УДК 330.115:681.5

С. К. Рамазанов, доктор технических наук, доктор экономических наук, профессор;
М. Д. Аптекарь, кандидат химических наук, профессор
Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина

МОДЕЛИ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

Разработаны комплекс моделей и система инструментов эколого-экономического управления на основе новой концепции, принципов, методологии создания интегрированной системы эколого-экономического мониторинга, моделирования и управления техногенным промышленным предприятием.

Ключевые слова: техногенное промышленное предприятие, производственная система, эколого-экономическое управление, экономико-математическое моделирование, комплекс моделей, системный анализ, интеллектуализация, интеграция, нестабильность, неопределенность, принципы «НЕ-» и «МНОГО-»факторного анализа и синтеза

Введение. Разработка и исследование моделей и систем инновационных и информационных инструментов эколого-экономического управления (ЭЭУ) на основе соответствующей интеграции и интеллектуализации подсистем и процессом ЭЭУ в современных условиях кризисов, нестабильностей и рисков является достаточно актуальной проблемой. Она согласовывается с триединой концепцией устойчивого эколого-социально-экономического развития и построения интегральной модели «экологической экономики» и «экономики знаний», т. е. модели «разумного общества», являющегося высшей формой развития общества, основанного на знаниях. При этом необходимо разработать интегрированную интеллектуальную систему эколого-экономического мониторинга, моделирования, управления и принятия эколого-экономических решений. Для этого создан соответствующий инструментарий [1–5], а именно: концепции, принципы, методологии создания интегрированной системы эколого-экономического мониторинга, моделирования и управления (СЭЭМУ); комплекс моделей и системы информационных технологий для СЭЭМУ; система мониторинга (анализ, обработка, моделирование и прогнозирование состояния экологических сред в зоне техногенного промышленного предприятия – ТПП); комплекс локальных и обобщенных критериев оптимизации и управления для всего производственно-транспортного комплекса ТПП, а также получены оценки эффективности реализации и перспективы развития СЭЭМУ.

Основные результаты исследований. Результатом работы в целом является созданная интегрированная интеллектуальная компьютеризованная система эколого-экономического мониторинга, моделирования и управления ТПП (производственно-экономической системой, которая представлена в виде 3-уровненной структуры) в условиях нестабильной среды, т. е. предложена некоторая новая парадигма управления сложными системами и процессами в условиях нестабильности. Система разработана на основе следующих результатов: концепции, принципы, комплекс нелинейных моделей (около 30 как интегральных, так и локальных моделей, которые образуют математическую базу системы), методы принятия решений и ЭЭУ; интегральные критерии (экономические, экологические,

© Рамазанов С. К., Аптекарь М. Д., 2010

технологические, транспортные и др.); на идеи «5-полюсника» с интегральной моделью управления социально-экономических систем кортеж факторов: <Эк, Эл, Сц, КД; S, IT; I > как эндогенных, так и экзогенных и с двумя выходами: «полезный» и «вредный»; на основе учета смешанной информационной базы: детерминированной, стохастической, множественной и нечеткой информации для проблем ЭЭМУ ТПП и др.

Разработанная система построена на основе следующих принципов: принципов системного и междисциплинарного подхода, принципа 4-х «И», т. е. принципов с максимальной интеграцией, интеллектуализацией, индивидуализацией и единой информационной базой, принципа учета «НЕ»-факторного (т. е. учет нелинейности, нестабильности, нестационарности, неопределенности, нечеткости, недетерминированности, негауссовости и др.) и «МНОГО»-факторного (т. е. учет многомерности, многокритериальности, многофакторности, многопараметричности и т. п.) анализа и синтеза, принципа максимальной экологизации производственно-транспортных процессов и принципов моделирования сложных систем, т. е. система построена на основе концепции и принципов «4-х „И“ + 2») [1–5].

При этом основными направлениями интеграции подсистем в системе «Х» являются следующие: интеграция баз данных и знаний и создание единого банка данных с распределенной обработкой; техническая интеграция и создание неоднородной локальной информационно-компьютерной сети АРМ и рабочих станций; математическая, алгоритмическая и программная интеграция по уровням иерархии. Направлениями и уровнями интеллектуализации в системе являются: интеллектуализация автоматизированных рабочих мест всех уровней; интеллектуализация регуляторов на основе активных экспертных систем со смешанной базой знаний, в том числе с нечеткой базой; интеллектуализация интерфейсов программных пакетов системы; интеллектуализация задач проектирования систем контроля и диагностирования техногенных промышленных объектов.

Основные методы использованные при разработке СЭЭМУ являются методы теории построения систем информационных технологий и концепция «4-х „И“+2», методы современной теории управления и принятия решений, в том числе теория компьютерного моделирования сложных систем, робастное, гарантированное, адаптивное и интеллектуальное управление, методы и языки описания сложной неопределенной информационной обстановки, в том числе расплывчатых данных и знаний, методы, учитывающие «НЕ-факторы» и «МНОГО-факторы», методы «мягкого» моделирования и др.

В данной статье представлен обзор моделей ЭЭМУ ТПП (с краткими комментариями), полученные в последние годы [1–5].

