < \lambda_i < 1$, $i=2,3,4$ влияют на динамику приближения показателей в начальный (переходный) период.

После определения n компонентов вектора X_i , из (15), вычисляются остальные ключевые макроэкономические показатели. Данный подход, не требующий решения уравнений Риккати, может быть эффективно реализован с использованием электронных таблиц.

3. Анализ и прогнозирование показателей распространения новых технологий на основе физико-химических моделей. Динамика поведения экономических систем может иметь много общего с динамикой физико-химических и биологических систем. Так, при некоторых условиях, процессы конкуренции в этих системах (конкуренция фирм, конкуренция химических компонентов, конкуренция биологических видов) описываются аналогичными или близкими по форме моделями.

Ниже рассматриваются модели некоторых экономических систем, близкие к моделям динамики концентрации конкурирующих компонентов, а также с моделью кинетики ядерного реактора [4].

3.1. Конкуренция на рынке однородной продукции фирм, ориентированных на максимально возможный рост. В рассматриваемой ниже модели предполагается, что стратегия участников рынка однородной продукции (фирм) состоит в инвестировании всей получаемой прибыли в развитие производства. Предполагается линейная зависимость объемов производства $Q_i(t)$ в момент t от стоимости основного капитала $K_i(t)$, т.е. $Q_i(t) = g_i \cdot K_i(t)$, где g_i — капиталоотдача, $i=1,2,\dots,N$, N — число участников рынка (фирм). Тогда динамика основного капитала i -й фирмы описывается следующим уравнением [3]:

$$\frac{dK_i}{dt} = f_i K_i [p(Q) - c_i], \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (18)$$

где $p(Q)$ — обратная функция спроса, характеризующая связь между ценой продукта и суммарным объемом его выпуска $Q(t) = \sum_{i=1}^N Q_i(t)$ (предполагается, что она является монотонно убывающей функцией $Q(t)$), $f_i = (1 - tax) \cdot g_i$, tax — ставка налога на прибыль, c_i — операционные затраты в расчете на единицу выпускаемой продукции (для упрощения

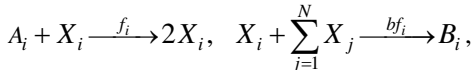
записи величина отношения коэффициента выбытия фондов к f_i включена в c_i).

В случае равенства капиталотдачи всех участников рынка, т.е. при $f_i = f_j = \text{const}$, $i = 1, 2, \dots, N$, из (3) можно получить замкнутые выражения для расчета величин рыночных долей s_i :

$$s_i(t) = \frac{s_{i0} \exp\{f_i(c_N - c_i)t\}}{\sum_{j=1}^N s_{j0} \exp\{f_j(c_N - c_j)t\}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

(s_{i0} — начальные значения рыночных долей фирм) практически совпадающие с выражениями, описывающими динамику концентрации конкурирующих компонентов в ряде физико-химических процессов, в частности в процессе производства и разрушения неорганических веществ.

Если, например, обратная функция спроса линейна, т.е. $p(Q) = a - b \sum_{i=1}^N Q_i$, то модель (18) идентична модели, описывающей неорганические конкурентные реакции, или модели автокатализа [1,2] типа:



кинетика которых описывается уравнением:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(a - c_i)x_i - bf_i x_i \sum_{j=1}^N x_j, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (18a)$$

3.2. Использование уравнения кинетики ядерного реактора. Дискретный вариант упрощенной одногрупповой модели кинетики ядерного реактора [4], описывающей динамику числа мгновенных нейтронов P_t и продуктов деления S_t , являющихся источником запаздывающих нейтронов, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} P_{t+1} &= (1 + u_t - \beta)P_t + \lambda S_t; \\ S_{t+1} &= \beta P_t + (1 - \lambda)S_t, \end{aligned} \quad (20)$$

где u_t — управление (реактивность), λ , β — коэффициенты модели, $0 < \lambda$, $\beta \leq 1$; $t = 1, 2, \dots, T$ (далее T — период прогнозирования). При $u_t > 0$ система (5) является неустойчивой. Это нетрудно показать, используя метод фазовой плоскости, а в случае постоянства $u_t = u > 0$ — критерий устойчивости дискретных систем, предложенный Джури [4].

