О КРИТЕРИЯХ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО ПОВЕДЕНИЯ В ИСКУССТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

В.Х. Федотов
кандидат химических наук, доцент кафедры «Информационных систем» экономического факультета Челябинского государственного университета
Н.В. Новожилова,
кандидат экономических наук, заведующая кафедрой «Информационные системы» экономического факультета Челябинского государственного университета,
mallin@mail.ru

Естественные системы (ЕС) в природе и обществе функционируют по законам «разумности», которые можно использовать при конструировании интеллектуальных искусственных систем (ИС). На основе идей самоорганизации и эволюции ЕС исследованы нестационарные режимы и устойчивость моделей триггерных систем. Показано, что флуктуации, снижающие избыточное производство энтропии, могут приводить к неустойчивости и рождению упорядоченных структур. Способность ИС к самоорганизации интерпретируется как целесообразное поведение.

Ключевые слова: искусственный интеллект, самоорганизация, принцип минимума производства энтропии, критерий эволюции, упорядоченность, целесообразность.

Естественные системы (ЕС), окружающие нас повсюду (флора, фауна, экосистема, социум и др.), характеризуются весьма «разумным» поведением, т.е. способностью вырабатывать «правильный» отклик на внешнее возмущение, обучаться и выживать. Основным критерием разумности для ЕС, по-видимому, является стабильность (безопасность, самосохранение, устойчивость). Примем это утверждение как основную аксиому.

Искусственные системы (ИС) более предсказуемы и не обладают способностью к целеполаганию. Может ли ИС обладать проявлениями интеллекта и что можно считать его проявлениями? Какое качество ЕС наиболее значимо с этой точки зрения? Эти вопросы остаются важнейшими нерешенными проблемам теории искусственного интеллекта (ИИ).

Целью работы является исследование возможности использования эволюционных идей в качестве модели разумного поведения ИС. Идеи эволюции универсальны для физики (Л. Больцман и др.), биологии (Ч. Дарвин) и социологии (К. Маркс). Принципы эволюции ЕС выражают фундаментальные законы неравновесной термодинамики (И. Пригожин, П. Гленсдорф) – *принцип минимума производства энтропии и универсальный критерий эволюции* [1,2].

И. Пригожин (1945) обобщил второй закон термодинамики на открытые неравновесные системы (Нобелевская премия, 1977). Изменение энтропии $dS = d_eS + d_iS$, где deS – *поток* внешней энтропии (обмен энергией); d_eS – *производство* энтропии внутри системы (диффузия, реакции). Внутреннее производство энтропии всегда неотрицательно $d_iS \geq 0$ (второе начало термодинамики). В закрытых системах $d_eS = 0$, $dS = d_iS \geq 0$ энтропия монотонно растёт до максимума в равновесии. В открытых системах $d_eS \neq 0$ и dS может иметь любой знак. В стационарном состоянии (с.с.) $dS = 0$ и $d_eS = -d_iS \leq 0$. **Принцип минимума производства энтропии** утверждает, что *в линейных системах производство энтропии $P = d_iS/dt$ монотонно убывает $dP/dt^2 \leq 0$ и достигает минимума в с.с.* Из него следует, что в открытых линейных системах, также как и в закрытых, флуктуации затухают (устойчивость). **Критерий эволюции** обобщает принцип минимума на нелинейные системы. *В ходе эволюции любая система стремится уменьшить производство энтропии $d_XP/dt \leq 0$,* обусловленное внутренними силами X, здесь $dP/dt = d_XP/dt + d_IP/dt$. При этом не оговаривается знак dIP/dt. В линейной области $d_XP = d_IP$ и критерий переходит в принцип минимума. Вне линейной области dP/dt может менять знак.

Важную роль в эволюции играет случайный фактор (флуктуации). Флуктуации отклоняют энтропию и её производство от с.с. $\Delta S = S\text{-}S_\infty = \sigma S + \delta^2 S/2 + \ldots$, $\Delta P = P - P_\infty = \delta P + \delta^2 P/2 + \ldots$, где $\delta^2 S/2$ и $\delta^2 P/2 = d(\delta^2 S/2)/dt = \delta_X P$ – избыточные S и P. Если избыточное производство энтропии положительно $\delta^2 S < 0$, $\partial_t(\delta^2 S) > 0$, система устойчива. При $\partial_t(\delta^2 S) < 0$ возможны неустойчивость и новая структура.