Концептуальную модель эколого-экономического управления производственной системой в условиях наличия «НЕ- и МНОГО-факторов» можно представить в виде теоретико-множественной модели как кортеж: $\langle X, Y, F, H, G, K, \Omega, R, U, E, T\rangle$, где $Y = \langle Y^{\text{экн}}, Y^{\text{экл}}\rangle$ – общий выход ТПП, причем $Y^{\text{экн}}$ – продуктивное множество (т. е. «полезный выход»), а $Y^{\text{экл}}$ – множество загрязнений (т. е. «вредный выход»); X – множество возможных состояний ТПП; $F = \langle F^{\text{экн}},\ F^{\text{экл}}\rangle$ – модельное отображение ТПП; $H = \langle H^{\text{экн}},\ H^{\text{экл}}\rangle$ – общий опе-

ратор наблюдений (измерений); G – целевое множество; K – обобщенный ЭЭК; Ω – множество ограничений; R – ресурсное множество (т. е. основной контролируемый вход ТПП); $U = \langle U^{\text{экн}}, U^{\text{экл}} \rangle$ – множество ЭЭУ (управляющих воздействий); E – множество неопределенных возмущений (как внешних, так и внутренних, т. е. как аддитивных, так и мультипликативных), в частности, это множество стохастической, нечеткой, множественной или смешанной неопределенности; T – временной интервал функционирования и развития ТПП. Обозначения «экн» и «экл» – означают соответственно экономическая и экологическая переменная.

Задача ЭЭУ ТПП состоит в определении эффективного интегрального вектора управления $U = \langle U^{\text{экн}}, U^{\text{экл}} \rangle$ на основании динамической эколого-экономической модели ТПП, обеспечивающей достижение цели G при заданном обобщенном эколого-экономическом критерии K и ограничениях Ω с учетом условий неопределенностей и рисков.

Обобщенная синергетическая модель управления динамикой нелинейной ЭЭС с учетом стохастичности и хаотичности поведения может быть представлена в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\partial x_i / \partial t = \left[\lambda_i \xi_i(t) x_i(t) \left[X^0 \pm \sum_{j=1}^{n} a_{ij}(t) \prod_{k=1}^{j} x_k(t) \right] + \sum_{l=1}^{3} d_{il} \frac{\partial^2 x_i}{\partial r_l^2} + w_i \right] + b_i u_i(t),\ i = \overline{1,n},$$

$$\bar{x}_i(0) = x_{i0}. \qquad (1)$$

$X(t,r) = (x_1(t,r),\ x_2(t,r),\ ...,\ x_n(t,r))$ – вектор эколого-экономических и социальных переменных, т. е. вектор состояния эколого-экономической системы (в частности, ТПП), причем $\{x_{i0}\}$ – координаты вектора начальных состояний; $\langle \xi_i, w_i \rangle$ – стохастические (мультипликативно-аддитивные) возмущающие составляющие модели; $\{a_{ij}(t)\}$ – элементы матрицы, определяющие нестационарные составляющие модели; $\{u_i(t)\}$ – координаты вектора управляющих воздействий; $\{b_i(t)\}$ – коэффициенты вектора управления; $\{d_{il}\}$ – коэффициенты диффузии, т. е. коэффициенты, учитывающие эффект распространения (распределения); X^0 – предельная величина n-мерного вектора $X(t,r)$, причем r – 3-мерный вектор; λ_i – параметры, которые обуславливают хаотичность поведения системы.

В частности, данную модель можно представить и как систему уравнений вида:

$$\partial X_i / \partial t = A_i \left[\xi_i \left(r_i X_i - \sum_{j \neq i} b_{ij} X_i X_j - a_i X_i^2 \right) + D_i(x,y) \Delta X_i \right] + \varsigma_i + u_i,$$

где X_i – координаты вектора состояния системы, причем $X_i \equiv X_i(t,x,y)$; i, j = 1, 2, …, n; r_i – коэффициент репродукции (размножения, роста, развития и т. п.); a_i – параметр насыщения, ограничивающий рост (репродукцию); b_{ij} – параметр взаимодействия между подсистемами (субъектами хозяйственной деятельности); $D_i(x,y)$ – коэффициент диффузии i-й подсистемы (субъекта экономики) в точке

(x, y); $\xi_i \equiv \xi_i(t, x, y)$ и $\varsigma_i \equiv \varsigma_i(t, x, y)$ – стохастические мультипликативные и аддитивные составляющие модели соответственно; $u_i \equiv u_i(t, x, y)$ – координаты вектора управления (управленческих решений); A_i – масштабирующий коэффициент, Δ – лапласиан: $\Delta(*) = \partial^2(*)/\partial x^2 + \partial^2(*)/\partial y^2$, а $t \in [0, \mathrm{T}]$ – интервал времени функционирования и развития системы.

Такая обобщенная модель позволяет также учесть и то, что как риск, так и уровень безопасности имеют свою динамику и являются стохастическими процессами, а не одномоментными величинами.

Обобщенная интегральная эколого-экономическая динамическая модель может быть представлена в блочном виде:

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = f_1(E_1, E_2, P_1), \\ \dot{E}_2 = f_2(E_1, E_2, P_2), \end{cases} \qquad (*)$$

где $E = \left(E_1, E_2\right)$ – объединенный вектор состояний эколого-экономической системы (ЭЭС), например ТПП, причем $E_1 = E_1(t)$ – вектор экономических переменных; $E_2 = E_2(t)$ – вектор экологических переменных (переменных загрязнения); $P = \left(P_1, P_2\right)$ – совокупный вектор параметров ЭЭС (внутрисистемных и внешних). Очевидно, что $E_1 = \left\langle K_1, L_1, I, \tau, C\right\rangle$, где $C = \left(C_1, C_2, C_3, C_4\right)$ – вектор некоторых переменных потреблений (затрат), причем C_1 – «чистое» потребление (т. е. на зарплату и т. п.), $C_2 = C_Э$ – потребление на экологию, $C_3 = C_s$ – потребление на безопасность, $C_4 = C_i$ – объем инвестиций на инновационные и информационные технологии. Заметим при этом, что

$$C_1 = g_1(Y) \approx \alpha_1 Y,\ \ C_2 = g_2(Y) \approx \alpha_2 Y,\ \ C_3 = g_3(Y) \approx \alpha_3 Y,\ \ C_4 = g_4(Y) \approx \alpha_4 Y,$$

$$\sum_k \alpha_k = 1,\ \alpha_k \geq 0.$$

Для объема выпуска (выхода) «полезного» продукта можно записать:

$$Y = F\left(K, L, \tau, \dot{I}, pr\right),$$

причем необходимо, чтобы $Y_t \leq Y_{t+1}$ и $pr\left(t\right) \leq pr\left(t+1\right)$.