Варианты данной модели могут быть использованы при исследовании динамики взаимосвязи между показателями распространения новых технологий, рациональной динамики структуры затрат на исследования и разработки, при остро стоящей в настоящее время проблеме оценки влияния различных природоохранных мероприятий на динамику отходов производств, при моделировании динамики социологических процессов, а также при решении ряда других социально-экономических проблем [4].

В отличие от логистической модели или модели Басса, модель типа (20) позволяет анализировать и формировать прогнозные сценарии распространения и развития сразу нескольких (в случае одногрупповой модели — двух взаимосвязанных или конкурирующих технологий и процессов). В частности, на ее основе можно исследовать взаимосвязь между объемами финансирования исследований и разработок (R&D) и патентной активностью. Например, применительно к США, в качестве P_t могут выступать общие расходы в стране на R&D, а в качестве S_t — число подаваемых патентов (Utility Patent Applications). Тогда коэффициенты модели можно интерпретировать следующим образом: u_t — средний темп прироста финансирования планируемых R&D, первоначально не связанных с поданными патентами предыдущего года; β — доля завершенных R&D, влияющих на патентную активность; λ — доля поданных патентов предыдущего года, стимулирующих проведение новых R&D.

Оценки, полученные на основе данных статистики США, позволяют сделать вывод о значительном стимулирующем влиянии патентной активности на общий объем R&D ($\lambda = 0.495$). Несомненно слабее относительное влияние объемов финансирования завершенных R&D на патентную активность ($\beta = 0.323$). Последнее связано с тем, что часть подаваемых патентов создается вне научно-технического сектора.

На основе модели (20) можно также проводить сценарные расчеты динамики одного из показателей (объема R&D — P_t), обеспечивающей вывод другого показателя (числа патентов) на заданную траекторию [4].

4. Методы теории динамических игр для анализа и прогнозирования показателей рынков. Значительная часть рынков высокотехнологичной продукции функционирует в условиях *олигополии*. Так, олигополистическими рынками являются, например, рынки авиационной техники, аппаратных средств информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), включая микрозлектронную продукцию, продукции энергетического машиностроения и др.

В зависимости от конкретных рыночных условий задача формирования стратегий крупных фирм может состоять в определении равновесия динамической игры по Нэшу-Курно, по Бертрану (в случае олигополий), по Штакельбергу или по Форхаймеру (в случае частичных олигополий или монополий, см. [5]). Наиболее распространенный подход к моделированию поведения участников реальных олигополистических рынков связан с использованием линейных динамических игр с квадратичными критериями (см., например, [6]–[12]).

В работах [6]–[10] использовалась агрегированная динамическая модели рационального поведения участников олигополии в виде линейной динамической игры по Нэшу-Курно с квадратичным критерием, в которой участвуют N фирм-олигополистов.

Центральным блоком модели является зависимость, связывающая объемы производства Q_{it} со входной переменной u_{it} (в зависимости от решаемой задачи инвестициями в основной капитал или вводом мощностей), i — индекс фирмы, $i = 1, 2, \dots, N$:

$$Q_{it} = W_i(z) u_{it} = \frac{B_i(z)}{A_i(z)} u_{it} + Q_{0it}, \quad (21)$$

где $W_i(z) = B_i(z)/A_i(z)$ — передаточная функция, причем $A_i(z)$, $B_i(z)$ — полиномы относительно переменной z , представляющей собой оператор сдвига: $zx_t = x_{t+1}$, Q_{0it} — слагаемое, характеризующее начальные условия. Другой блок модели — обратная функция (оператор) спроса. В модели предполагается баланс суммарного спроса D_t и предложения Q_t , т.е. $D_t = Q_t = \sum_{i=1}^N Q_{it}$ и линейная зависимость цены на рынке p_t от объема спроса:

$$p_t = a - bD_t + d\xi_t = a - bQ_t + d\xi_t, \quad (22)$$

где ξ_t — экзогенная переменная (например, темп прироста ВВП), Q_{Ft} — суммарный объем производства малых компаний-ценополучателей, a , b , d — параметры.