Эти принципы позволяют предположить, что, действуя в соответствии с критерием эволюции, ИС сможет вести себя подобно ЕС – в процессе флуктуаций терять устойчивость, демонстрировать бифуркации, приобретать новый уровень сложности и самоорганизовываться.

1) Если избыток производства энтропии отрицателен $\Delta P \equiv \partial_t(\delta^2 S) < 0$, возможна неустойчивость.

2) В области неустойчивости возможны бифуркации и переход к новым состояниям.

3) Уменьшение энтропии системы $\Delta S \equiv S - S_0 < 0$ соответствует более упорядоченному состоянию.

Стремление к цели $\Delta S \to \min$ (*) будем рассматривать как основное проявление интеллекта в ИС. В случае необходимости принятия решений, при наличии нескольких альтернатив, предпочтение отдаётся варианту, соответствующему лучшему значению этого критерия.

Нелинейная неравновесная термодинамика приближённо описывается эволюционными уравнениями физико-химических процессов в открытых системах, представляющих собой систему дифференциальных уравнений с параметрами (аналогичные уравнения встречаются в биологии и социологии)

$$dx/dt \approx f(x, w), \tag{1}$$

где $x = x(w, t)$ – вектор переменных (макроскопических), характеризующих состояние системы;

f – известная вектор-функция, определяемая базовой физической гипотезой (кинетический закон);

$w = w(E, t)$ – вектор вероятностных параметров (частот);

E – пространство процесса;

t – время.

Вблизи с.с. x_∞ зависимость от времени практически должна исчезать $\partial x/\partial t \approx f(x_\infty, w) \approx 0$. Однако, под влиянием неизбежных случайных флуктуаций система отклоняется от текущего состояния и начинает двигаться к новому или тому же с.с. Флуктуации будем задавать изменением значений некоторых компонент матрицы параметров $w(E, t)$ во времени

$$dw/dt \approx g(x, w), \tag{2}$$

где g – неизвестная вектор-функция, характеризующая пространство E.

Расширенная система (1)–(2) включает две взаимосвязанные части (детерминированную f и случайную g) и представляет собой модель эволюции ЕС, происходящей под влиянием флуктуаций. Еёразмерность равна сумме размерностей векторов x и w.

Пусть открытая система состоит из двух неоднородных подсистем – внешней (глобальной) и внутренней (локальной). Процессы взаимодействия объектов системы представим стадийной структурой (схемой)

$$A_i + \Sigma a_{ij} X_j = \Sigma a_{-ij} X_j + A_{-i}\,, \quad (d_i),\ i = 1,\ldots, s;\ j = 1,\ldots, n, \tag{3}$$

где A_i и X_j – объекты глобальной и локальной подсистем соответственно;

$\Sigma a_{ij} = \Sigma a_{-ij} \geq 0$ и di – целочисленные параметры (балансы и кратности стадий соответственно);

s – число стадий.

Выберем в качестве базовой гипотезы закон действующих масс [3]. Тогда уравнения (1) для процесса (3) в избытке объектов глобальной подсистемы и без учёта диффузии запишутся

$$x'_j = f_j(x, w) = S(a_{-ij} - a_{ij})(r_i - r_{-i}) \equiv S(a_{-kj} - a_{kj})rk, \quad k = 1,\ldots, 2s;\ j = 1,\ldots, n; \tag{4}$$

где x_j – концентрации X_j;

$E \equiv \{x_j \mid 0 \leq x_j \leq 1, \Sigma x_j = 1\}$ – пространство процесса;

$r_{\pm i} = w_{\pm i}\prod(x_j)^a{}_{\pm ij} > 0$ – скорости стадий;

$w_{\pm i} = k_{\pm i}C_{\pm i}$ – вероятности стадий;

$k_{\pm i}$ и $E_{\pm i}$ – константы скоростей стадий;

$C_{\pm i}$ – концентрации $A_{\pm i}$.

Избыточное производство энтропии $\delta_X P$ или (что эквивалентно) плотности производства энтропии $\delta X\sigma$ связано с кинетикой процесса соотношением $\sigma = \Sigma J_k X_k$, где J_k – обобщенные потоки; X_k – обобщенные силы [2]. Потоки и силы связаны со скоростью процесса, мерой удалённости от равновесия (сродством) и устойчивостью с.с.

Устойчивость определяется коэффициентами характеристического уравнения [4]

$$\lambda^n + \sigma_1\lambda^{n-1} + ... + \sigma_n = 0,$$

где $\sigma_p = \Sigma\det(-\partial f_{ip}/\partial x_{iq})$;

$p, q = 1,..., n$ (сумма по $i1 <...< i_p$);

det – определитель.