Например, *динамическую модель системы* можно задать в виде уравнений $\dot{x} = F\left(x, u, v, \xi\right)$; $\dot{z} = g\left(x, z, t, \lambda\right)$, а уравнения наблюдений (измерений) как $Y_x = h_x\left(x, \zeta_x, t\right)$, $Y_z = h_z\left(x, z, \zeta_z, t\right)$, и аналогично могут быть заданы другие модели измерений/наблюдений, причем система уравнений обобщенной эколого-экономической модели можно представить как

$$\dot{k} = g^k\left(k, m, N, \tau, z, pr, \lambda\right),\ \ \dot{m} = g^m\left(k, m, N, \tau, z, pr, \lambda\right),\ \ \dot{N} = g^N\left(k, m, N, \tau, z, pr, \lambda\right),$$

$$\dot{\tau} = g^{\tau}\left(k, m, N, \tau, z, pr, \lambda\right), \;\; \dot{z} = g^{z}\left(k, m, N, \tau, z, pr, \lambda\right),$$

где $x(t)$ – вектор состояния ТПП, причем $x = \left(x_1, \ldots, x_n\right)$; $y = y\left(t\right)$ – вектор выхода (продукция – полезный выход); $u = u\left(t\right)$ – вектор управляющих воздействий (переменных); $\nu = \left(k, m, N, pr, \tau\right)$ – вектор входных переменных; $k = k(t)$ – вектор количественных переменных; $m = m(t)$ – вектор монетарных переменных (финансы); $N = N\left(t\right)$ – информационный поток; $\tau = \tau\left(t\right)$ – вектор технологий (знаний); $z = z(t)$ – вектор загрязнений (вредный выход); $pr = pr(t)$ – природные ресурсы.

Модель распределения i-го конечного продукта предприятия (или продукт i-го предприятия) в упрощенной форме можно представить как функцию вида: $\widehat{Y}_i(t) = I_i(t) + C_i(t) + З_{iz}(t) + З_{iб}(t) + \Xi$ $i = 1, 2, \ldots, n$, где $\widehat{Y}_i$ – общий объем выпуска (в денежном выражении); I_i – инвестиционный поток; C_i – поток потребления; $З_{iz}$ – объем затрат на мониторинг загрязнений и природоохранные мероприятия; $З_{iб}$ – объем затрат на систему безопасности ТПП; Ξ – другие затраты.

Модель оценка эффективности затрат. Пусть выделен некоторый объем капитала $К = \sum_{i=1}^{n} К_i$ для инвестирования ряда проектов (мероприятий): $П_1, П_2, \ldots, П_n$, а $e_1, e_2, \ldots, e_n$, соответствующие им эффективности (доходности), причем они представляют собой случайные величины со следующими вероятностными характеристиками: $m_1, m_2, \ldots, m_n$ – среднее ожидаемое значение дохода; $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \ldots, \sigma_n^2$ – их среднеквадратическое отклонение (СКО); $V_{ij} = \mathrm{cov}\left[e_i, e_j\right]$ – коэффициенты вариации, т. е. оценки взаимовлияния, $i, j = 1, 2, \ldots, n$. В нашем случае распределения затрат $n = 5$.

Так как очевидно, что $\nu_{ii} = \sigma_i^2$, то $m_0 = \sum_{i=1}^{n} x_i m_i$, $\sigma_0^2 = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \nu_{ij} x_i x_j$, где $x_i = К_i / К$, $m_0 = M\left\{e_0\right\}$, $\sigma_0^2 = M\left\{\left(e_0 - m_0\right)^2\right\}$,

$e_0 = \sum_{i=1}^{n} x_i e_i$, $\mathrm{cov}\left(e_i, e_j\right) = M\left\{\left(e_i - m_i\right)\left(e_j - m_j\right)\right\}$.

Пусть $U\left(m_0, \sigma_0^2\right)$ – функция полезности принятия решения $x^* = \left(x_1^*, x_2^*, \ldots, x_n^*\right)$. В частности, $U\left(m_0, \sigma_0^2\right) = am_0 + b\sigma_0^2$, $a \ge 0$, $b \le 0$, и задача принятия эффективного решения имеет вид: $U\left(m_0, \sigma_0^2\right) \to \max\limits_{x}$. При этом значения пары коэффициентов a и b задаются лицом, принимающим решение, и этот выбор зависит от его знаний и психологических характеристик.

Задачу оптимизации инвестирования в СЭЭМУ в дискретном случае можно представить в следующих вариантах:

$$m_0 \to \max_{\{x_i\}},\; \sigma_0^2 \to \min_{\{x_i\}},\; \sum x_i = 1,\; x_i \ge 0;$$

$$m_0 \to \max,\ \sigma_0^2 \le \sigma_*^2,\ \sum x_i = 1,\ x_i \ge 0;$$

$$m_0 \ge m_0^*,\ \sigma_0^2 \to \min,\ \sum x_i = 1,\ x_i \ge 0.$$

Решение этих задач осуществляются методом множителей Лагранжа или его модифицированным вариантом.

