РАЗВИВАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

Александр Резник

Аннотация: *Развивающаяся система определена как детерминированная система, способная к размножению. Рассмотрена эволюция популяций таких систем в реальном окружении и показана возможность их интеграции в сложные макроситемы. Поведение развивающейся системы представлено моделью стохастической динамической системы. Предложено использованием инфинитезимального оператора для описания развития в компактной аддитивной форме.*

Ключевые слова: *развитие, система, информация, модель, генотип.*

Введение

Понятие развития можно относить к различным сущностям. Говоря о развитии растения, химической реакции или теории, мы имеем в виду различные объекты. В первом случае это материальный объект, во втором – процесс, а в последнем – понятие, существующее в сознании ученых. Во всех этих случаях речь идет о некоторых внутренних изменениях, при которых сущность объекта сохраняется. Поэтому подобные объекты можно рассматривать как своеобразные динамические системы, отличающиеся от обычных, определяемых в теории систем как отношения на множестве объектов [1], тем, что формально представить это первичное множество объектов невозможно. Изменения поведения системы могут быть связаны с адаптацией к неизвестным внешним факторам. Такие изменения могут быть представлены моделью целенаправленного поведения, содержащей заранее заданную цель и критерии ее достижения [2,3]. В этом случае для управления состоянием системы используются формальные правила, отвечающие этим критериям. Однако часто цель поведения, ни критерии ее достижения неизвестны. Смысл существования таких систем состоит в сохранении самих себя в реальных условиях окружения. Именно такие системы можно считать развивающимися [4].

Динамические системы и внешняя среда.

В общей теории систем динамическую систему определяют как многоместное отношение на множестве пар временных объектов $\{X_t, Y_t\}$: $X_t \in \Xi$, $Y_t \in \mathrm{H}$, $t \in T$. Здесь T - линейно упорядоченное множество моментов времени, X_t и Y_t - текущие значения входного и выходного объектов системы. Упорядоченность моментов времени позволяет представить это отношение последовательностью $\{X_t, Y_t, A_t\}$, где $A_t \in \Re$ - текущее состояние системы. Такое представление соответствует модели «черного ящика», в которой значения X_t и Y_t доступны для наблюдения, а состояние A_t является скрытым параметром системы. Поведение динамической системы описывают двумя соотношениями:

$$Y_t = F(X_t, A_t) , \tag{1}$$

$$A_t = \Phi(A_{t-\tau}, X_{t-\tau}^{t}) , \tag{2}$$

первое из которых называют уравнением вход/выход, а второе – уравнением состояний. Величина $X_{t-\tau}^{t} \in R^{n \times T}$ представляет реализацию n-мерного вектора X_t на интервале наблюдения $(t-\tau, t)$.

Состояние $A_t \in \Re \subset R^{n\times T}$ отражает предыдущее поведение системы. Мощность множества состояний $|\Re|$ характеризует степень сложности системы.

Выражения (1-2) определяют детерминированную динамическую систему. Считается что функции $F(.)$ и $\Phi(.)$ однозначно отображают элементы области определения, ($\Xi \times \Re$ и $\Re\times\Xi\times T$) в области значений (H и $\Re$, соответственно). Иногда допускается, что эти функции являются стохастическими, т.е. такое отображение не является однозначным и значение функции является случайной величиной. В этом случае содержание понятия система становится неопределенным.

Реально динамическая система существует в некотором окружении, соответствующем инверсной динамической системе, выход которой является входом данной системы, а вход - ее выходом. Предполагается что окружение намного сложнее данной системы, поэтому состояние инверсной системы $B_t \in \aleph$ при $|\aleph| >> |\Re|$ не зависит от состояния данной системы. Уравнения вход/выход окружающей среды можно представить как инверсию формулы (1)

$$X_t = F^*(Y_t, B_t)\,. \tag{3}$$

Условием сосуществования системы и ее окружения является выполнение равенства:

$$Y_t = F[F^*(Y_t, B_t),\ A_t]\,. \tag{4}$$

Данное условие равнозначно требованию эквивалентности множеств $\aleph \equiv \Re$, что противоречит исходному предположению о независимости текущих состояний системы и ее окружения. Если отказаться от требования $\aleph \equiv \Re$, то выполнение условия сосуществования становится случайным событием. Это условие может выполняться в пределах конечного интервала θ для случайного значения реализации входа $X_{t-\theta}^{t}$, при котором поведение системы и ее окружения согласуются. Интервал θ, определяющий время жизни детерминированной системы в реальном окружении, является случайной величиной, зависящий от текущего значения реализации входа $X_{t-\theta}^{t}$.