Предполагается, что олигополисты используют скользящее планирование и в каждый момент времени τ максимизируют чистую текущую стоимость (NPV):

$$J_{\tau i} = \sum_{t=\tau}^{\tau+T_p} \beta^t [(p_t - c_i)Q_{it} - q_i u_{it} - \frac{1}{2} \rho_i u_{it}^2] \rightarrow \max_{u_{it}} \quad (23)$$

где: $\beta = 1/(1+r)$ — дисконтирующий множитель, соответствующий ставке дисконтирования r ; p_i — цена продукции; c_i — средние производственные издержки (без амортизации); q_i — стоимость единицы мощностей; $\frac{1}{2}\rho_i u_i^2$ — затраты регулирования (adjustment costs) (см., например, [6], причем ρ_i — коэффициент, характеризующий инвестиционные возможности олигополистов, $i = 1, 2, \dots, N$; T_p — период скользящего планирования (для упрощения записи формул ставки налогов приняты равными нулю). Управляющими переменными в модели являются инвестиции в основной капитал или вводы мощностей u_i , $i = 1, 2, \dots, N$.

Ниже приведены некоторые примеры исследования рынков с использованием моделей динамических игр.

4.1. Анализ показателей рынка пассажирских авиаперевозок США. На основе модели (21)–(23) в [9] проводились оценки экономических показателей условного рынка пассажирских авиаперевозок, близкого к рынку США (цены, объёмов пассажирооборота, спроса на самолеты) на 15-летний период при различных вариантах стоимости и топливной экономичности новой техники, доступности инвестиций, а также сложившейся структуры рынка. Особое внимание уделялось анализу динамики спроса на новый самолет со стороны нового участника рынка, а также анализу динамики его рыночной доли.

Исследование показало, что чем менее монополизирован рынок, тем больше спрос на новую экономичную технику (с меньшим расходом топлива) может быть достигнут за счет вхождения на рынок новых участников. Увеличение числа олигополистов за счет вхождения на рынок сразу нескольких новых участников, с одинаковой эффективностью эксплуатирующих новый эффективный узкофюзеляжный самолет, приводит к повышению объёмов спроса на новую технику.

4.2. Прогнозирование динамики показателей рынка микропроцессоров на среднесрочный период. В работе [10] в результате решения игровой задачи типа (21)–(23) построены разомкнутые (open-loop) оптимальные по Нэшу-Курно стратегии компаний-производителей микропроцессоров x86 (Intel и AMD) и соответствующие им ключевые показатели дуопольного рынка микропроцессоров x86 для персональных компьютеров (PC). Для большинства сценариев проведенные расчеты показали стабилизацию или уменьшение объёмов суммарного производства

рассматриваемых процессоров для PC. Расчёты показали, что средняя цена микропроцессоров x86 при всех сценариях должна была быть ниже, чем в 2015 г., а рыночная доля компании AMD в большинстве сценариев могла быть несколько выше, чем в базовом 2015 г.

Особое внимание уделено исследованию перспективной структуры рынка микропроцессоров для серверов (с архитектурой x86 и ARM), т.к. с этим сегментом в середине 2010–х гг. связывались наиболее актуальные для производителей и потребителей направления инновационного развития. Проведенные расчеты показали, что расширение числа новых компаний, обладающих значительными инвестиционными возможностями, позволило бы уже к началу 2020–х гг. существенно повысить рыночную долю микропроцессоров ARM.

4.3. Анализ влияния введения форвардного рынка электроэнергии на показатели развития АЭС. В статье [11] проводится динамический анализ условий и перспектив роста мощностей новых атомных энергоблоков (работающих в базовом режиме и характеризующихся высокими капиталовложениями), которые могут открываться при создании форвардного рынка электроэнергии. Рассматривается рынок с дифференцированным продуктом, в качестве которого выступает электроэнергия с источников пиковой и полупиковой мощности, генерируемая в N_s энергокомпаниях (газотурбинные установки (ГТУ) и электростанции на основе возобновляемых источников), а также с источников базовой мощности (АЭС, угольные ТЭС), генерируемая в N_f энергокомпаниях, причём $N=N_s+N_f$.