Интегральная эколого-экономическая модель управления ТПП. Используя методику системного подхода к анализу ТПП с учетом основных факторов детерминированной, стохастической и нечеткой природы, определяющих эволюцию системы, запишем уравнения выхода и состояния в следующем виде:

– уравнение выхода: $\overline{Y}(t) = F\left[K(t), L(t), I_h, \tau, CC, U, \xi, P_r\right]$, где $\overline{Y}(t)$ – общий вектор потоков продуктов (полезных и загрязняющих), характерных для заданных технологий ТПП; $K(t)$ – объем основных фондов; $L(t)$ – труд; I_h – поток инвестиций, банк технологий (знаний); CC – поток социальных факторов; U – поток управленческих решений; ξ – стохастические возмущающие воздействия внешней среды; P_r – поток природных ресурсов;

– уравнение состояния основного $(i=1)$ и вспомогательного $(i=2)$ производства:

$$\dot{K}_i = f_k\left(K_i, L_i, I_h, \tau, T_\tau, U, S, \xi\right),\ \dot{L}_i = f_L\left(K_i, L_i, I_h, \tau, T_\tau, U, S, \xi\right),$$

$$\dot{I}_{hi} = f_I\left(K_i, L_i, I_h, \tau, T_\tau, U, S, \xi\right),\ \dot{S}_i = f_S\left(K_i, L_i, I_h, \tau, T_\tau, U, S, \xi\right),$$

$$\dot{\tau}_i = f_\tau\left(K_i, L_i, I_h, \tau, T_\tau, U, S, \xi\right),$$

где $S(t)$ – поток угроз, опасностей и рисков (внешних S^1 и внутренних S^2).

Вектор выхода $\overline{Y}$ представляет собой набор полезных продуктов $Y = \left(y_1, \ldots, y_n\right)$ и загрязняющих продуктов $Z' = \left(z_1', \ldots, z_m'\right)$.

Уравнение вредного выхода можно представить также в виде

$$Z(t) = F_z\left[K_r(t), L_r(t), I_h, \tau, CC, U, \xi, Z'\right],$$

где Z' – поток выделенных в основном производстве загрязнений, F_z – ПФ вектора загрязнений.

Тогда обобщенная интегральная эколого-экономическая динамическая модель представлена в виде системы уравнений (*).

Модель динамики технико-экономических переменных вектора состояния можно записать $\dot{K} = -\mu\left(\tau, T\tau, U\right)K + \nu_h$, где μ – коэффициент амортизации, зависящий от используемых технологий и принимаемых решений; $\nu_h = H(I_h, \chi, S, CC, L, K, \xi)$ – темпы внедрения новых фондов, которые определяются оператором H, зависящим от ранга выделенных инвестиций I_h; χ – функция распределения выделенных инвестиций по времени внедрения и сложившейся социально-экономической ситуации на предприятии. При этом для описания динамики развития рабочего потенциала можно воспользоваться уравнением

$\dot{L} = a_L Q + b_L T\tau + \xi + U$, где Q – темпы изменения масштаба производства при сложившейся технологии и социально-экономической обстановке на предприятии $Q = Q\left(K, \tau, T\tau, CC\right)$; $T\tau$ – темпы совершенствования технологии, которые определяются использованным уровнем интеллектуализации, т. е. $T\tau = T\tau(\tau, I_h)$. Заметим, что коэффициенты $a_L \geq 0$, $b_L \geq\leq 0$, в зависимости от целей и направленности используемых средств банка знаний и технологий. Параметры ξ и U описывают стохастичность внешней среды и управляющие воздействия, соответственно.

Динамику изменения потока инвестиций можно представить как

$$\dot{I}_h = \sum_{j=1}^{n}\left[\frac{d\sigma}{dt}F_j(K_j, L_j) + \sigma\left(\frac{\partial F_j}{\partial K_j}\dot{K}_j - \frac{\partial F_j}{\partial L_j}\dot{L}_j\right)\right],$$

где $\sigma = \sigma(U_s, S, C)$ – нормативы отчислений капитала на инвестиции, которые определяются не только управляющими воздействиями, но и потоком угроз, опасностей и рисков; $F = F\left(K, L\right)$ – производственные функции, значения которых определяются объемом задействованных производственных ресурсов (K, L).

Для формирования уравнения, описывающего *динамику потока загрязнений*, необходимо в фондах выделить ту их часть, которая работает на снижение загрязнений – K_z. Тогда можно записать, что $\dot{Z} = a_z\dot{K} - b_z I_h + \xi$, где $a_z = a_z(K, K_z, I_z)$ – коэффициент, учитывающий физико-химические возможности по снижению объемов загрязнений существующими технологиями. Следует отметить, что a_z имеет сугубо нелинейный характер, а при достижении критических соотношений между параметрами K и K_z они будут являться бифуркационными параметрами, $I_h = I_h(\dot{I}_z, T, \tau)$ – темпы внедрения новейших технологий, которые зависят от инвестиционных процессов в природоохранных технологиях, внедряемых новых производственных процессов и новых технологий и знаний, коэффициент $b_i > 0$.

Вариант эколого-экономической модели ТПП. Так как приращение (рост) загрязнения равняется разности между объемом произведенного загрязнения и объемом уничтоженного загрязнения за счет непосредственной борьбы (охраны) с ним, так и в результате естественной убыли (ассимиляции) динамику загрязнения в общем виде можно описать следующим дифференциальным уравнением:

$$\dot{Z} = Z^+ - Z^-,$$

где для одной ТПП $Z^+ = \gamma f\left(k\right)$, $Z^- = \lambda\left(1 - \alpha - \beta\right) f\left(k\right) + \delta\ z$, а для региональной экономики в целом (в случае взаимной независимости ТПП) –

$$Z^+ = \sum_{1}^{n}\gamma_i f_i\left(k_i\right),\ Z^- = \lambda\sum_{1}^{n}\left(1 - \alpha_i - \beta_i\right) f_i\left(k_i\right) + \delta z.$$