Общая теория систем базируется на неявном предположении о том, что внешняя среда является открытой системой. Состояние такой системы не определено, поэтому считается, что внешняя среда не влияет на поведение детерминированной системы, заданной формулами (1-2). Во многих случаях это предположение оправданно, поскольку влияние окружения оказывается незначительным. Исключение, до последнего времени, составляли лишь явления микромира, для которых оказалось невозможным проводить наблюдения, не влияя на поведение наблюдаемых объектов. Чтобы обойти эту проблему, было введено соотношение неопределенности, позволившее вместо детерминированной модели системы использовать статистическую квантовую модель явлений микромира. Хотя попытки применить квантовую модель для более широкого класса систем (см., напр. [5]) особого успеха не имели, тем не менее статистический подход к описанию поведения систем получил развитие в теории адаптивных систем, стохастических автоматов, распознавании образов [2,3,6].

Фундаментальные и развивающиеся системы

Принятое в общей теории систем предположение об открытости окружения эквивалентно допущению, что внешняя среда заведомо удовлетворяет условиям (4). Это равнозначно наличию некой капсулы, изолирующей систему от внешнего мира, при условии, что окружение внутри капсулы представляет собой инверсную систему. Решениями уравнения (4) в этом случае являются собственные функции внутренней среды капсулы. Для выполнения условий согласованности функции F(.) и F*(.) должны отвечать этим решениям, и допускать разложения по собственным функциям внутри капсулы Системы, отвечающие этим требованиям, будем называть фундаментальными системами для внутреннего пространства капсулы. Из них могут быть построены любые системы, способные существовать в этом пространстве. Если капсула охватывает все пространство, то фундаментальные системы воплощают общие законы. Например, долгоживущие элементарные частицы, отражающие фундаментальные законы Природы.

Существование, наряду с долгоживущими, также и короткоживущих элементарных частиц указывает на то, что одна и та же среда может содержать как фундаментальные системы, так и нефундаментальные системы, назовем их реальными, для которых условия согласованности могут нарушаться. Реальная система не является детерминированной, поскольку для продолжения существования после нарушения условия (4) данный экземпляр системы должен заменяться другим, начальное состояние которого заведомо удовлетворяет этому условию. Поведение такой системы представляет релаксацию - чередование спокойных (латентных) периодов скрытого накопления изменений и скачкообразных переходов в новое начальное состояние.

В общем случае скачкообразные изменения состояния детерминированной системы можно представить как действия некой суперсистемы, проверяющей выполнение условий согласования (4) и приводящей в действие механизм релаксации при их нарушении. Этот механизм может воздействовать как на данную систему, так и на ее локальное окружение. В первом случае создаются копии системы, отличающиеся начальным состоянием, и отбираются наиболее удачные экземпляры. Во втором случае предполагается, что скачок состояния выполняет локальное окружение данной системы, отделенное от внешнего мира капсулой. Иначе говоря, функции развивающейся выполняет не детерминированная система, а ее локальное окружение. Скачкообразное изменение состояния может происходить как перемещение границ капсулы или обмен элементами между внутренней и наружной средой капсулы. Это соответствует обмену веществ, наблюдаемому в живой природе.

Системы, способные преодолевать нарушение условий согласования (4) путем скачкообразного изменения своего состояния, будем называть развивающимися системами. Очевидно, это достаточно сложные, возможно, уникальные системы. До настоящего времени подобные долгоживущие системы встречаются только в живой природе. Безрезультатность предпринятых до сих пор попыток найти проявления жизни за пределами Земли лишь подтверждает уникальность таких систем.

Простейшей развивающейся системой, является популяция, члены которой (индивиды) представляют собой элементарные системы. Динамику изменения распределения численности популяции описывает стохастическая составляющая поведения развивающейся системы. Детерминированная составляющая поведения характеризует поведение членов популяции в пределах времени их жизни. Процесс эволюции начался, вероятно, с появления нефундаментальных систем, способных к релаксации, из которых образовались примитивные системы, способные к размножению. Рост популяций таких систем приводил к заполнению пространства вокруг каждой из них другими подобными ей системами и усилению их взаимного влияния внутри популяции. Имея одинаковый генотип, примитивные системы могли интерпретировать реакции соседей и соответственно изменять собственные реакции. В ходе эволюции простейшие развивающиеся системы приобретали способность координировать реакции членов своих популяций на воздействия внешней среды. В результате этого происходила интеграция популяций, их превращение в целостные макросистемы. Популяции примитивных систем образовывали примитивные макросистемы. В ходе эволюции из популяции примитивных макросистем возникали более сложные, что вело к формированию иерархии все более сложно организованных организмов, представляющих современную живую природу.