Выразим σ_p через балансовые коэффициенты и скорости стадий [5]

$$\sigma_p=\Sigma(x_{i1}...x_{ip})^{-1}\Sigma r_{k1}...r_{kp}\det(a_{kp,ip}-a_{-kp,ip})\ \det(a_{kp,ip}), \quad (5)$$

где $p = 1,..., n$;

$i1,..., ip = 1,..., n$;

$k1,...,kp = 1,..., 2s$ (первая сумма по $i1 <...<$ ip, а вторая по $k1 <...< kp$).

Для одномаршрутных процессов $r_i - r_{-i} = d_i r$, $s = n$ и выражение упрощается

$$\sigma_p = \Sigma r^{p-l}\Sigma r_{-k1}...r_{-kl}\Sigma(x_{i1}...x_{ip})^{-1}P_{i1...ip}^{k1...kl}, \quad (5')$$

здесь первая сумма берется по $l = 0,..., p$, вторая – по $k1 <...< kl$, а третья – по $i1 <...< ip$; множители $P_{i1...ip}^{k1...kl} \equiv \det(a_{kp,ip}-a_{-kp,ip})\det([a_{kp,ip}-a_{-kp,ip}][a_{kp,ip}d_{kp}])$, причём второй определитель построен из двух частей – сверху первая, снизу – вторая. Если все $P_{i1...ip}^{k1...kl} > 0$, то соответствующее $\sigma_p > 0$. Если один из $P_{i1...ip}^{k1...kl} < 0$ при некоторых значениях индексов, то в некоторой области параметров возможно наличие с.с., в котором $\sigma_p < 0$ (для этого достаточно, например, чтобы $x_{i1}^{-1},..., x_{ip}^{-1}$; $r_{-k1},..., r_{-kl} >> r >> 1$).

Соотношения (5) упрощают анализ упорядоченности. Если все $\sigma_1, \sigma_2,..., \sigma_n > 0$, то с.с. единственно и устойчиво, а избыток энтропии положителен. Если один из коэффициентов отрицателен $\sigma_p < 0$, то возможны любые эволюционные явления – отрицательный избыток энтропии, неустойчивость, бифуркации и новые упорядоченные структуры.

Действительно, из (5) следует, что

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= r\Sigma x_{i1}^{-1}P_{i1} + \Sigma r_{-k1}\Sigma x_{i1}^{-1}P_{i1}^{k1} = \\ &= r\Sigma x_{i1}^{-1}\Sigma(a_{k1,i1}-a_{-k1,i1})a_{k1,i1}d_{k1} + \\ &+ \Sigma r_{-k1}\Sigma x_{i1}^{-1}(ak_{1,i1}-a_{-k1,i1})^2.\end{aligned}$$

Следовательно, если процесс включает только линейные, квадратичные или неавтокаталитические стадии любой нелинейности, то всегда $\sigma1 > 0$ и с.с. единственно и устойчиво. Неустойчивость возможна только при $\Sigma(a_{k1,i1}-a_{-k1,i1})a_{k1,i1}d_{k1}$ что возможно при наличии автокаталитической стадии третьего или более высокого порядка нелинейности.

Примеры. На устойчивость двухстадийных процессов влияет только одна величина $\sigma1$.

А) Для нелинейного кубического процесса:

1) $X_2 = X_1$,

2) $X_1 + 2X_2 = 3X_2$ получим $P_1 = 1$, $P_2 = -1$. Значит σ_1 и избыток энтропии может быть отрицательным, возможна неустойчивость и критические явления. Этот процесс (простейший «триггер») допускает множественность стационарных состояний (м.с.с.) и исследован нами в [6–7].

В) Для трехстадийных процессов имеют значение знаки σ_1 и σ_2. Для нелинейного процесса:

1) $X_3 = X_1$,

2) $X_1 = X_2$,

3) $X_2 + 2X_3 = 3X_3$, получим $P_1 = P_2 = 1$, $P_3 = -1$, $P_{12} = P_{23} = 1$, $P_{13} = -1$, поэтому возможны смена знака σ_1 (за счёт P_3) и σ_2 (за счёт P_{13}). Возможны и неустойчивость, и м.с.с. При одновременном выполнении условий $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 > 0$ возможны автоколебания, что показано нами в работе [8].