Вариант задачи оптимального управления ТПП. Пусть норма накопления $\rho = \alpha = \alpha\left(t\right)$ – переменная величина. Тогда удельное потребление есть

$$c(t)=(1-\alpha(t))(1-a)f(k)=(1-a)f(k)-\alpha(t)(1-a)f(k) \text{ или}$$

$$\alpha(1-a)f(k)=(1-a)f(k)-c(t).$$

Следовательно, уравнение динамики потока фондов примет вид

$$\dot{k}=-(\mu+\nu)k+\alpha(1-a)f(k)=-(\mu+\nu)k+f(k)-c, \text{ или}$$

$$\dot{k}=f(k)-(\mu+\nu)k-c(t), \quad k(0)=k_0. \tag{2}$$

В частности, если $Y=F(K,L)$, $Y=I+C$, то модифицированная модель динамики фондов с учетом запаздывания инвестиционных потоков (с распределенным лагом и когда функции ядра $h(t-\tau)=h_0\exp(-r(t-\tau))$, т. е. для стационарного случая) примет следующий вид (3):

$$\begin{cases}\dot{K}=-\mu K+I_h(t), \ K(0)=K_0,\\ \dot{L}=\nu L \text{ или } L=L_0e^{\nu t}, \ L(0)=L_0,\\ \dot{I}_h=-rI_h+h_0I, \ I_h(t_0)=h_0I(t_0).\end{cases}$$

$$\text{или}\begin{cases}\dot{k}=-(\mu+\nu)k+i_h(t), \ k(0)=k_0,\\ (i_h)'=-(r+\mu+\nu)i_h+h_0\rho f(k), \ i_h(0)=i_{h0},\\ c=(1-\rho)f(k), \ (\rho\equiv\alpha).\end{cases} \tag{3}$$

При этом заметим, что поток инвестиций также является стохастическим процессом.

Уравнение (3) является основной динамической моделью управляемой ТПП и в качестве управляющей переменной можно взять удельное потребление $c(t)=C(t)/L(t)$ или норму накопления ρ, а переменная состояния – $k(t)$ – фондовооруженность, т. е. $k(t)=K(t)/L(t)$.

Нелинейная модифицированная динамическая модель системы при логистическом характере изменения L имеет вид:

$$\begin{cases}\dot{k}(t)=\alpha f(k)-n_0(1-\eta(t))k(t), \ k(t_0)=k_0,\\ c(t)=(1-\alpha)f(k),\\ \dot{\eta}(t)=n_0\eta(t)(1-\eta(t)), \ \eta(t)\equiv L(t)/L_{\max},\\ \eta(t_0)=L_0/L_{\max}.\end{cases}$$

Для ТПП в качестве эколого-экономической модели динамики можно рассмотреть уравнения (1) и (2) или (3) с вектором состояния $x=(k,z)$ и управляющим вектором параметров (переменных) $u=(\alpha,\beta)$. Теперь задача оптимального управления ТПП может быть представлена в следующей постановке. Пусть интегральная модель динамики ТПП есть – (1), (2).

В качестве функции полезности можно рассматривать функцию

$$U(q) \equiv U(k, z, \alpha, \beta) \equiv U(x, u),$$

а функционал эффективности

$$J(q) = \int_{t_0}^{T} \exp(-\delta \quad t) U(q(t)) dt$$

и критерий оптимального управления

$$J(q) \to \max_{q \in Q} (opt)$$

при ограничениях: $0 \le \alpha, \beta \le 1, \ \alpha + \beta \le 1\}$, а также

$$Q = \{(\alpha, \beta, k, z) \mid 0 \le \alpha, \beta \le 1; \ \alpha + \beta \le 1, \ k(t_0) = k_0, \quad z(t_0) = z_0\}$$

$$\text{или } Q = \{(\alpha, \beta, k, z) \mid k(t_0) \in K_0, \ k(T) \in K_T, \ z(t_0) \in Z_0, \ z(T) \in Z_T\}.$$

Общая динамическая модель управления трансформацией экономики в условиях неопределенностей и рисков. Пусть $x(t) = (x_1(t), \ \dots \ , \ x_n(t))$ – фазовый вектор социально-экономических переменных, который описывает состояние экономики системы в момент времени *t*. Изменение во времени вектора $x(t)$ удовлетворяет нелинейному дифференциальному уравнению (синергетическое уравнение) [1, 2]:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \ u(t), \ \mathrm{v}(t), \ t), \quad t \ge t_0, \quad x(t_0) = x_0 \in X_0. \tag{4}$$

Здесь $u(t) = (u_1(t), \ \dots \ , \ u_p(t))$ – вектор управления (элементы принятия решений), координаты которого характеризуют режим экономической деятельности в момент времени *t*; $\mathrm{v}(t) = (\mathrm{v}_1(t), \ \dots \ , \mathrm{v}_p(t))$ – вектор внешних возмущающих факторов, элементы которого характеризуют различные неопределенные воздействия (или воздействия противной стороны), т. е. это может быть, в частности, и вектор помех; t_0 – настоящий (начальный) момент времени; $X_0 \subset R^n$. Решение $x(\cdot) = (x(t), \ t \ge t_0)$ уравнения (4) является траекторией движения от традиционной экономики (ТЭ) к социально и экологически ориентированной рыночной экономике (СЭОРЭ).

Предполагается, что векторы управления $u(t)$ и помех $\mathrm{v}(t)$ удовлетворяют заданным ограничениям:

$$u(t) \in U, \quad \mathrm{v}(t) \in V, \quad t \ge t_0, \tag{5}$$

где $U \subset R^p$ и $V \subset R^q$.

Отображение (функция) $f: R^n \times U \times V \times R \to R^n$ определено экономическими законами и/или балансовыми соотношениями и соответствует реальному состоянию экономики.

Теперь задачу можно поставить в следующей форме: требуется определить (оценить) вектор управления $u(t)$ (вектор компонент принимаемых экономических решений), который обеспечивает «оптимальный» в некотором заданном смысле движение от ТЭ к СЭОРЭ и удовлетворяет заданным требованиям, которые можно формализовать в виде условий:

$$x(T) \in X_T, \quad x(t) \in X_Б \text{ при } 0 \le t \le T, \tag{6}$$

где X_T – фазовое пространство допустимых (желаемых) состояний СЭОРЭ; $X_Б$ – множество (область) безопасного перехода; $T = \varphi(x(\cdot))$ – момент попадания в желаемое состояние (т. е. момент первых попаданий $x(t)$ в конечное множество X_T).