На вход каждого члена макросистемы действует композиция, состоящая из реакций других членов и воздействий внешней среды:

$$X_t^i = G^i V_{t_0}^t \oplus \Xi_t^i , \qquad (5)$$

где: $V_{t_0}^t = \{v_\theta^1,..v_\theta^k,..v_\theta^K\}_{t_0}^t$ - реализация совместной реакции K членов макросистемы;

G^i - оператор Грина;

Ξ_t^i - воздействие внешней среды на *i*-го члена макросистемы в момент времени *t.*

Составляющую вектора X_t^i можно представить в развернутом виде:

$$x_t^i(j) = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^K g(r^{i,j} - r^k, \tau) v_{t-\tau}^k d\tau + \xi_t^i(j) , \qquad (6)$$

где: $r^{i,j}, r^k$ - координаты *j* -го входа *i*-й и выхода *k*-го члена макросистемы;

$g(r^{i,j} - r^k, \tau)$ - передаточная функция окружающей среды;

$\xi_t^i(j)$ - составляющая воздействия внешней среды на *j*-й вход *i*- го члена макросистемы.

Соотношения между членами композиции (5) для различных членов макросистемы могут существенно отличаться. Эти различия минимальны в дисперсных макросистемах, состоящих из удаленных друг от друга элементарных систем. Для них преобладающим является влияние внешней среды. Примером дисперсной макросистемы может служить колония бактерий, для которой объединяющим фактором являются условия общей внешней среды. Размножение бактерий осуществляется путем деления индивидов, которые выжили на протяжении латентного периода. Деление обеспечивает передачу эстафеты жизни наследникам и почти не влияет на условия существования остальных бактерий колонии.

В консолидированных макросистемах, будем называть их организмами, состоящих из тесно расположенных членов популяции, поведение каждого из них больше зависит от реакций соседей, чем от воздействия внешней среды. При этом соотношение между составляющими входного воздействия зависит от позиции внутри организма. Для периферийных членов преобладающим является влияние внешней среды, тогда как для членов, находящихся внутри организма, это влияние может быть ничтожным. Внешние воздействия поступают внутрь организма в опосредствованной форме реакций пограничных элементарных систем. Для интерпретации этих реакций требовалось усложнение и функциональная специализация элементарных систем, образующих организм. Примеры такой специализации можно наблюдать в строении многоклеточных живых организмов. В процессе индивидуального развития организма клетки, находящиеся в различных условиях относительно внешнего окружения специализируются для выполнения различных функций. Например, клетки, непосредственно контактирующие с внешней средой, выполняют функции рецепторов и эффекторов. Функцией рецепторов является формирование внутреннего представления действующих извне стимулов для остальных клеток, специализирующихся на выполнении других функций живого организма. Эффекторы формируют общую реакцию организма. Специализация клеток происходит в ходе индивидуального развития организма, поэтому все клетки организма обладают одинаковым генотипом, заданным зародышевой клеткой.

Появление многоклеточных организмов знаменовало новый этап эволюционного процесса. В отличие от примитивных размножающихся систем, являющихся детерминированными, с конечным временем жизни, каждый организм представляет собой растущую популяцию, и его поведение меняется вместе с ростом популяции. Как и детерминированная система, организм отвечает модели «черного ящика», т.е. имеет вход и выход, доступные для наблюдения, и ненаблюдаемое внутреннее состояние. Однако, в отличие от детерминированной системы, состояние которой однозначно зависит от реализации на входе, состояние организма определяется совокупностью состояний многочисленных членов популяции.

Стохастические динамические системы

В предлагаемой модели стохастической динамической системе (СДС) поведение рассматривается как изменение закона распределения вероятностей для состояния членов популяции. Членами популяции (индивидами) могут быть детерминированные системы, либо более простые СДС. Примитивными будем считать СДС, индивидами которых являются детерминированные элементарные системы.