Флуктуации (2) повышают размерность системы на число независимых частот (m), соответственно увеличивают число коэффициентов σ_p, привносят в них дополнительные слагаемые $\Delta\sigma_p$ и увеличивают вероятность возникновения неустойчивости

$$\Omega_p \equiv \sigma_p + \Delta\sigma_p = \Sigma\det(-\partial h_{ip}/\partial y_{iq}), \quad p, q = 1,2,..., n + m, \quad (5'')$$

где $h \equiv f \cup g$;

$y \equiv x \cup w$;

$\sigma_p = 0 (p = n + 1,..., n + m)$;

$\Delta\sigma_1 = -\Sigma\partial g/\partial w_i$, ..., $\Delta\sigma_{n+m} = \det(-\partial h_{ip}/\partial y_{iq})$.

Исследуем влияние флуктуаций на простейший «триггер» (схема А), в котором возможны неустойчивость и м.с.с. Запишем эту схему в символике открытых неоднородных систем (3)

$$\begin{aligned}&1)\ A_1 + Z = X,\\ &2)\ X + 2Z = 3Z + A_{-1}.\end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (1)–(2) при избытке компонент глобальной подсистемы $A_1, A_{-1} = Const >> X$ запишутся

$$\begin{aligned}&dz/dt = -(w_2+w_{-2})z^3 + w_2z^2 - (w_1 + w_{-1})z + w_{-1} = \\ &= f(z, w_{\pm i}), &(6a)\\ &dw_1/dt = g(z, w_2, w_{-1}, w_{-2,...}), &(6b)\end{aligned}$$

где $z = 1 - x \in [0,1]$ – независимая переменная (безразмерная концентрация Z);

$x \in [0,1]$ – зависимая переменная (безразмерная концентрация X);
$w_{\pm i} > 0$.

I) При отсутствии флуктуаций ($w_1 = Const$) эволюция системы описывается одним уравнением (6a). В одномерных системах устойчивые упорядоченные структуры не возникают.

Стационарные режимы определяются решениями кубического уравнения $f = 0$. Анализ показал, что существует до трёх различных с.с. При $w_{-1} = 0$ и $D \equiv w_2^2 - 4w_1(w_2 + w_{-2}) > 0$ имеется одно граничное и два внутренних с.с.:

$$z_\infty^{(1)} = 0;$$

$$z_\infty^{(2)} = \frac{w_2 - \sqrt{D}}{2(w_2 + w_{-2})};$$

$$z_\infty^{(3)} = \frac{w_2 + \sqrt{D}}{2(w_2 + w_{-2})}.$$

причем второе (среднее) неустойчиво. При $w_{-1} > 0$ все с.с. являются внутренними (критерий м.с.с. дан в [6–7]). Например, м.с.с. реализуется при $w_1 = 19$, $w_{-1} = 1$, $w_2 = 125100/1089 \approx 115$, $w_{-2} = 4100/121 \approx 341$. Границы области м.с.с.

$$w_1 = [w_1^{min}, w_1^{max}] \approx [18{,}93,\ 23{,}85],$$
$$w_2 = [w_2^{min}, w_2^{max}] \approx [80,\ 10000],$$
$$w_{-1} = [w_{-1}^{min}, w_{-1}^{max}] \approx [0,\ 2{,}85].$$

Вне этой области с.с. единственно и устойчиво (*рис.1*).

При $w_{-1} \approx w_{-1}^{min}$ (*рис.1a*) и $w_1 < \approx w_{1max}$ имеется одно граничное и два внутренних с.с. $z_\infty^{(1)} = 0$, $z_\infty^{(2)} \approx 0{,}2$; $z_\infty^{(3)} \approx 0{,}6$, причём второе (среднее) неустойчиво. При $w_{-1} > \approx w_1^{max}$ реализуется только граничное с.с. При $w_{-1} \in [w_{-1}^{min}, w_{-1}^{max}]$ (*рис.1в*) существует три с.с.: $z_\infty^{(1)} = 0{,}1$, $z_\infty^{(2)} \approx 0{,}122$, $z_\infty^{(3)} = 0{,}55$, причём второе с.с. (среднее) неустойчиво. Если $w_1 < \approx w_1^{min}$ реализуется только с.с. с большим значением (третье), например, при $w_1 = 18$, $z_\infty^{(3)} \approx 0{,}57$. Если $w_1 > w_1^{min}$ реализуется только с.с. с меньшим значением (первое), например, при $w_1 = 25$, $z_\infty^{(3)} \approx 0{,}05$. При $w_{-1} > \approx w_{-1}^{max}$ (*рис.1c*) м.с.с. исчезает и при любых w_1 существует только одно устойчивое внутреннее с.с.