Решение задачи определяется стратегией $F^0 \subset F$, которая удовлетворяет условию:

$$T^*\left[\Omega_0,\ F^0\right] = \min_{F \in \Im} \sup_{x(\cdot) \in \aleph\left[\Omega_0,\ F^0\right]} J\left[x(\cdot)\right];\ \Omega_0 = t_0 \times X_0,$$

если минимум не достигается, то для произвольно малого $\varepsilon > 0$ определяется стратегия в виде F_ε: $T^*\left[\Omega_0,\ F^0\right] \le \inf_{F \in \Im} \left\{ \sup_{x(\cdot) \in \aleph\left[\Omega_0,\ F^0\right]} J\left[x(\cdot)\right] \right\} + \varepsilon.$

Нелинейная стохастическая эколого-экономическая модель управления. Модифицированная модель динамики ТПП. Традиционно предполагают экспоненциальное изменение трудовых ресурсов, т. е. $L(t) = L_0 \exp(n_0 t), L_0 \equiv L(t_0)$, где n_0 — параметр темпа роста, т. е. $\dot{L} = n_0 L$. Однако с учетом эффекта «насыщения» имеет место более реалистическая модель динамики ТР в виде логистического уравнения: $\dot{L}(t) = n_0 L(t)\left(1 - \dfrac{L(t)}{L_{\max}}\right)$, где $L_{\max}$ – максимально допустимое количество трудового ресурса.

Следовательно, будем иметь следующую модель функционирования и развития ТПП:

$$\begin{cases} Y(t) = F\left[K(t), L(t)\right],\ C(t) = (1-\alpha)Y(t), \\ \dot{K}(t) = -\mu K(t) + \rho Y(t),\ K(t_0) = K_0, \\ \dot{L}(t) = n_0 L(1 - L/L_{\max}),\ L(t_0) = L_0, \end{cases} \tag{7}$$

где K_0 – начальный объем основных фондов; L_0 – начальное количество трудовых ресурсов. Для удобства анализа системы перейдем к относительным (удельным) величинам: $k = K/L$ – фондовооруженность; $c = C/L$ – потребление на одного трудящегося; $y = Y/L$ – производительность труда.

Тогда систему уравнений (7) можно переписать в следующей форме:

$$y(t) = f(k) \equiv F(k,1), \quad \begin{cases} c(t) = (1-\alpha)\, y(t) = (1-\alpha)\, f(k), \\ \dot{k}(t) = \alpha f(k) - n_0 \cdot k(1-\eta), \ \ \eta = L / L_{\max}, \ \ 0 < \eta < 1. \\ k(t_0) = k_0. \end{cases}$$

Таким образом, имеем нелинейную динамическую модель

$$\begin{cases} \dot{k}(t) = \alpha f(k) - n_0 (1-\eta(t)) k(t), \quad k(t_0) = k_0, \\ c(t) = (1-\alpha) f(k), \\ \dot{\eta}(t) = n_0 \eta(t)(1-\eta(t)), \quad \eta(t) \equiv L(t) / L_{\max}, \\ \eta(t_0) = L_0 / L_{\max}. \end{cases} \tag{8}$$

Так как модель динамики трудовых ресурсов имеет вид

$$\dot{L} = n_0 L \left(1 - \frac{L}{L_{\max}}\right) \quad \text{или} \quad \dot{L} / L = n_0 \left(1 - \frac{L}{L_{\max}}\right) \equiv n_0 (1-\eta(t)), \text{ то}$$

$$\begin{cases} \dot{k} = i(t) - \left[\mu + n_0 (1-\eta(t))\right] k \\ \dot{\eta} = n_0 \eta (1-\eta), \\ y = c + i; \quad i = f(k) - c \end{cases}$$

$$\text{или} \begin{cases} \dot{k} = f(k) - c - \left[\mu + n_0 (1-\eta(t))\right] k, \quad k(t_0) = k_0 \\ \dot{\eta} = n_0 \eta (1-\eta), \quad \eta(t_0) = L_0 / L_{\max}, \quad 0 < \eta(t) < 1. \end{cases}$$

Модель динамики информационного ресурса. Производственная функция эколого-экономической системы: $YZ(t) = F\left[K(t), L(t), N(t)\right]$, где L – количество рабочей силы (затраты труда); N – уровень НТП (информационные и инновационные технологии, интеллектуализация процессов управления и т. п.); Z – уровень экологического ущерба (загрязнения ОС) при производстве продукта $Y(t)$.

Если общий объем информационного ресурса $N(t)$ (как и сами источники возможных идей данной области исследований) имеет верхний предел (допустимый в современных условиях объем) $N_{\max}$, т. е. $0 \le N(t) \le N_{\max}$, то динамическая модель роста информационного потока является также логистическим уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N \left(1 - \frac{N(t)}{N_{\max}}\right), \ \ N(t_0) = N_0 - \text{const}.$$

Модель динамики ценообразования продукции ТПП. Введем следующие обозначения для основных экономических показателей (в абсолютном измерении). Переменные: $Y(t)$ – общий объем выпуска (выход системы); $\partial Y(t)$ – доход; $C(t)$ – общее потребление (в частности, капитальные вложения для развития); $S(t)$ –

функция предложения; $D(t)$ – функция платежеспособного спроса на выпускаемую продукцию ТПП; $M(t)$ – общий объем денежной массы в обращении в момент времени t; $p(t)$ — средний уровень нестабильных цен в данный момент t. Значения параметров определяются следующим образом: a – материалоемкость валового продукта (коэффициент прямых затрат – доля промежуточного продукта из общего выпуска), причем $0 < a < 1$; b – коэффициент эффективности капитальных вложений (т. е. $1/b$ – фондоемкость), причем $b \geq 1$ или $0 \leq 1/b \leq 1$; w – доля накопления в доходе, причем $0 \leq w \leq 1$; α – параметр настройки уровня цен, причем $0 \leq \alpha \leq 1$; γ – коэффициент пропорциональности (доля социальных выплат работникам), причем $0 \leq \gamma \leq 1$. Для простоты случая положим, что модель динамики числа работающих имеет традиционный вид $L(t) = L_0 \exp(\nu t)$, т. е. $dL/dt = \nu L(t)$.