Поведение индивида определяет генотип ЭС – не зависящая от времени условная вероятность $\Delta(Y/X,A)$, где Y,X - значения выхода и входа, $A\in\Re$ - состояние ЭС. В СДС понятие состояния ассоциируется не с величиной A, как в детерминированной системе, а с текущим распределением вероятностей состояния индивидов $P_t(A)$. В примитивной СДС генотип представляет дельта-функция

$$\Delta(Y/X,A)=\delta\big(Y-F(X,A)\big),$$

что соответствует детерминированному уравнению вход/выход (1).

Стохастическим эквивалентом уравнений вход/выход и состояния являются [4,7]:

$$P_t(Y/X)=P_t(A)\Delta(Y/X,A), \tag{7}$$

$$P_t(A)=P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t}) \tag{8}$$

где: $Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t})$ - стохастический оператор развития, описывающий марковский процесс перераспределения состояний индивидов при поступлении реализации $X_{t-\tau}^{t}$.

Легко показать, что СДС представляет обобщение детерминированной системы. Для этого достаточно представть уравнения (5,6) дельта-функциями:

$$\begin{array}{c}\Delta(Y/X,A)=\delta\big(Y-F(X,A)\big)\\ P_t(A)=\delta\Big(A_t-\Phi(A_{t-\tau}X_{t-\tau}^{t})\Big)\end{array}. \tag{9}$$

Очевидно, что полученные соотношения идентичны формулам (1, 2).

Если значения оператора развития не зависят от времени, то марковский процесс, описываемый уравнением (6) становится стационарным, и для него может существовать финальное распределение $P_\infty(A)$. Рассмотрим случай, когда оператор развития допускает представление

$$Q(A_{t-1},A_t,X_{t-1}^{t})=\alpha E+(1-\alpha)\Lambda, \tag{10}$$

где: *E* – единичный оператор $\Re$ x $\Re$, *α* – константа 0< *α*<*1*, Λ – стохастическая матрица:

$$\Lambda=\begin{bmatrix}\lambda_1 & \lambda_1 & \dots & \lambda_1\\ \lambda_2 & \lambda_2 & \dots & \lambda_2\\ \dots & \dots & \dots & \dots\\ \lambda_R & \lambda_R & \dots & \lambda_R\end{bmatrix}, \qquad \sum_{i=1}^{\Re}\lambda_i=1. \tag{11}$$

В этом случае формула (7) приобретает вид:

$$P_{t_T}(A) = \alpha^T P_{t_0}(A) + (1-\alpha^T)\lambda = \xrightarrow[t_T \to \infty]{} \lambda\,, \tag{12}$$

где λ - вектор-столбец матрицы Λ.

Полученное выражение описывает стохастическую модель обучаемости [8], применяемую при изучении динамики выработки условного рефлекса у подопытных животных.

Уравнения (7-8) отражают точку зрения внешнего наблюдателя, рассматривающего реализацию $X_{t-\tau}^{t}$ как причину изменения распределения $P_t(A)$. С точки зрения самой СДС окружающая среда является внешней системой, реагирующей на реакции СДС. Поведение внешней среды описывается стохастическими уравнениями

$$P_t(X/Y) = P_t(B)\nabla(X/Y,B)\,; \tag{13}$$

$$P_t(B) = P_{t-\tau}(B)R(B_{t-\tau},B_t,Y_{t-\tau}^{t})\,, \tag{14}$$

где: $\nabla(X/Y,B)$ - генотип внешней среды;

$P_t(B)$, - текущее распределение состояний индивидов внешней среды;

$R(B_{t-\tau},B_t,Y_{t-\tau}^{t})$ - оператор развития для внешней среды.

Уравнения (13-14) представляют стохастическую модель, которую можно выбрать так, чтобы множества состояний индивидов СДС и ее окружения совпадали $A \equiv B \in \Re$. Такую модель будем называть собственной моделью внешней среды. Для собственной модели можно сформулировать соотношения, аналогичные условиям согласованности (4) для детерминированной системы:

$$Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t}) = R(B_{t-\tau},B_t,Y_{t-\tau}^{t})\,. \tag{15}$$

Смысл данного соотношения состоит в том, что различие в поведении СДС и ее окружения выражается как несоответствие собственной модели реальной внешней среде. Возникающее вследствие этого расхождение между прогнозируемым на основе реализации $Y_{t-\tau}^{t}$, и реальным значениями входа СДС может служить сигналом для соответствующего изменения состава популяции.