Нестационарное поведение зависит от начальных условий $z(0) = z_0$, $w_1(0) = w_{10}$. В области неустойчивости система движется к ближайшему устойчивому с.с. монотонно или в режиме затухающих колебаний.

II) При наличии флуктуаций ($w_1 \neq$ Const) эволюция описывается двумя уравнениями (6a)–(6b). В двумерных системах уже могут возникать новые упорядоченные структуры (автоколебания). Рассмотрим несколько случаев.

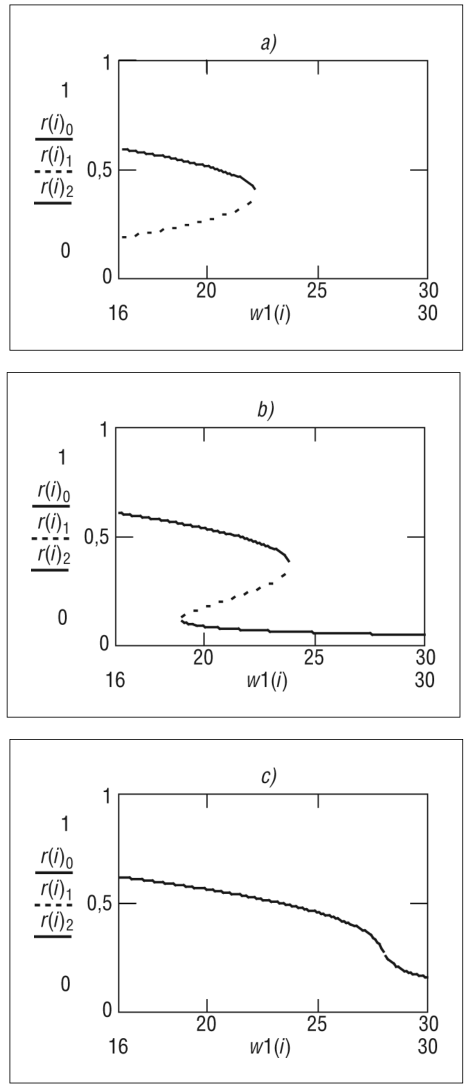

Рис.1. Триггер без флуктуаций. Стационарный портрет $z_\infty(w_1)$ при $w_2 = 115$, $w_{-2} = 341$: *a*) $w_{-1} = 0$; *b*) $w_{-1} = 1$; *c*) $w_{-1} = 2{,}9$

Случай 1. Флуктуации не зависят от макроскопических переменных:

$$dw_1/dt = g(\mathrm{w}_1). \qquad (6b')$$

В этом уравнении переменные разделяются, и решение запишется $t = \int g^{-1}(w_1)dw_1$. В частности при $g(w_1) = \alpha w_1$ решение имеет вид экспоненты $w_1 = w_{10}\exp(\alpha t)$, где α – константа. Отклик на затухающие периодические флуктуации $g(w_1)$ показан на *рис.2.*

Отклик на незатухающие периодические флуктуации показан на *рис.3.*

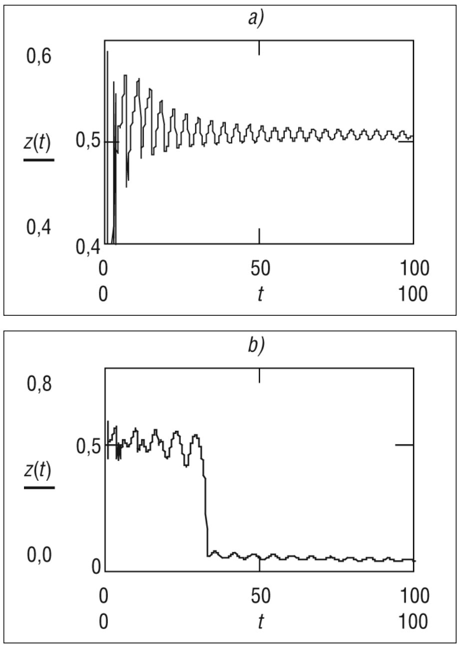

Рис.2. Отклик $z(t)$ на периодические флуктуации $w_1 = w_{10}(1 + b\sin(1 + \alpha t)/(1 + \gamma t)$ при $w_{10} = 19$: *a*) затухающие ($a = 1{,}5$; $b = 0{,}9$; $g = 1$); *b*) растущие ($a = 1$, $b = 0{,}1$; $g = 0{,}005$) – переход к «нижнему» с.с. $z^{(1)} = 0{,}1$

