

Универсальная программа природы - адаптивное управление. Структура и алгоритм программы, практические приложения

А.А. ЖДАНОВ
профессор, д.ф.-м.н.

Институт точной механики и вычислительной техники
им. С.А. Лебедева (ИТМиВТ), Москва

Autonomous Adaptive Control Lab (AAC Lab)

aazhdanov@ipmce.ru <http://www.ipmce.ru>
<http://www.aac-lab.com>

Адаптивность в природе

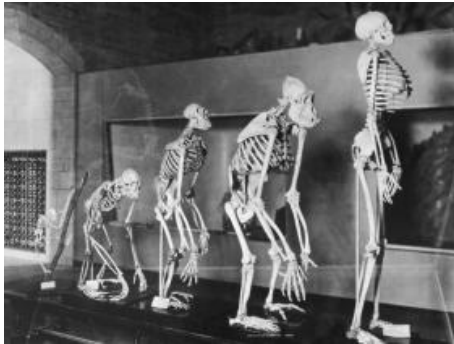
В природе мы видим, что **все биологические объекты обладают свойством адаптивности**. Все механизмы эволюции и системы управления в природе адаптивны.

И виды и отдельные индивиды постоянно приспосабливаются к условиям своего существования.

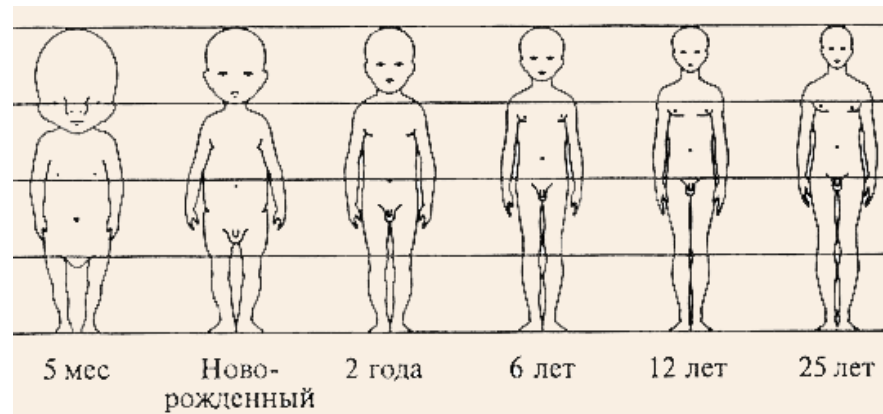
Специальный интерес представляет мозг, который один может решать самые разные задачи – благодаря своим адаптивным свойствам.



Эволюция вида (филогенез) – от поколения к поколению



Эволюция индивида (онтогенез) – в течение жизни индивида



Механизмы эволюции и адаптации в природе

Филогенез (развитие вида):

Биологические виды животных и растений эволюционируют и адаптируются за счет **генного механизма передачи наследственности** (мутации и скрещивание признаков) и **естественного отбора** наиболее удачных (приспособленных) вариантов (неудачных съедают).

Онтогенез (развитие индивида):

Тело отдельного индивида адаптируется за счет специальных физиологических механизмов коррекции роста и функций.

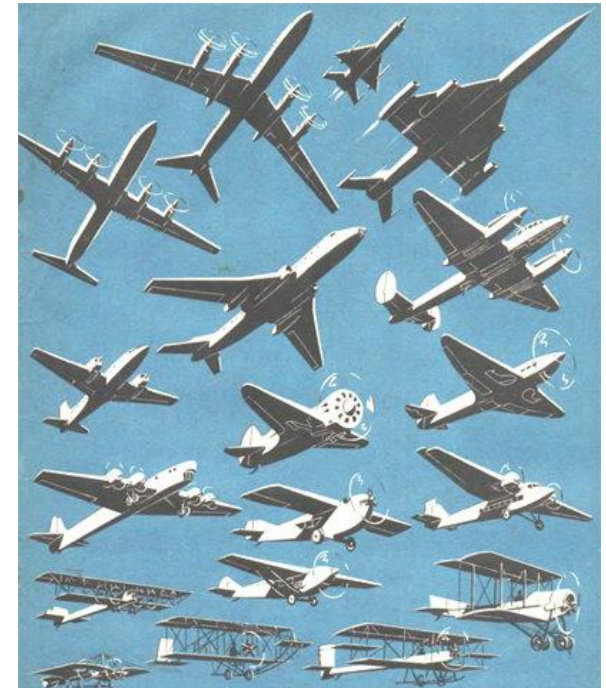
Мозг индивида адаптируется за счет способности к **самообучению** – это специальная самообучаемая программа адаптивного управления.

Механизмы эволюции и адаптации в технике

Филогенез (развитие вида):

В технике фактически тоже имеет место механизм естественного-искусственного отбора наиболее удачных вариантов (неудачные конструкции разбиваются).

А также аналог **генного механизма передачи наследственности** (мутации и скрещивание признаков) – через информацию в технической документации (хромосомы☺).
Однако этот процесс идет не автоматически, а посредством человека.



Онтогенеза (развития индивида) в наших машинах нет

В техносфере мы видим полное отсутствие адаптивных (самоприспосабливающихся) машин

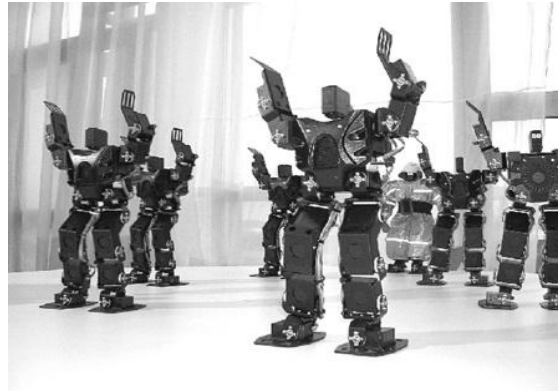
Наши машины рождаются сразу «взрослыми» и «умными», и в течение жизни ничему не учатся, постепенно разрушаясь



Он умер потому
что так ничему и
не научился...

Сегодня адаптивных машин практически нет

Видел ли кто-нибудь, как обучаются роботы?

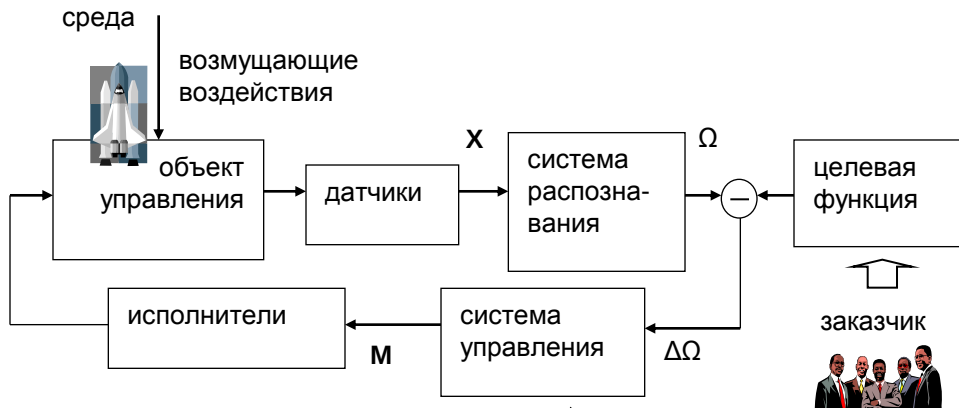


Никто не видел. Так как **роботы не обучаются**, в отличие от живых организмов. Роботы работают по детерминированным программам.