Предполагается, что компании первой группы участвуют на спотовом рынке. Компании-производители базовой энергии являются участниками форвардного рынка. В рассматриваемой постановке, в соответствии с терминологией теории игр (отраслевых рынков), участники форвардного рынка относятся к группе олигополистов-лидеров, а спотового рынка — к группе последователей. В работе показано, что с позиций развития мощностей крупномасштабной энергетики введение форвардного рынка может оказаться тем более эффективным, чем сильнее взаимовлияние объемов производства одного продукта на цену другого и чем выше уровень концентрации производства базовой электроэнергии. Вместе с тем, проведенные расчеты при значениях параметров модели, примерно соответствующих агрегированным показателям деятельности двух групп электростанций США, показывают, что введение лишь форвардного рынка может не обеспечивать значительного выигрыша с позиций

стимулирования инвестиционной активности в крупномасштабной энергетике в обозримой перспективе.

4.4. Исследование эволюции рынка высокотехнологичной продукции с догоняющим участником. Рассматривалась модель квадрополии (4 олигополиста) с одним догоняющим участником [12]. Параметры модели исследовавшейся олигополии близки к параметрам ведущих фирм-производителей рынка полупроводниковых пластин (foundries).

Исследовались:

1. влияние скорости освоения производства догоняющим участником рынка (характеризующейся значением параметра λ_{N+1});
2. влияние показателей эффективности лидера на динамику его производства;
3. эффективности противодействия лидера повышению рыночной доли догоняющего участника.

На рис. 3а, 3б приведена расчетная динамика объемов производства компании-лидера и догоняющего участника при разных значениях параметра $L = \lambda_{N+1}$.

Выводы.

1. Рассмотренный подход к моделированию динамики показателей догоняющих экономических агентов, основанный на результатах теории следящих систем, позволяет проводить оценку производственных инвестиций догоняющих экономических агентов в режиме реального времени. Он обеспечивает приемлемую для прогнозирования робастность и точность отслеживания экономических показателей производства.

2. Предложенный подход к моделированию процессов импортозамещения позволяет исследовать влияние скорости и масштабов импортозамещения, санкций на поставки оборудования, а также блокирования инвестиций в импортозамещение на динамику показателей условного рынка высокотехнологичной продукции. Одно из важных достоинств этого подхода состоит в возможности проведения качественного анализа поведения рынков, основанного на использовании достаточно простых методов операционного исчисления (z -преобразования), до выполнения детальных расчётов.

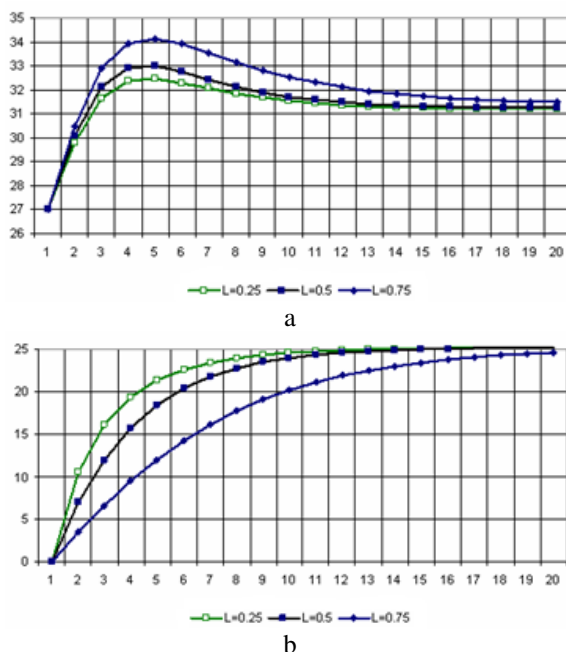


Рис.3. Динамика объемов производства компании-лидера (а) и догоняющего участника (б) при разных значениях параметра $L = \lambda_{N+1}$.

3. Рассмотренный подход к расчету динамики макроэкономических показателей, основанный на использовании формулы Аккермана, позволяет проводить достаточно адекватно исследовать взаимодействие между различными показателями на начальной стадии исследований. На последующих стадиях исследований следует разработать методы учёта неопределённости при прогнозировании динамики макроэкономических показателей.

4. Достоинством рассмотренных в пп. 2.1–2.3 подходов является то, что они могут быть реализованы на основе электронных таблиц, широко используемых специалистами различного профиля.