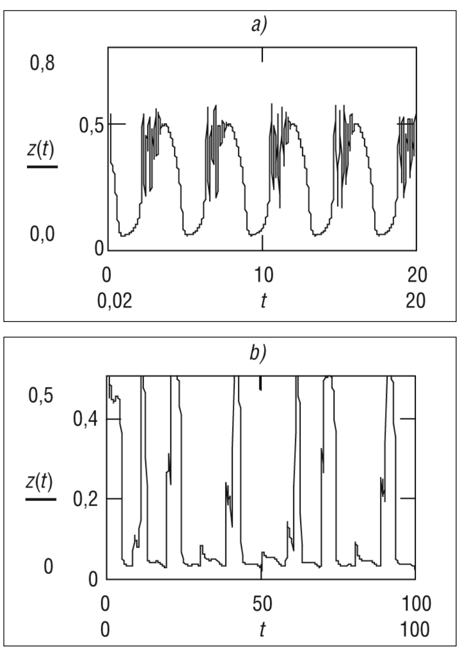

Рис.3. Отклик $z(t)$ на периодические незатухающие флуктуации при $w_{10} = 19$: *a*) регулярные $w_1 = w_{10}(2+b\sin(1 + \alpha t))$, ($\alpha = 1{,}5$, $b = 0{,}5$); *b*) нерегулярные $w_1 = w_{10}(1 + b\sin(1 + \alpha t)/(1 + \mathrm{mod}(t/10,1)$, ($\alpha = 1$, $b = 0{,}1$)

Из приведённых рисунков видно, что отклик системы «повторяет» характер флуктуаций. С усложнением флуктуаций осцилляции становятся более хаотичными, но такое поведение вполне ожидаемо. Периодические незатухающие флуктуации, зависящие только от времени, транслируют свои параметры на другие компоненты системы. Порождаемые автоколебания не являются самопроизвольными. Они не обусловлены внутренними механизмами и неустойчивостью.

Случай 2. В более общем случае флуктуации зависят и от макроскопических переменных (сильная обратная связь). Пусть $g(z,w_1)$ – линейная функция, тогда (6*b*) можно записать в виде

$$dw_1/dt = z + aw1 - b \equiv g(z,w_1), \qquad (6b'')$$

где $a,\ b > 0$ – константы.

Запишем уравнения стационарности $f = g = 0$ параметрически (w_{-1}, w_{-2}, a, b и z – параметры)

$$w_1=(b-z)/a,\ w_2=((b-z)/a-w_{-1}+ w_{-2}\, z^3)/\ (z^2\,(1-z)). \qquad (7)$$

Условие положительности w_1, w_2 запишется

$$b > \max\{z,\ z + a(w_{-1}(1-z) - w_{-2}\, z^2)/z). \qquad (8)$$

Вычислим коэффициенты характеристического уравнения $\lambda^2 + \Omega_1\lambda + \Omega_2 = 0$ расширенной системы (6*a*)–(6*b''*) с помощью соотношений (5''):

$$\begin{aligned}
&\Omega_1 = \sigma_1 + \Delta\sigma_1 = -(\partial f/\partial z + \partial g/\partial w_1),\\
&\sigma_1 = -\partial f/\partial z = 3(w_2 + w_{-2})z^2 - 2w_2 z + (w_1 + w_{-1}),\\
&\Delta\sigma_1 = -\partial g/\partial w_1 = -a,\\
&\Omega_2 = \partial f/\partial z \partial g/\partial w_1 - \partial g/\partial z \partial f/\partial w_1,\\
&\partial g/\partial w_1 = -z,\ \partial g/\partial z = 1.
\end{aligned}$$

Если $\Omega_1 < 0$, $\Omega_2 > 0$ то с.с. неустойчиво и единственно. Для этого необходимо

$$\begin{aligned}
&0 < w_{-1} < \min\{-3(w_2 + w_{-2})z^2 + 2w_2 z - w_1 + a,\\
&-3(w_2 + w_{-2})z^2 + 2w_2 z - w_1 + z/a\}. \qquad (9)
\end{aligned}$$

В двумерных системах внутри замкнутой траектории находится как минимум одна грубая особая точка типа фокус ($D \equiv \Omega_1^2 - 4\Omega_2 < 0$) или узел ($D > 0$) [8]. Для наличия фокуса необходимо

$$p/(3z^2) - 2\sqrt{z} < w_{-2} < p/(3z^2) + 2\sqrt{z}, \qquad (10)$$

где $p \equiv -3w_2 z^2 + 2w_2 z - (w_1 + w_{-1})$.