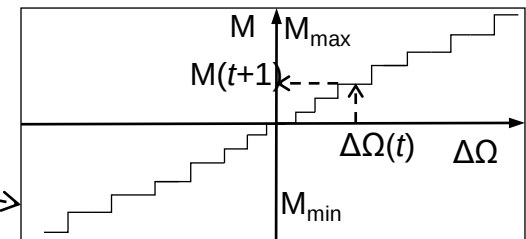
Причины отсутствия адаптивных машин и программных систем сегодня

1. Научные причины
2. Технологические причины
3. Психологические причины

В технике сегодня системы управления строятся в подавляющем большинстве случаев на детерминистических (или вероятностных) принципах



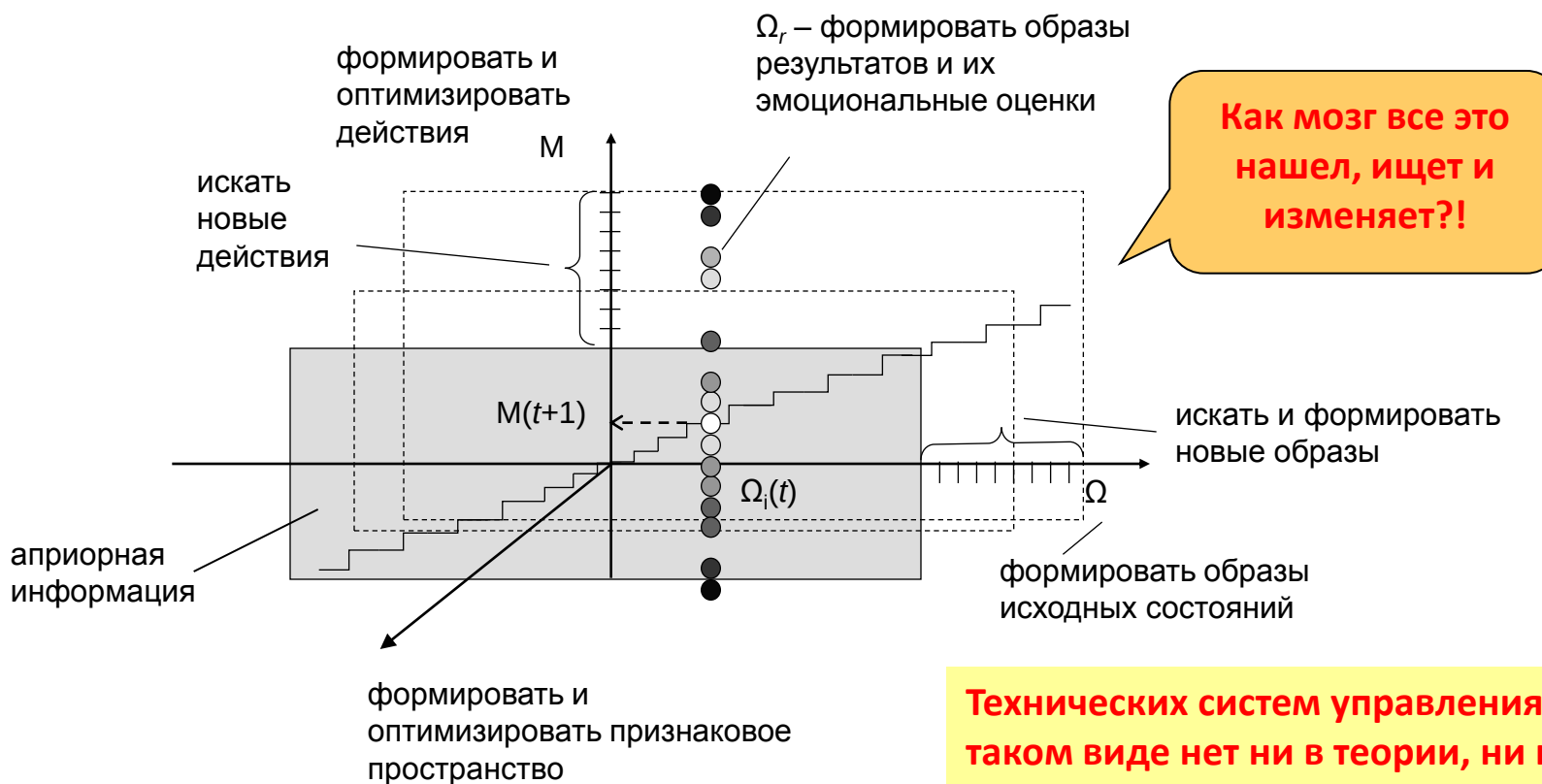
Типовая схема системы управления



Пример «закон управления»

Задача поиска закона управления и принятия решений в общем виде

Априорные элементы “железа” и «программ» системы управления определяются в процессе эволюционного развития «вида», а конкретная информация, реализующая адаптацию - в процессе развития индивида, его мозгом

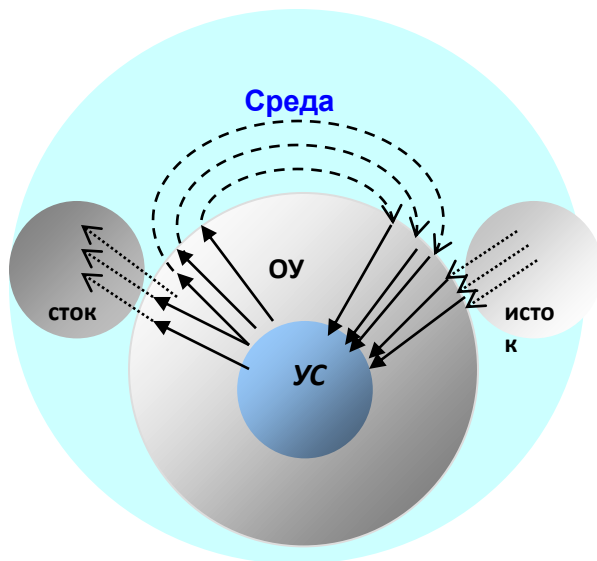


Технических систем управления в таком виде нет ни в теории, ни на практике (кроме системы ААУ)

Научные методы, обычно используемые для построения управляющих систем, не обеспечивают автоматической адаптации, либо решают проблему только частично

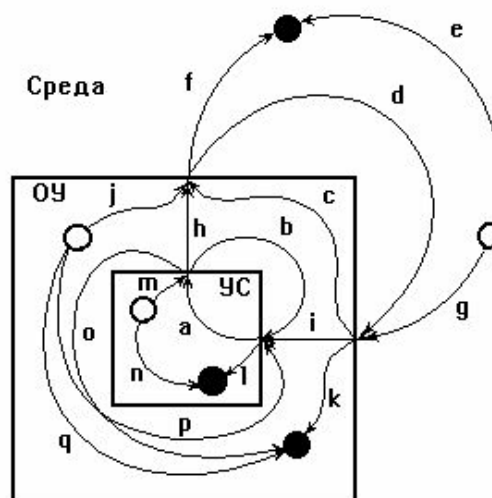
- Системы распознавания
- Fuzzy logic (нечеткая логика)
- Markov Decision Processes (MDP) (марковские процессы)
- Bayes rule (Байесовские правила)
- Entropy Maximum method (метод максимальной энтропии)
- Hybrid systems (гибридные системы)
- Artificial neural networks (нейросети)
- PID controllers (ПИД-регуляторы)
- Reinforcement learning (обучение с подкреплением)
- и другие методы Data Mining

Концептуальная модель нервной системы – система «Автономного Адаптивного Управления» (ААУ)