Инфинитезимальный оператор

Полагая, что распределение вероятностей состояний $P_t(A)$ является непрерывной функцией времени, найдем производную:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[P_t(A)\right] = P_{t-\tau}(A)\frac{\partial}{\partial t}Q(A_{t-\tau},A_t,X_{t-\tau}^{t})\,. \tag{16}$$

Если на интервале времени $(t-\tau,t)$ эта производная существует, то можно найти ее предел:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[P_t(A)\right] \xrightarrow[\tau \to 0]{} P_t(A)H(A_t,X_t) \tag{17}$$

Величина $H(A_t,X_t)$ является инфинитезимальным оператором СДС, представляющим скорость изменения вероятности пребывания индивида системы в данном состоянии при текущем значении входа системы. Отрицательное значение $H(A_t,X_t)$ указывает на рост вероятности гибели индивида, а позитивное - на необходимость увеличения числа индивидов в состоянии A_t, т.е. их размножения.

Если $P_t(A) \neq 0$, (это справедливо, если в популяции представлены все возможные состояния $A_t \in \Re$), дифференциальное уравнение (14) имеет решение:

$$P_t(A) = P_{t_0}(A)\exp\left[\int_{t_0}^{t} H(A_\theta, X_\theta)\partial\theta\right]. \tag{18}$$

Интеграл в показателе экспоненты описывает процесс накопления изменений поведения СДС в ходе ее эволюции. Аддитивный характер изменений и их зависимость от текущих значений входа СДС X_t, позволяет интерпретировать такие изменения, как накопление информации о поведении окружающей среды. Действительно, количество информации, получаемой СДС, при поступлении на ее вход значения X_t определяется выражением:

$$\begin{gathered} h(A_t, X_t) = \xrightarrow[\tau\to 0]{} \sum\nolimits_{\Re}\{P_t(A)\log[P_t(A)] - P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^{t})\log[P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^{t})]\} = \\ = -\sum\nolimits_{\Re} P(A_t)H(A_t, X_t) \end{gathered} \tag{19}$$

Соотношения, аналогичные (16-18) можно получить и для внешней среды:

$$\begin{gathered} \frac{\partial}{\partial t}\left[P_t(B)\right] = P_t(B)G(B_t, Y_t) \\ P_t(B) = P_{t_0}(B)\exp[\left[\int_{t_0}^{t} G(B_\theta, Y_\theta)\partial\theta\right] \end{gathered} \tag{20}$$

Здесь величина оператора $G(B_t, Y_t)$ характеризует влияние реакции индивида популяции на изменение распределения состояний внешней среды. Для собственной модели внешней среды значения инфинитезимальных операторов СДС и ее окружения совпадают:

$$H(A_t, X_t) = G(A_t, Y_t). \tag{21}$$

Такая связь между текущими значениями инфинитезимального оператора может использоваться для внешнего управления поведением СДС. Для этого значения $G(A_t, Y_t)$ должны поступать в нее извне, например, в форме дополнительной компоненты входа X_t. Такое управление соответствует обучению с подкреплением.

Развитие консолидированных макросистем

Областью приложения теории СДС являются организмы - консолидированные макросистемы, которые, в отличие от простейших и дисперсных развивающихся систем, являющихся однородными популяциями, представляют экземпляр единственной популяции, жизнь которой начинается с зародышевой ЭС и заканчивается при исчерпании возможности ее дальнейшего роста. Вначале развития организма увеличивается численность популяции и происходит специализация ее членов в соответствии с их расположением внутри организма. В этой фазе развития организм требует особой защиты от окружения, которое может влиять на образование и специализацию новых членов популяции. Поэтому начальный этап развития происходит в искусственном окружении. На высоких стадиях эволюции таким окружением является утроба матери или оболочка яйца, а после появления на свет – сообщество, т.е. множество окружающих организмов, поддерживающих развитие новых членов до достижения ими стадии зрелости, когда они смогут производить зародышевые элементарные системы, воспроизводящие генотип данного организма.

Коллективное существование макросистем в форме сообществ, состоящих из организмов, находящихся в различных стадиях развития, требовало развития средств коммуникации между членами сообщества, создавало условия конкуренции, в которых преимущество получали члены сообщества, способные лучше и быстрее реагировать на окружающую обстановку. Это привело к появлению нервной системы, что стало поворотным пунктом эволюции.