Соотношения (7)–(10) выражают необходимые условия возникновения незатухающих колебаний из осциллирующей неустойчивости в системе (6a)–(6b'') под влиянием флуктуаций. Если они не выполняются, то новые структуры не возникают. Если они выполняются, то при определённых значениях свободных параметров существуют автоколебания.

Пример. Условия (7)–(10) и требование единственности выполняются, например, при $a = 0{,}07$, $b = 0{,}43$, $z_{10} = 0{,}1$, $w_{10} = 3$ и $\omega_1 = 0{,}857$; $\omega_{-1} = 0{,}01$; $\omega_2 = 4{,}191$; $\omega_{-2} = 1$ (с$^{-1}$). При этом имеется единственное с.с. типа неустойчивый «фокус» с координатами $z_\infty = 0{,}37$; $w_{1\infty} = 0{,}857$ и возникают автоколебания. Стационарная скорость $r_\infty = 0{,}311$ (с$^{-1}$), период $T \approx 2\pi/\sqrt{\Delta} \approx 10$ (с). Эволюция нестационарных режимов при изменении параметра w_{-2} показана на *рис. 4*.

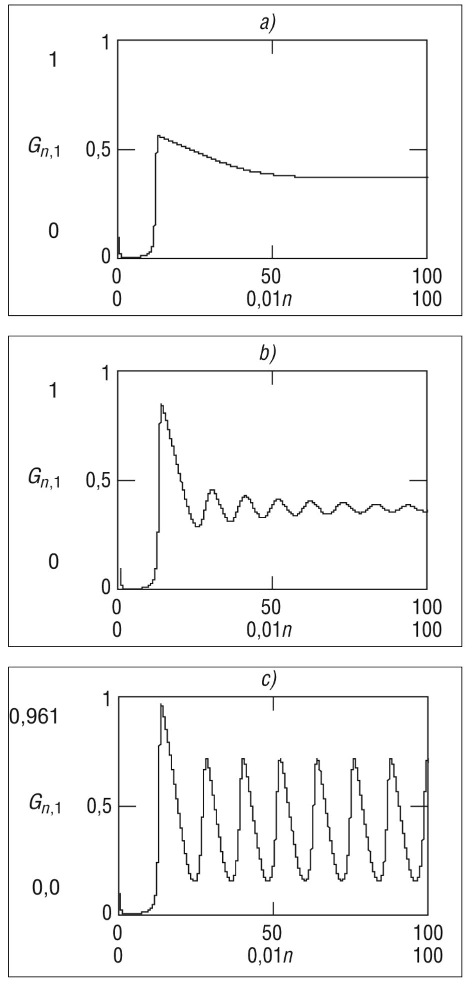

Рис.4. Триггер с флуктуациями $z(t)$:
a) узел ($\Omega_1 = 1{,}349$, $\Omega_2=0{,}271$, $D = 0{,}736$) при $w_{-2} \in [7{,}25]$;
b) устойчивый фокус ($\Omega_1= 0{,}045$, $\Omega_2=0{,}362$, $D = -1{,}446$) при $w_{-2} \in [1{,}8,\ 6]$;
c) неустойчивый фокус ($\Omega_1 = -0{,}172$, $\Omega_2 = 0{,}377$, $D = -1{,}479$) и автоколебания при $w_{-2} \in [0,\ 1{,}7]$

Как видно, упорядоченная структура возникает при уменьшении w_{-2} до минимума и существует в интервале $w_{-2} \in [0,\ 1{,}7]$. При обратном движении, т.е. с ростом w_{-2} автоколебания сохраняются в более широком диапазоне $w_{-2} \in [0,\ 3{,}5]$, затем затухают и переходят в монотонный режим. Аналогичная эволюция упорядоченности наблюдается и при изменении w_{-1}. Если условия (7)–(10) не выполняются, то при $w_{-1} \in [0{,}3,\ 2]$ существует устойчивый узел, при $w_{-1} \in [0{,}08,\ 0{,}2]$ – устойчивый фокус. При $w_{-1} \in [0{,}01,\ 0{,}07]$ выполняются условия (7)–(10) совместно с условием единственности и вновь возникают автоколебания. При обратном движении автоколебания переходят в затухающие, затем в монотонный режим. В данном случае осцилляции возникают спонтанно и являются самоорганизующейся структурой.