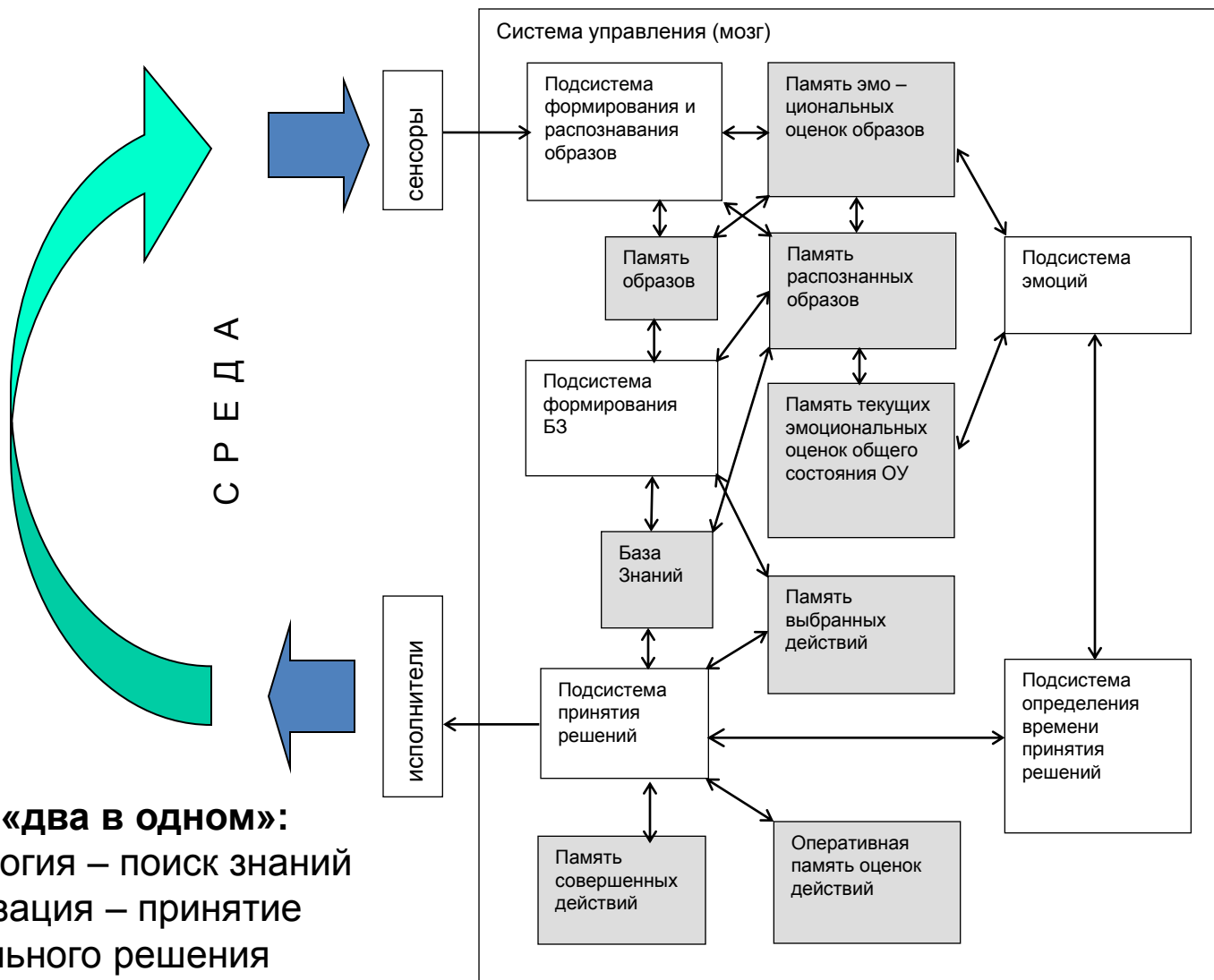
Целевые функции мозга:

1. Выживание
2. Накопление знаний



Жданов А.А.
Автономный искусственный интеллект.
 Монография. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.

Состав и структура системы ААУ –самообучаемого распознающе-управляющего комплекса



Алгоритм «два в одном»:

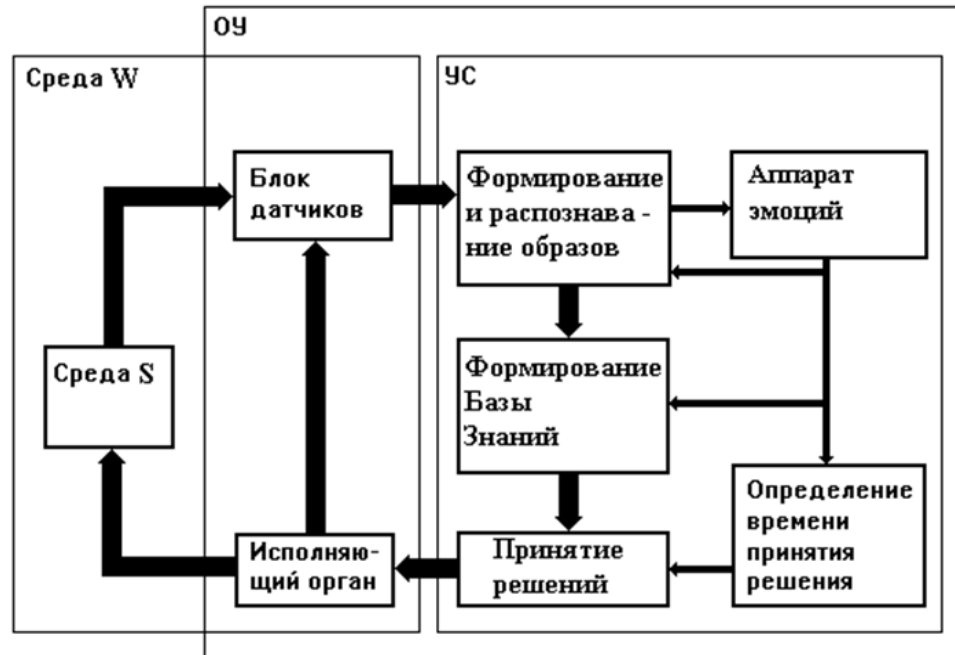
1. Гносеология – поиск знаний
2. Оптимизация – принятие оптимального решения

Состав и структура системы ААУ –самообучаемого распознающе-управляющего комплекса (в более лаконичном варианте)



Принцип действия: поиск и использование статистически достоверных **отображений** между дискретными множествами входных и выходных сигналов, а также качественных оценок

Среда U



1. Обратные связи
2. Самообучение на основе накопления статистики
3. Сильное влияние эмоциональных оценок на все процессы

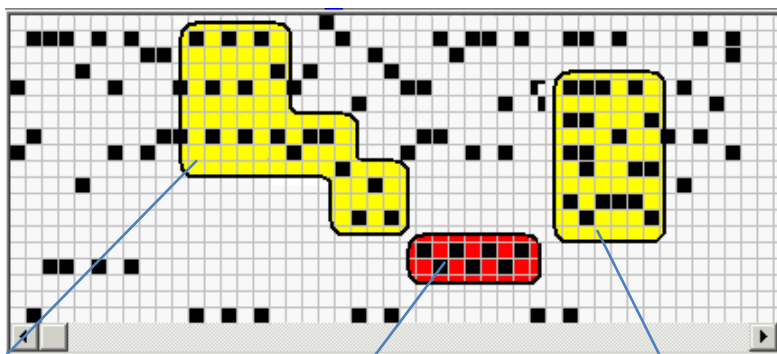
Управление на основе поиска закономерных отображений между множествами сигналов



Множества **дискретных** объектов: образов, действий и качественных (эмоциональных) оценок.