Тогда имеем следующую обобщенную экономико-математическую модель динамики «Предложение – Цена – Спрос»:

$$\begin{cases} \dot{D} = \alpha_1 S - \alpha(D(D-S))/p - \min(D,S), \\ \dot{S} = \alpha_2 S, \\ \dot{p} = \alpha(D-S), \end{cases} \tag{9}$$

где $D \geq 0$, $S \geq 0$, $p \geq 0$, $D(0) = D_0$, $S(0) = S_0$, $p(0) = p_0$, $0 \leq t \leq T$, $0 \leq a$, w, α, $\gamma \leq 1$, $b \geq 1$, $\alpha_1 = \gamma/(1-w)$, $\alpha_2 = wb(1-a)$.

Заметим также, что $D(t) = M(t)/p(t)$, $V(t) = \gamma\{p(t)\,\partial\, Y(t)\}$ – объем выплат населению, $Z(t) = p(t)\min\{D(t), S(t)\}$ – объем затрат на приобретение товаров,

$$\partial Y(t) = S(t) + C(t);\ \ \partial Y(t) = (1-a)Y(t);\ \ C(t) = w\partial Y(t);\ \ dY/dt = bC(t).$$

Итак, задача оптимального управления ТПП в данном случае можно сформулировать теперь следующим образом.

Пусть $u(t) = Q(t)$ – текущий объем производства (управляющая переменная), причем $0 \leq u(t) \leq u_{\max}$, $p(t)$ – фазовая переменная.

В качестве критерия оптимальности управления можно брать следующий функционал:

$$J[p,u] = \int_0^T \exp(-\delta t)\{p(t)\min[D(t),u(t)]\}dt \to \max_{0 \leq u \leq u_{\max}}. \tag{10}$$

В условиях нестабильных (случайных) цен $p(t)$ данный критерий следует уточнить, т. е. необходимо рассматривать усредненное значение $J[p,u]$, т. е.

$$\overline{J}[p,u] = \int_0^T \exp(-\delta t) * E\{p(t)\}\min[D(t),u(t)]dt \to \max_{0 \leq u \leq u_{\max}}, \tag{11}$$

где символ «E» означает математическое ожидание процесса, а δ – параметр дисконтирования.

Заметим, что подынтегральная функция является негладкой, что создает ряд трудностей для аналитической оптимизации.

В системе уравнений (9) динамика цены на рынке можно считать уравнением состояния системы, т. е.

$$dp/dt = \alpha\left[D(t) - u(t)\right],\ p(0) = p_0 > 0,\ \ p(t) > 0,\ 0 \le \alpha \le 1. \qquad (12)$$

Разработана также *модель динамики влияния инновационных технологий на развитие ТПП* [1–3].

Динамическая модель конкуренции. В случае двух конкурирующих экономических структур (фирм) систему уравнений (1) (без учета пространственного распределения переменных состояния) можно записывать как

$$x_1(k+1) = \left[\xi_1(k)x_1(k)\left(1 - \sum_{j=1}^{2} a_{ij}(k)x_j(k)\right) + w_1(k)\right] + u_1(k),$$

$$x_2(k+1) = \left[\xi_2(k)x_2(k)\left(1 - \sum_{j=1}^{2} a_{ij}(k)x_j(k)\right) + \ w_2(k)\right] + u_2(k),\ \ k = \ 0,1,2,...$$

Модель управления в условиях смешанной информации. Степень сложности системы управления и принятия решений в теории рисков зависит от уровня информационной определенности, а ее качество выше при учете смешанной неопределенности: стохастическая, множественная и нечеткая. Обобщенную модель исследуемого экономического или экологического процесса можно представить как F_0: $U \times W \to X$, а модели наблюдения за факторами и показателями как $F\{C1\}: X \times V_X \to Y,\ F\{C2\}: C \times V_C \to \tilde{C}$, где $I_c = \{p(w), p(\mathrm{v}_x), p(\mathrm{v}_c)\}$ – информационное поле стохастической неопределенности; $I_\mu = \{w \in W, \mathrm{v}_x \in V_x, \mathrm{v}_c \in V_c\}$ – информационное поле множественной неопределенности; $I_н = \{\mu_{X_0}, \mu_{V_0}, \mu_{G^*}\}$ – нечеткое информационное поле. Смешанную информационную неопределенность теперь можно описать в виде кортежа: $I_0 = \langle I_C, I_M, I_н \rangle$. При этом единая база данных и знаний интегрированной системы управления состоит из совокупности трех баз всех уровней иерархии $I = \langle B_0, B_1, B_2 \rangle$. В качестве функций принадлежностей μ_{X_0}, μ_{V_0}, μ_{G^*} можно, в частности, принять гауссовы функции.

Следовательно, в данном случае задачу управления (принятия решения) можно свести к решению следующей оптимальной задачи:

$$u = Arg\ \max M_w\{\mu_d(x,w)\} = Arg \max_{u \in U} M_w\left\{\mu_{X_0}\left(F_0(u,w)\right) \bullet \mu_{V_0}(u) \bullet \mu_{G^*}(g)\right\},$$

где $C \in C^*$; M – символ математического ожидания; $U = \left[u, r + \varepsilon_{лпр}\right]$ – принятое решение.