Исследуем зависимость Ω_1 от свободных параметров, вычислив частные производные

$$\partial\Omega_1/\partial w_{-1} = 1,$$
$$\partial\sigma_1/\partial w_{-2} = 3z^2 > 0,$$
$$\partial\Omega_1/\partial z = 6(w_2 + w_{-2})z - 2w_2,$$
$$\partial\sigma_1/\partial a = -1,$$
$$\partial\sigma_1/\partial b = 0.$$

Значит при уменьшении параметров w_{-1}, w_{-2} значение Ω_1 уменьшается. В области автоколебаний $w_{-1} \in [0{,}01,\ 0{,}07]$ и $w_{-2} \in [0,\ 1{,}7]$ минимальны. При этом значение $\Omega_1 \in [-0{,}175,\ 0]$ отрицательно и минимально, что *соответствует отрицательному избыточному производству энтропии.*

Таким образом, на примере модели естественного процесса в открытой неоднородной системе показано, что принудительное «смещение» системы в сторону минимизации избытка производства энтропии $\Delta S \rightarrow \min$ может привести к рождению самоорганизующейся структуры и появлению качественно нового, более высокоорганизованного состояния. Применительно к ИС это можно интерпретировать как проявление целесообразности, разумности, интеллекта.

Дополнительно можно использовать любые цели, специфичные для конкретной предметной области и субъективные интуитивные соображения, основанные на «здравом смысле» и опыте. Основная трудность остается в том, чтобы найти адекватную меру целесообразности в искусственных системах. Здесь возможен следующий эвристический подход. Между формальной записью многих законов природы существует аналогия, которую можно выразить простым эвристическим правилом – «интенсивность» процесса пропорциональна некоторой функции от «весов» его участников. Вид функции «интенсивности» может быть различным (произведение, сумма и др.) и зависит от системы координат, меры, метрики и т.д. Эту закономерность можно назвать принципом взвешенной пропорциональности.

Примеры. 1) В законе действующих масс [3] скорость взаимодействия $nA + mB \longrightarrow$ пропорциональна произведению концентраций $r = w[A]^n[B]^m$, где: w – вероятность; [A], [B] – концентрации A и B; n, m – число объектов A и B.

2) Мерой силы тяготения также является произведение $F = m_1 m_2 r^{-2}$.

3) В теории информации энтропия используется в качестве меры упорядоченности системы и определяется как сумма $H = -\Sigma p_i \log p_i$, $(i = 1,\ldots, n)$, где p_i – вероятность состояния; число возможных состояний ($\Sigma p_i = 1$); n – число состояний [9]. В логарифмической метрике $\ln(\prod x_i^{a_i}) = \Sigma a_i \ln x_i$, т.е. сумма и произведение одинаково информативны с точностью до метрики.

Критерий эволюции универсален и справедлив для широкого класса моделей природы и общества. Построенные на его основе решения могут быть использованы при разработке интеллектуальных компонентов информационных систем, способных самостоятельно принимать целесообразные решения на различных уровнях управления. ■

Литература

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – М.: Мир, 1973.
2. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М.: Мир, 1979.
3. Киперман С.Л. Введение в кинетику гетерогенных каталитических процессов. ? М.: Наука, 1964.
4. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. – М.: Наука, 1981.
5. Алексеев Б.В., Федотов В.Х., Кольцов Н.И. Стехиометрические условия неустойчивости каталитических реакций // ДАН СССР, 1989, т. 306, №4, с. 884-888.
6. Алексеев Б.В., Кольцов Н.И. Множественность стационарных состояний каталитической реакции // Известия ВУЗов. Хим. и хим. Технол., № 12, 1983, 26, с.1437-1440.
7. Федотов В.Х., Кольцов Н.И., Алексеев Б.В. Критерий множественности стационарных состояний одномаршрутных каталитических реакций // ДАН СССР, 1988, т. 302, № 1, с.126-131.
8. Федотов В.Х., Алексеев Б.В., Кольцов Н.И. Трехстадийные осцилляторы в гетерогенном катализе // Известия ВУЗов. № 5, 1985, 28, 66-68.
9. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963.