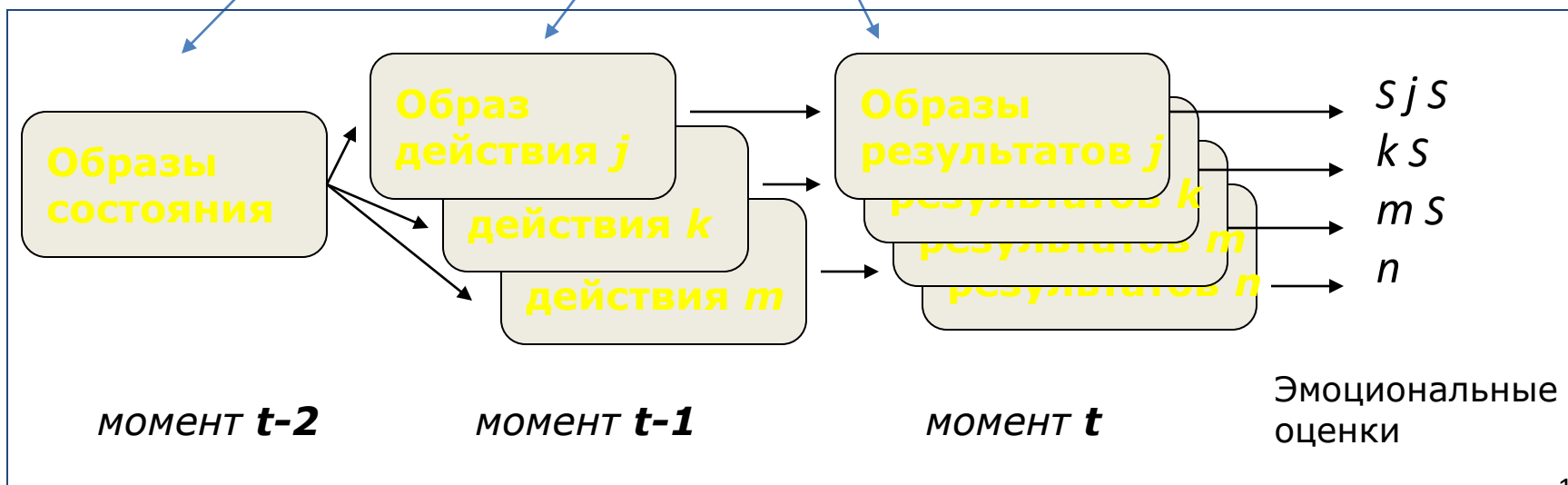
Отображения между множествами, **отражающие причинно-следственные связи** образов, действий и эмоциональных оценок.

История эволюции объекта



База Знаний складывается из множества структурированных эмпирически найденных элементарных знаний

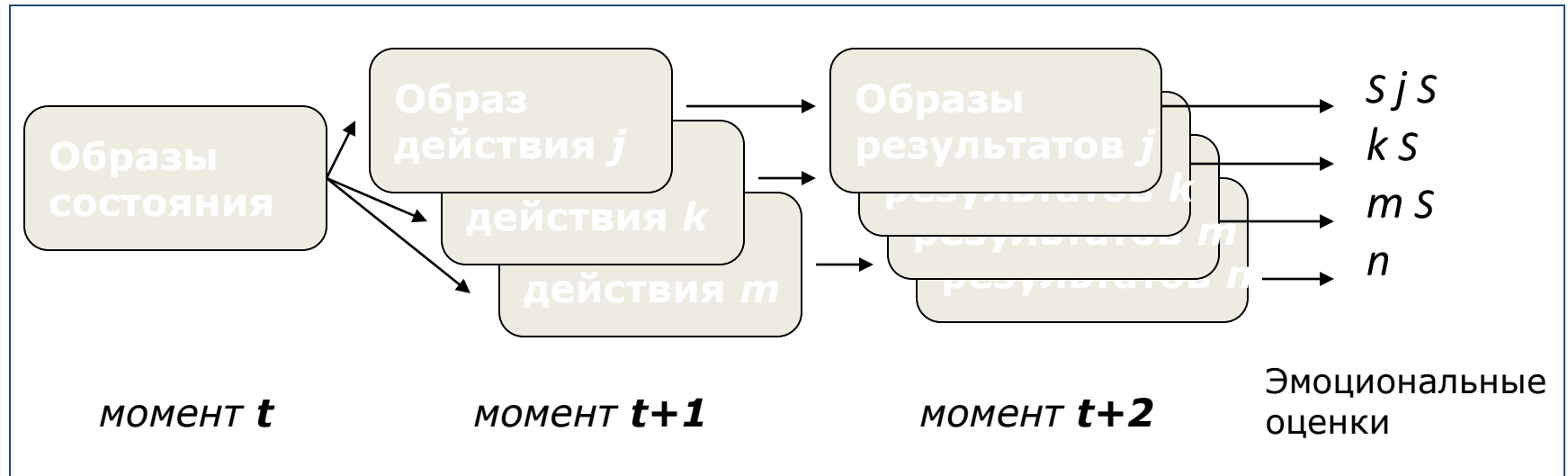
Элементарное знание



Принятие решений



- состоит из упреждающего распознавания образов – элементарных знаний



Распознавание текущих условий – образов и эмоциональных оценок

Упреждающее распознавание – прогнозирование возможных действий и их следствий – образов и эмоциональных оценок



Основание для принятия решений

Задачи управляющей системы



- Поиск закономерностей (образов) в предыстории и решение задачи автоматической классификации

Память
предыстории

- Поиск закономерности над закономерностями (т.е., сложные, составные и пространственно-временные образы)

Автоматическая
классификация

- Хранение найденных закономерностей (образов).

Память образов

- Распознавание образов.

Распознавание образов

- Поиск причинно-следственных связей между образами и действиями исполнителей - поиск знаний

Поиск
знаний

- Задача вывода новых знаний и представления знаний

Вывод
новых
знаний

Представление
знаний в
Базе Знаний

- Задача принятия решений

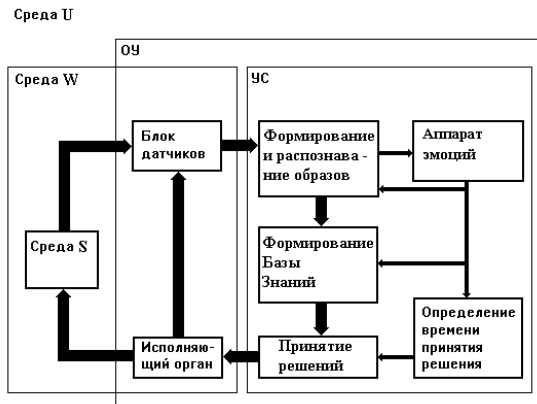
- и некоторые другие

Принятие субоптимальных решений

Принципы реализации основных подсистем системы ААУ

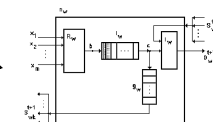
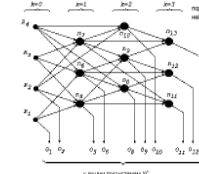
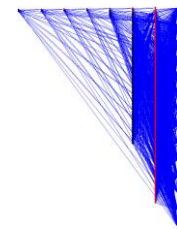
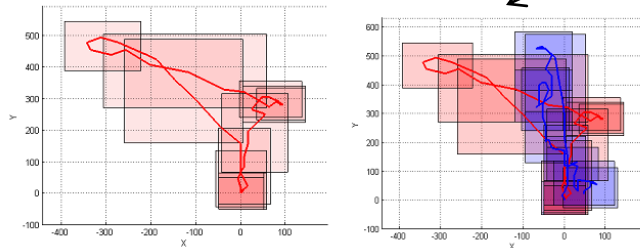
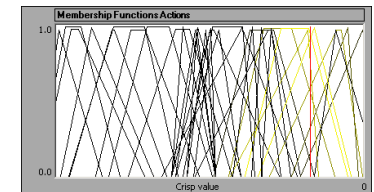


Идея системы ААУ состоит во взаимосогласованном решении совокупности определенных задач. Для решения отдельных задач можно использовать различные подходящие к случаю методы.