5. Проведенное исследование иллюстрирует общность в описании явлений в физико-химических и экономических системах. В ряде случаев процессы конкуренции фирм, ориентированных на максимально

возможный рост, и процессы производства и разрушения неорганических веществ могут описываться близкими по виду уравнениями. Варианты модели кинетики ядерных реакторов могут использоваться при анализе и прогнозировании широкого круга экономических процессов.

5. Использование линейных динамических игр с квадратичным критерием позволяет провести содержательный анализ стратегий высокотехнологичных компаний и разработать сценарии и прогнозы динамики показателей олигополистических рынков высокотехнологичной продукции. Они могут найти применение при формировании предложений по созданию структуры формирующихся рынков, по государственной политике стимулирования инвестиционной деятельности, а также по антимонопольной политике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варшавский Л.Е.* Исследование эволюции рынка высокотехнологичной продукции с догоняющим участником // Теория и практика институциональных преобразований в России» / Ерзнкян Б.Г. (ред.). М.: ЦЭМИ РАН. 2022. Вып. 53, с. 61–70.
2. *Варшавский Л. Е.* Моделирование влияния санкций и импортозамещения на показатели рынка// *Компьютерные исследования и моделирование*, 2025. Т.17. № 2. С. 365–380.
3. *Варшавский Л.Е.* Методы расчета устойчивой динамики макроэкономических показателей // Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. 2024. Выпуск 31. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». С. 47–59.
4. *Варшавский Л.Е.* Анализ и прогнозирование показателей распространения новых технологий на основе физико-химических моделей. Анализ и моделирование экономических и социальных процессов / Математика. Компьютер. Образование: Сб. научн. трудов. 2021. Выпуск 28. – М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».
5. *Варшавский Л. Е.* Исследование инвестиционных стратегий фирм на рынках капиталов- и наукоемкой продукции (производственные мощности, цены, технологические изменения). М.: ЦЭМИ РАН. 2003.
6. *Варшавский Л.Е.* Использование методов теории управления для формирования рыночных структур // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2014. Т.6. №5. С.839–859.
7. *Варшавский Л.Е.* Техника проведения расчетов динамики показателей олигополистических рынков на основе операционного исчисления // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2019. №5, т. 11. С. 261–276.

8. Варшавский Л. Е. Исследование влияния рыночной структуры на динамику показателей олигополистического рынка // *Экономика и математические методы*. 2007. № 4. С. 80–88.
9. Варшавский Л. Е. Методологические основы моделирования развития олигополистических рынков продукции с длительным жизненным циклом (на примере рынка гражданской авиационной техники) // *Прикладная экономика*. 2010. № 4. с. 53–74.
10. Варшавский Л.Е. Моделирование динамики ключевых показателей рынков компонентов высокопроизводительных вычислительных систем // *Труды Института системного анализа Российской академии наук*. 2017. Т. 67. №1. С. 12–27.
11. Варшавский Л.Е. Прогнозирование динамики показателей олигополистических рынков высокотехнологичных производств с использованием методов операционного исчисления / *Труды Института системного анализа*. 2019. Выпуск 2, Том 69. С. 3–16.
12. Варшавский Л.Е. Социально-экономические проблемы развития информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). М.: ЦЭМИ РАН, 2022.

USING METHODS OF CONTROL THEORY AND MODELS OF KINETICS OF PHYSICOCHEMICAL PROCESSES IN ANALYSIS AND FORECASTING THE DEVELOPMENT OF ECONOMIC SYSTEMS

Varshavsky L.E.

The article considers examples of using control theory methods and models of physical and chemical systems in studying economic systems. Examples of applying standard control theory methods to problems of studying strategies of catching-up economic agents, as well as the impact of sanctions and import substitution on market indicators are considered. A model of nuclear reactor kinetics is used to analyze the relationship between research and development volumes and patent activity. Examples of using dynamic game models are given in relation to problems of analyzing indicators of the passenger air transportation market, forecasting the dynamics of microprocessor market indicators, analyzing the impact of introducing a forward market on indicators of electricity market development, and studying the evolution of the high-tech products market with a catching-up participant.