Модель динамики риска и ее оценки. Рассмотрим риск как векторный стохастический процесс $e(t)$ в динамике, который удовлетворяет линейному стохастическо-

му дифференциальному уравнению вида: $\dot{e}(t) = F(t)e(t) + G(t)w(t) + u(t)$, а наблюдения за ним – как векторный случайный процесс $z(t)$ вида:

$$z(t) = H(t)e(t) + v(t).$$

Здесь $w(t)$ и $v(t)$ – случайные внешние возмущения (нормальные «белые шумы») с заданными вероятностными характеристиками, а $u(t)$ – вектор управления риском $e(t)$. Предполагается, что матрицы F, G, H, Q и R уже идентифицированы. Если наблюдения $\{z(s)\}$ ведутся на интервале $0 \le s \le t$, то получена оценка вектора риска $e(t)$ в виде $y(t) = \int_0^t A(t,s)z(s)ds$, которая минимизирует дисперсию $E\left[(e-y)^T(e-y)\right]$ при ограничениях $E\left[y_i^2\right] \le a_i^2(t)$, $i = \overline{1,n}$, $a_i^2(t)$ – заданные функции ограничений на риск.

Модели оптимизация рисков в условиях смешанной неопределенности. Рассмотрим некоторые подходы решения задач оптимизации в теории рисков при учете различного рода смешанных неопределенностей, присущих сложным процессам и системам. Для каждого фиксированного вектора $x \in X$ можно найти свой наименьший уровень f_0, называемый квантилем, при котором вероятность еще будет выполнена:

$$x^* = \arg\min_{x\in X}\max_{\xi\in\Omega} f(x,\xi),\ \ P\{f(x,\xi) \le f_0\} \ge \alpha,\ \ f_\alpha(x) = \min[f_0 : P\{f(x,\xi) \le f_0\} \ge \alpha].$$

Поэтому задача оптимизации, связанная с выбором гарантирующего решения, может быть сформулирована теперь как задача поиска такого вектора x^*, который обращает в минимум квантиль $f_\alpha(x)$:

$$x^* = \arg\min_{x\in X} f_\alpha(x),\ \ f^* = \min_{x\in X}\max_{\xi'\in\Omega'} f_\alpha(x,\xi'),\ \ x^* = \arg\min_{x\in X}\max_{\xi'\in\Omega'} f_\alpha(x,\xi'),$$

$$f^* = \min_{x\in X}\max_{\xi'\in\Omega'} f_\alpha(x,\xi'),\ \ x^* = \arg\min_{x\in X} M\left[f(x,\xi)\right].$$

Из-за ограниченности объема данной статьи далее лишь перечислим наименования еще ряда разработанных моделей, подробное описание которых приведено в работах [1–3], а именно: моделирования динамики риска при многокритериальной оптимизации и в условиях неопределенности; интеллектуальное управление в ИАСУ ТПП в условиях смешанной неопределенности; интеллектуальная система поддержки принятия решений диагностики кризисного состояния ТПП; интеллектуальная система моделирования и управления эколого-экономическими рисками; интегральная модель интеллектуального управления производственно-экономической системой, основанного на знаниях; нечеткая модель ТПП в условиях коалиционного управления; эколого-экономическое моделирование и оптимизация водопользования в техногенном регионе; ЭЭМ транспортных потоков ТПП; моделирование и прогнозирование состояния атмосферы в зоне ТПП; модели оперативного планирования технологических процессов и схем ТПП.

Выводы. В работе разработаны комплекс моделей и система информационных инструментов ЭЭУ т. е. создана новая парадигма управления сложными экономическими объектами и процессами, которая базируется на новой концепции,

принципах и методологии создания интегрированной компьютеризированной системы эколого-экономического мониторинга, моделирования, управления и принятия решений; впервые разработан комплекс критериев оптимизации и управления для всей производственно-транспортной системы ТПП и др. Результатом работы в целом является интегрированная компьютеризованная система эколого-экономического мониторинга, моделирования и управления ТПП.

Список литературы

1. *Рамазанов С. К.* Инструменты эколого-экономического управления предприятием : монография / Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. – Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2008. – 351 с.

2. *Рамазанов С. К.* Модели эколого-экономического управления производственной системой в нестабильной внешней среде : [монография]. – Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2004. – 384 с.

3. *Рамазанов С. К., Припотень В. Ю.* Методы и информационные технологии управления предприятием в условиях нестабильностей : [монография]. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. – 216 с.

4. Современные технологии управления промышленным предприятием : [монография] / А. Э. Воронкова, А. В. Козаченко, С. К. Рамазанов и др. – Киев : Лібра, 2007. – 254 с.

5. *Рамазанов С. К.* Інноваційні технології антикризового управління економічними системами: [монографія] / С. К. Рамазанов, Г. О. Надьон, Н. І. Кришталь та ін. ; під ред. проф. С. К. Рамазанова. – Луганськ ; Київ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. – 584 с.

* * *

S. K. Ramazanov, Doctor of Technical Sciences, Doctor of Economics, Professor, Volodimir Dahl East-Ukrainian National University

M. D. Aptecar, professor, Ph.D (Chemistry), Volodimir Dahl East-Ukrainian National University

Ecological and Economical Control of Techogenic Industrial Enterprise Under Conditions of Instability

The complex of models and system of instruments of ecological and economical management based on a new concept, principles and methodology of creation of the ecological and economical monitoring integrated system, design and management of a technogenic industrial enterprise are developed.

Keywords: technogenic industrial enterprise, production system, ecologic-economical management, economical and mathematical modeling, complex of models, systems analysis, intellectualization, integration processes, instability, fuzzy systems, principles of the «NO» and «MANY» factor analysis and synthesis

Получено 13.05.10