Для построения и оптимизации подсистем мы умеем использовать методы:

- геометрические и вероятностные самообучаемые системы распознавания,
- нечеткую логику,
- детерминированные хаотические процессоры,
- конечные автоматы,
- нейронные сети,
- марковские процессы,
- генетические алгоритмы,
- специальные нейроноподобные сети ААУ



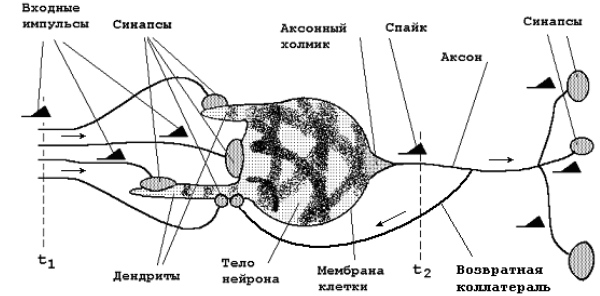
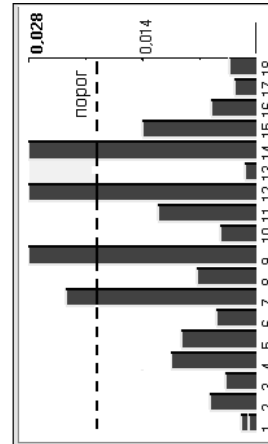
Принципы реализации основных подсистем мозга на основе специальных нейроноподобных элементов и сетей



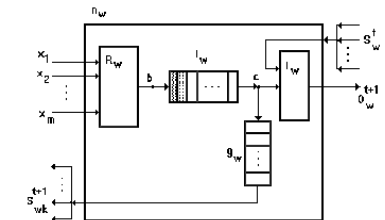
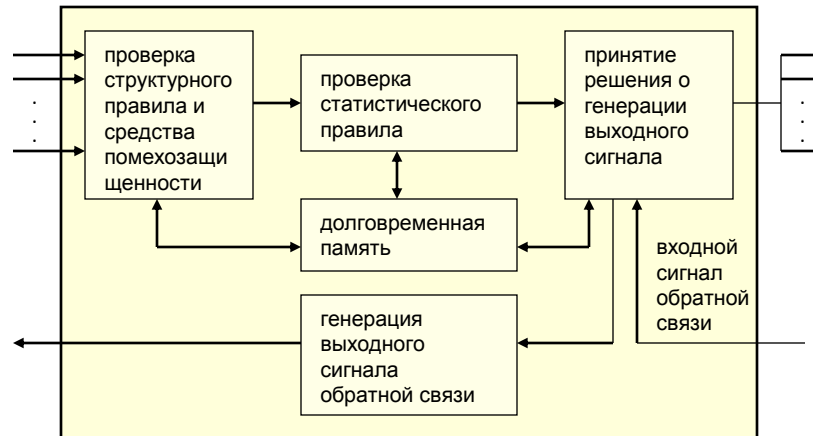
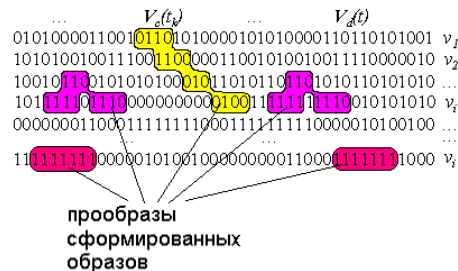
Модель нейрона в методе ААУ в общем виде

Нейрон не пороговый сумматор, а элементарная самообучаемая система распознавания!

В правила формирования образа входят пространственный и статистический критерии



Логическая схема нейрона



Формализм базовой модели нейрона в системе ААУ

Нейрон n_w в момент t получает двоичный вектор

$$X_w^t = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m) \text{ и сигнал } S_w^t.$$

$$O_w^{t+1} = \neg S_w^t \& ((b_w^t \& l_w^t) \vee O_w^t) \text{ и}$$

$$Z_{wkt}^{t+1} = b_w^t \& l_w^t \& g_w^t.$$

$$b_w^t = 1, \text{ если } h_w/m \geq \rho(N^t), \text{ и } b_w^t = 0 \text{ в других случаях.}$$

Здесь $h_w = \sum x_i(t)$;

N^t есть число событий $b_w^t = 1$ в предыстории этого нейрона от $t=0$ до t ;

$\rho(N)$ есть сигмоидальная функция для значений $N = 0, 1, \dots$, уменьшается

от $\rho(0) = \rho_{\max}$, $\rho_{\max} \leq 100\%$, до значения $\rho(\infty) = \rho_{\min}$, $\rho_{\min} < \rho_{\max}$.

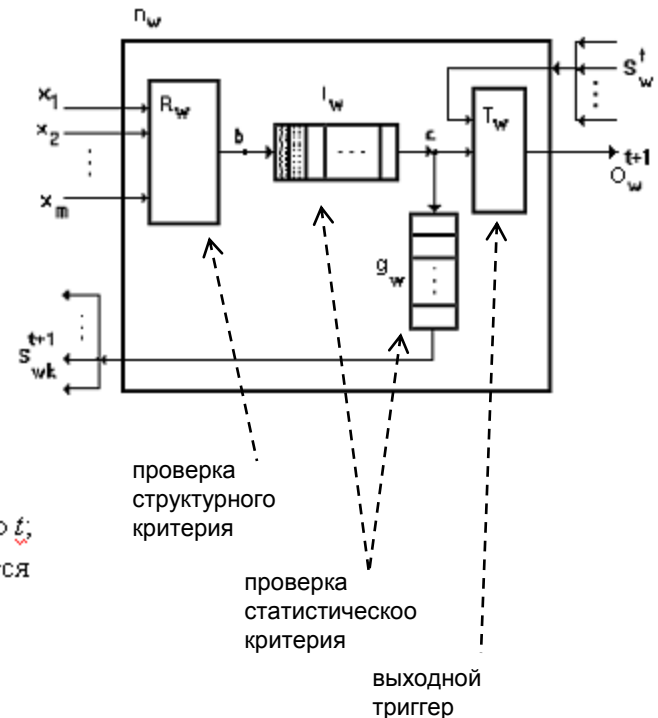
$\rho(M) = \rho_{\min}$, $\rho_{\min} < \rho_M < \rho_{\max}$, где M есть константа.

$\rho_{\max}$, ρ_M , $\rho_{\min}$ и M задаются априори.

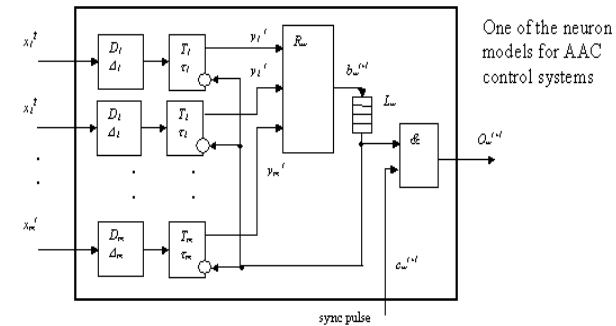
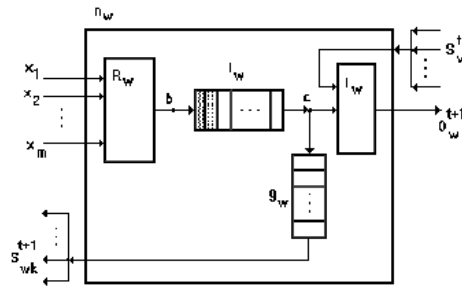
$l_w^t = 0$, если $N^t < M$, и $l_w^t = 1$ иначе.