До появления нервной системы каждый организм оставался детерминированной системой, поэтому изменения его поведения могло происходить лишь путем размножения- гибели, т.е. естественного отбора экземпляров с необходимыми свойствами. С появлением нервной системы организмы приобрели способность моделировать различные варианты поведения и проверять их, пользуясь моделью внешнего мира, запечатленной в их памяти. Имея нервную систему, каждый организм мог оперативно изменять свое поведение, реагируя на изменения окружения. Подобные изменения поведения при отсутствии нервной системы, потребовались бы многих поколений развития.

Появление нервной системы не только ускорило эволюционный процесс, но и сделало его намного более экономным, поскольку отпала необходимость в громадном увеличении численности популяций. Соответственно сократилась нагрузка на окружающую среду, что высвободило ее ресурсы для ускорения эволюции. Высокоразвитые организмы получили возможность активно использовать окружающую среду для улучшения условий инкапсуляции. Преобразование локального окружения способствовало появлению сознательного труда, формированию интеллекта. Дальнейшее все ускоряющееся развитие организмов привело к образованию цивилизации, формированию индустриального и постиндустриального общества.

В эпоху цивилизации взаимодействие организмов с окружением можно рассматривать как симбиоз, в котором объекты окружения приобретают свойства самостоятельных развивающихся систем, а сообщество - среды, способствующую их существованию. Образуется мир виртуальной реальности, наполненный виртуальными развивающимися системами, которые готовы или вынуждены поддерживать члены сообщества. Виртуальными системами могут быть такие объекты как: технологии, виды деятельности, идеи и верования, социальные движения, и т.п. Вовлекая сообщество в свою поддержку, они приобретают свойства самостоятельных развивающихся систем, существующих в благоприятном окружении создаваемом вниманием и усилиями его членов. Убедительными примерами виртуальных систем может служить развитие технологий, вооружений, машин, компьютеров и т.п. Разработчики и производители подобных объектов образуют, по сути, генотип сложного развивающегося организма. Занятые совершенствованием своего детища, созданием новых, более эффективных его поколений, они образуют ядро большой системы, включающей также подсистемы кооперации, торговли и рекламы, которые заняты преобразованием сообщества в среду, благоприятную для процветания этой системы. Подобной схеме отвечает развитие любой крупной системы от промышленной корпорации или научной лаборатории до политического движения или партии. В последнем случае генотип системы определяется амбициями лидеров, скрытыми за оболочкой из привлекательных для сообщества лозунгов.

Если прослеживать развитие исторических событий, технологических проектов, научных теорий или политических интриг, то везде можно обнаружить существование популяций, индивидами которых являются участники или последователи. В развитии таких популяций существуют периоды роста, зрелости, деградации или перерождения, которые легко прослеживаются на графиках показателей развития, которые выглядят практически одинаково, идет ли речь о популяции динозавров [9], доходах корпорации [10], количестве публикаций или числе сторонников [11,12].

Библиография

1. М. Месарович, Я. Такахара Общая теория систем. Математические основы. – М. Мир. 1978. – 311с.

2. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М. Наука. 1968. –399с.
3. Срагович В.Г. Теория адаптивных систем. - М. Наука. !976. – 317с.
4. Різник О.М. Загальна модель розвитку. // Математичні машини і системи. -2005. -№ 1. –С. 84-98.
5. Хелстром К. Квантовая теория проверки гипотез и оценивания. – М. Мир. 1979. – 344с.
6. Vapnik V.N. Statistical learning theory. - John Willey & sons inc. 1998, - 736p.
7. А.М. Резник Многорядные динамические перцептроны / в кн. Перцептрон- система распознавания образов, ред. А.Г. Ивахненко. –Киев. Наукова Думка. 1975.- с. 243-292.
8. Буш Р., Мостеллер Ф. Стохастические модели обучаемости. – М. ГИФМЛ. 1962. – 483с.
9. Грант В. Эволюция организмов. –М. Мир. 1980.-407с.
10. Янч Э. Прогнозирование научно-технического прогресса.
11. Кун Т.. Структура научных революций. - М. Прогресс. 1975.- 246с.
12. Михайлов А.И., Черный А.И., Гиляревский Р.С. Научные коммуникации и информатика. – М. Наука. 1976 435с.

Информация об авторе

Александр Михайлович Резник – Институт математических машин и систем НАН Украины, зав. отделом нейротехнологий, Киев просп. Академика Глушкова 42, e-mail neuro@immsp.kiev.ua