$g_w^t = 0$, если $P^t < Q$, и $g_w^t = 1$ иначе,

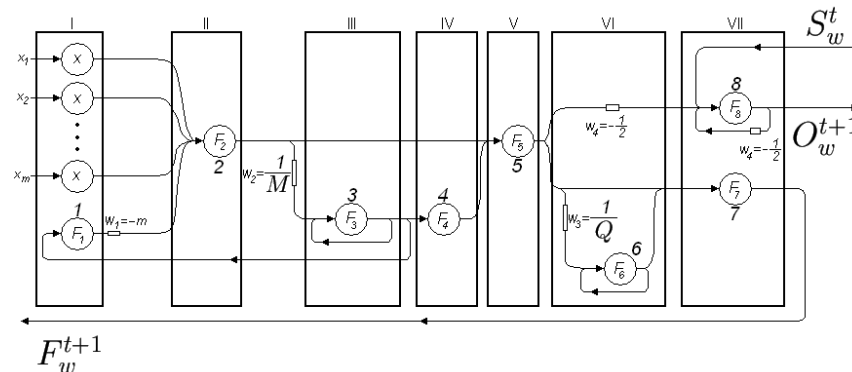
где P^t есть число единичных сигналов, наблюдавшихся в точке " c " в течение предыстории. Q - константы.



Special models of neuron for AAC systems

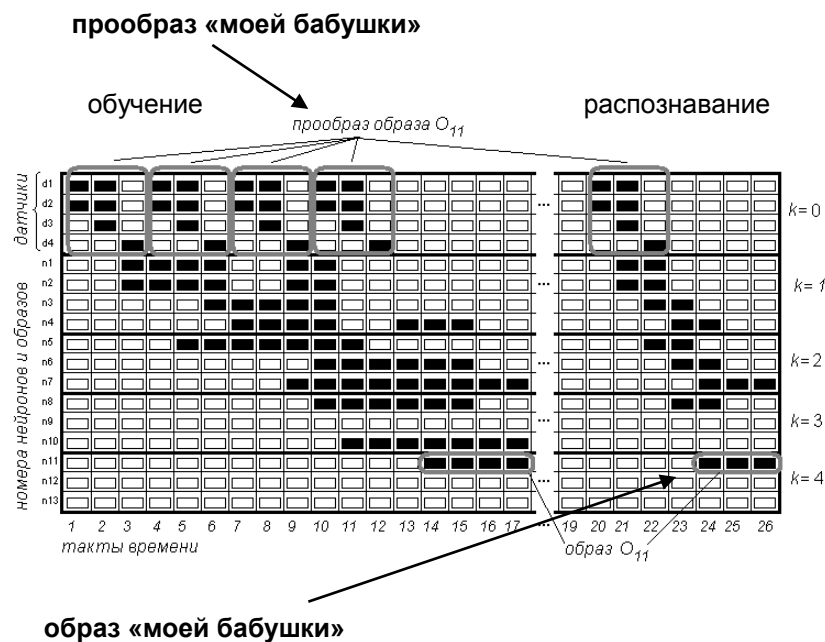
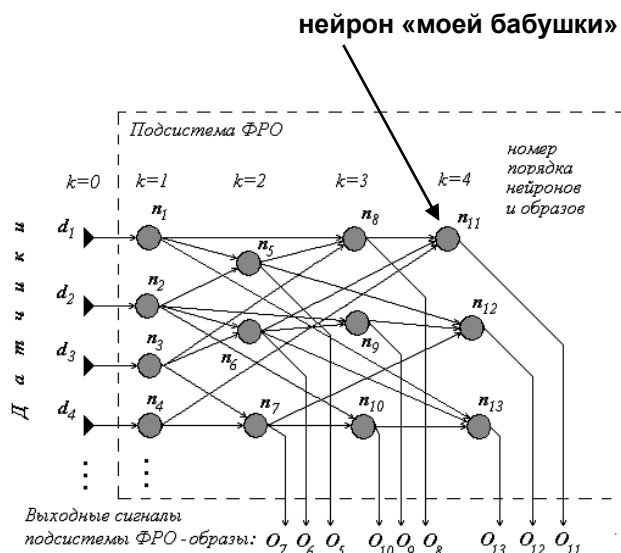


The AAC neuron is a simple self-learning recognition system



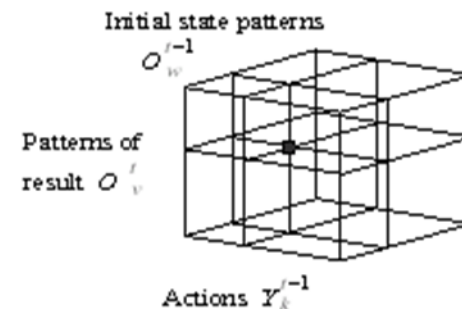
One the self-learning AAC neuron can be presented by one special artificial neural network from 9 traditional formal neurons

Пример работы фрагмента сети подсистемы формирования и распознавания образов

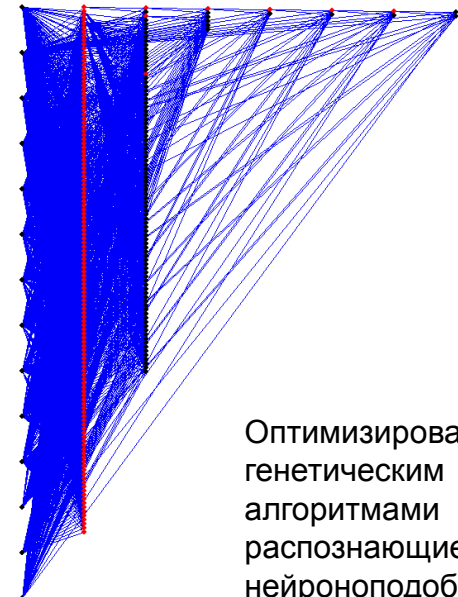
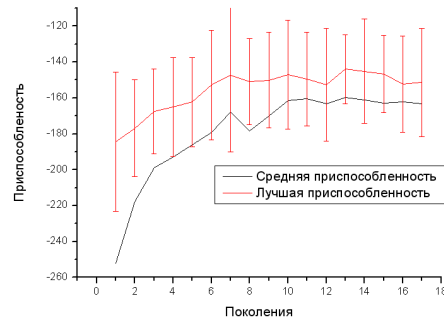
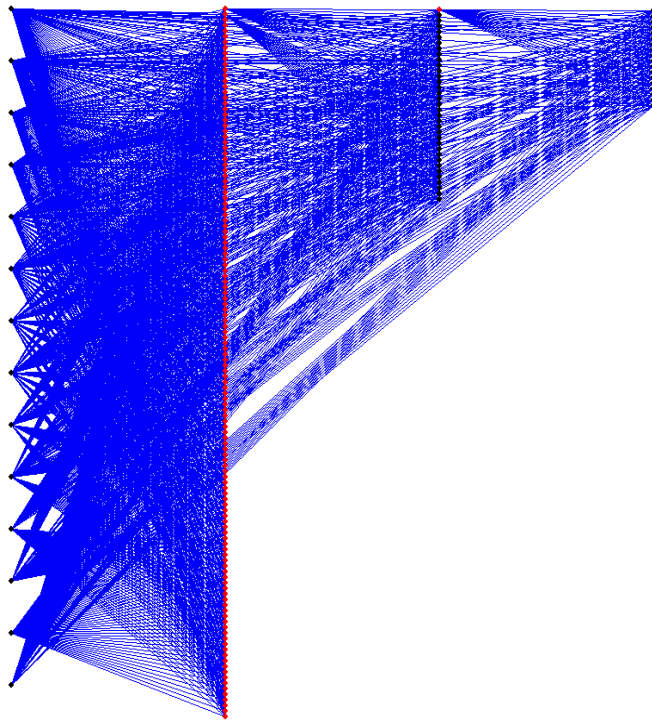


Принципы работы нейронов существенно отличаются от «искусственных нейронных сетей»:

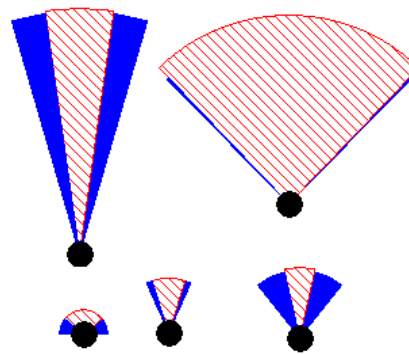
- Самообучение в процессе управления
- Парадигма управления, а не распознавания и др.



Оптимизация нейроноподобных подсистем с помощью генетических алгоритмов – аналог филогенеза (развития вида)



Оптимизированные
генетическим
алгоритмами
распознающие
нейроноподобные сети
мобильного робота

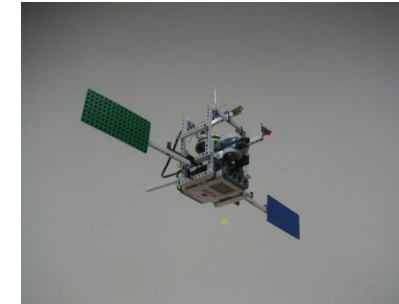
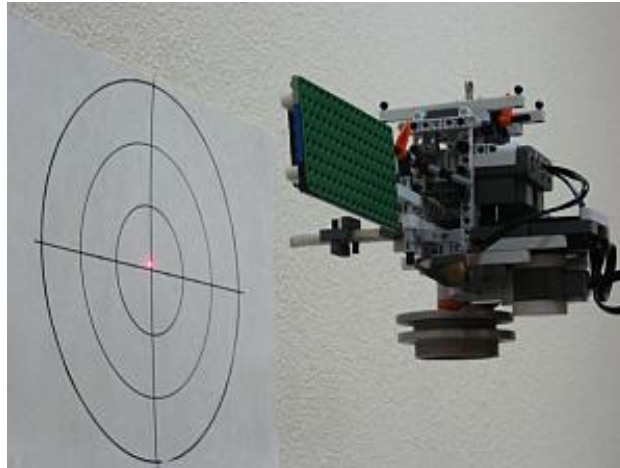


«Мутации» полей зрения визуальных
датчиков мобильного робота в
процессе оптимизации

Примеры прототипов прикладных адаптивных систем на основе метода ААУ

- машины с искусственными
нервными системами

Физическая модель наноспутника с адаптивной системой стабилизации углового движения

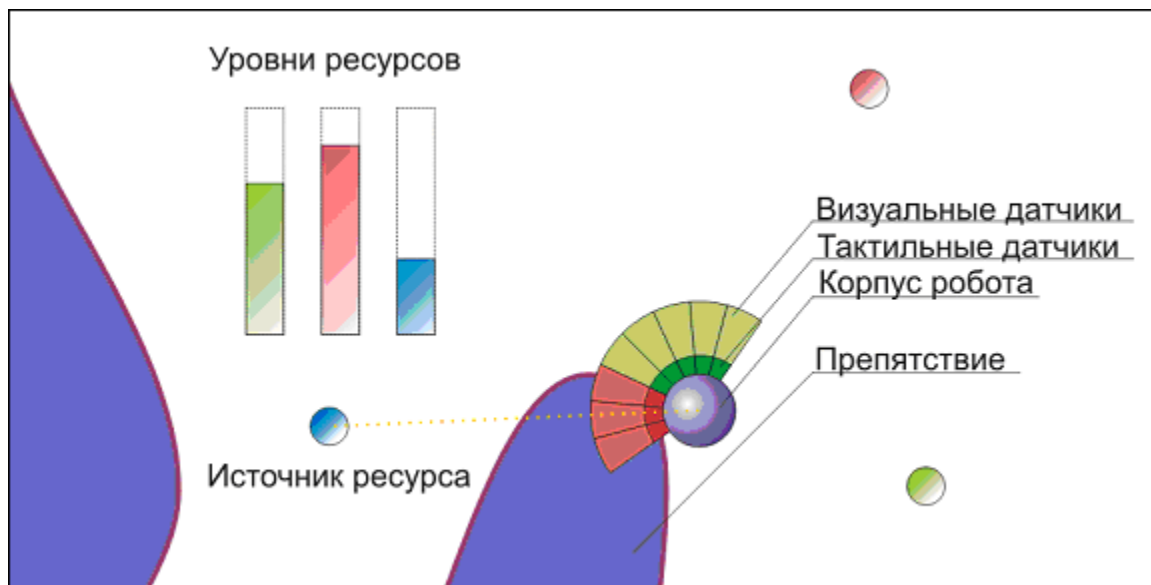


Модели адаптивных наноспутников, способных самообучаться управлению своим угловым движением, учатся стабилизироваться в пространстве или отслеживать заданное движение

Адаптивный мобильный робот обучается на полигоне

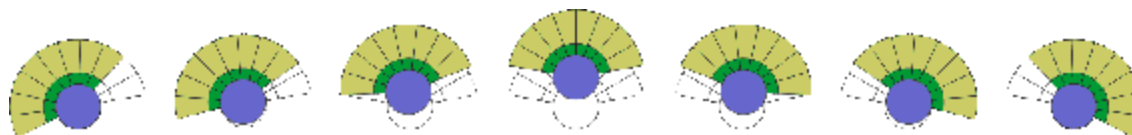


Компьютерная модель мобильного робота с 3-уровневой системой автономного адаптивного управления



Уровни системы управления:

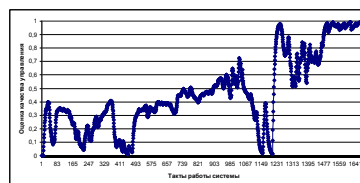
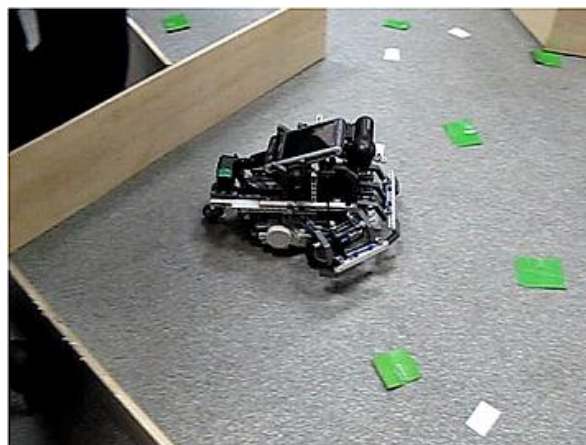
- «Командир»
- «Штурман»
- «Водитель»



Физическая модель адаптивного мобильного робота Гном №9

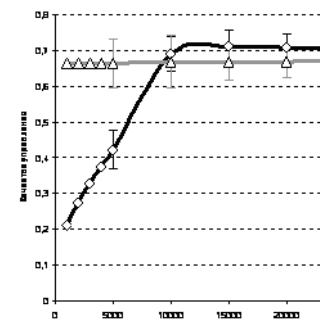
Разработаны программные и физические модели машин с адаптивными системами управления (искусственными нервными системами) на основе метода ААУ

Адаптивный мобильный робот, способный самообучаться безаварийному движению в среде и выполнению полезной работы – сборке определенного мусора

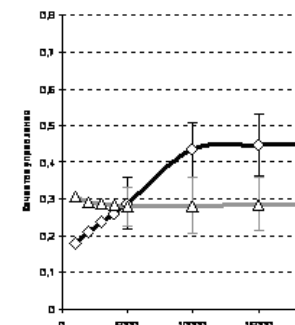


Все такие машины демонстрируют различные свойства, подобные живым организмам

Постепенный рост качества управления



Устойчивость к поломкам оборудования



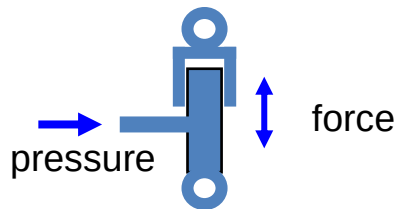
“AdCAS” System – Adaptive Control of Active Car Suspension



Obstacle on the road

Smooth motion of the car body under control

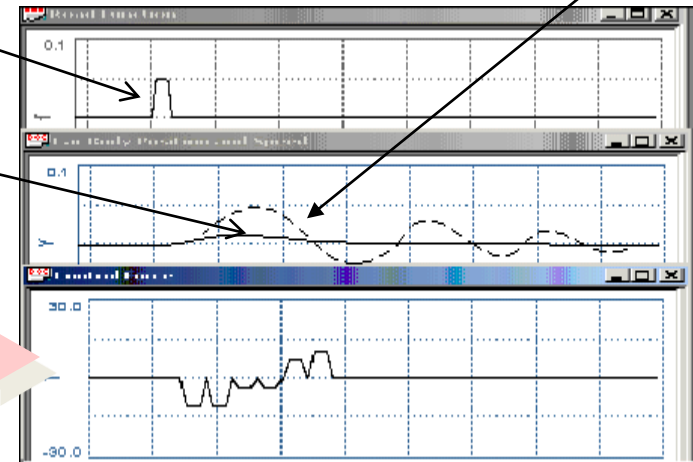
Active high pressure shock absorber



or shock absorber with magneto-reological fluid (MRF)

Control pulses to actuator

Empirical Knowledge Base

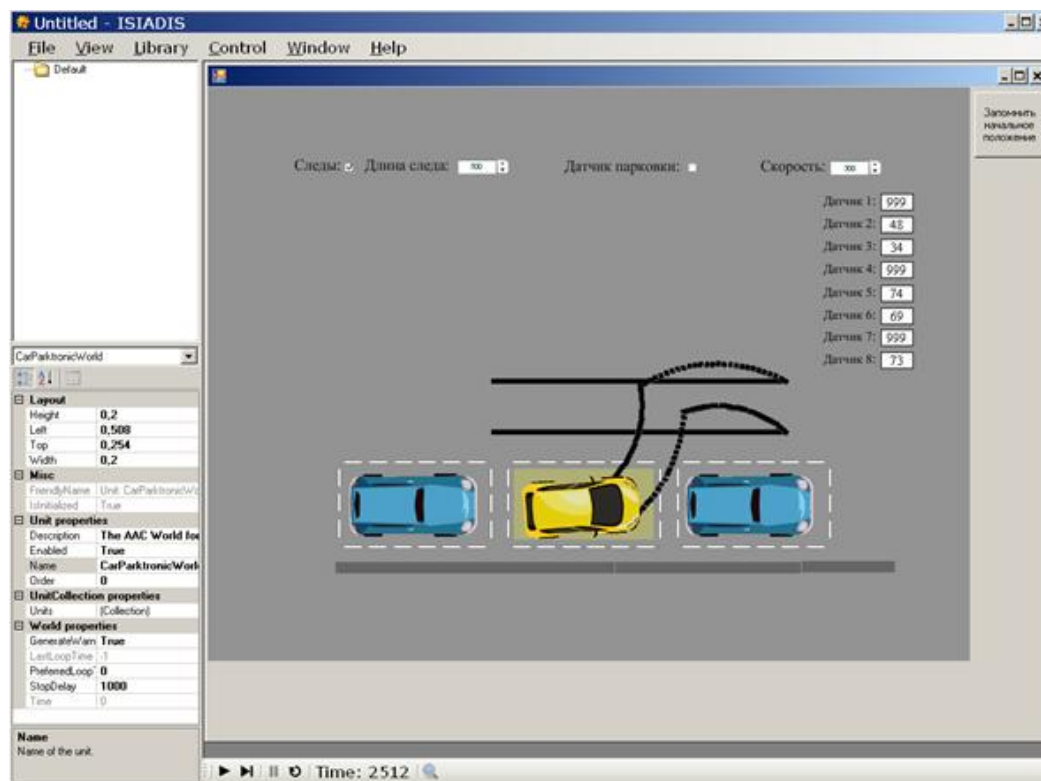


Without control

The car suspension has to have an active actuator. Then the AAC accumulates empirical knowledge about properties of given car and controls the system by means “clever pushes”.

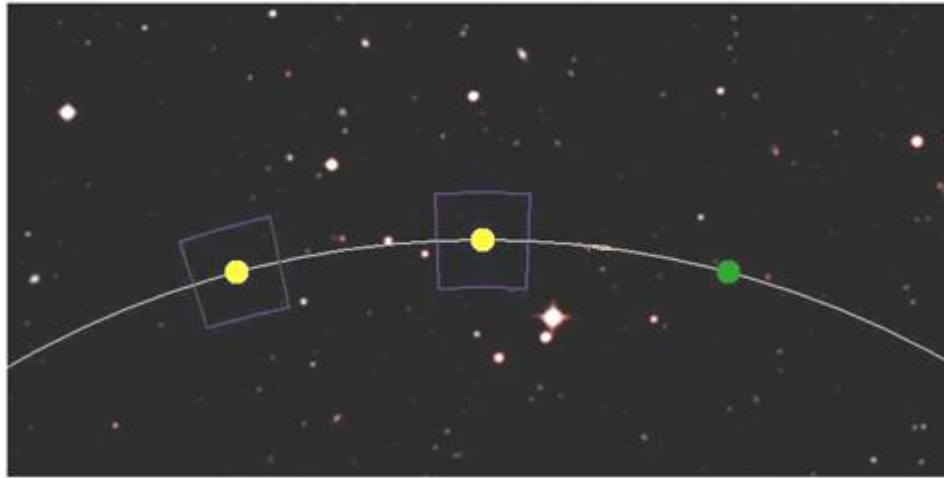
AdCAS system increases the comfort, stability and controllability of the car

Адаптивное управление параллельной парковкой автомобиля

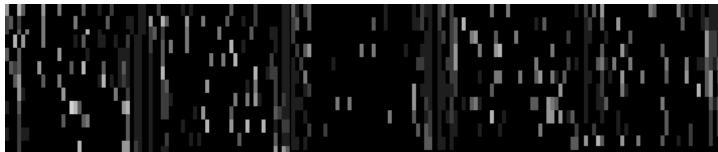


Автомобиль учится парковаться, приспосабливаясь к своим габаритам, радиусам поворота и т.д.

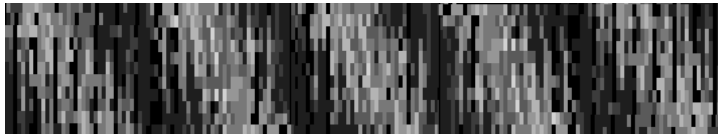
Управление группой наноспутников



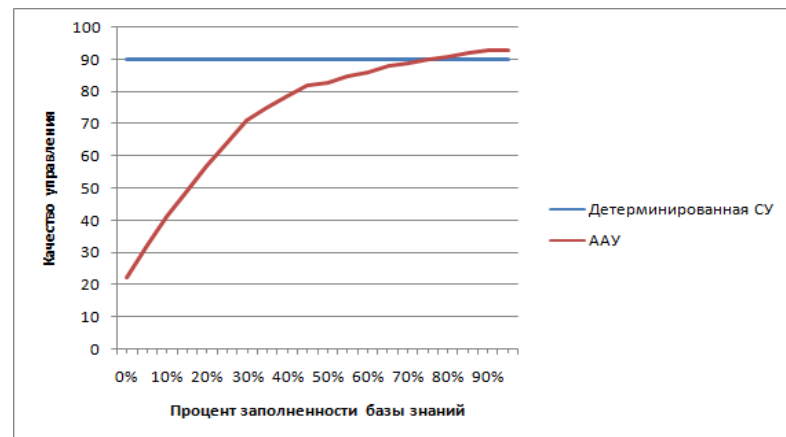
Адаптивный поиск способа управления ведомыми



...



Стадии заполнения базы знаний

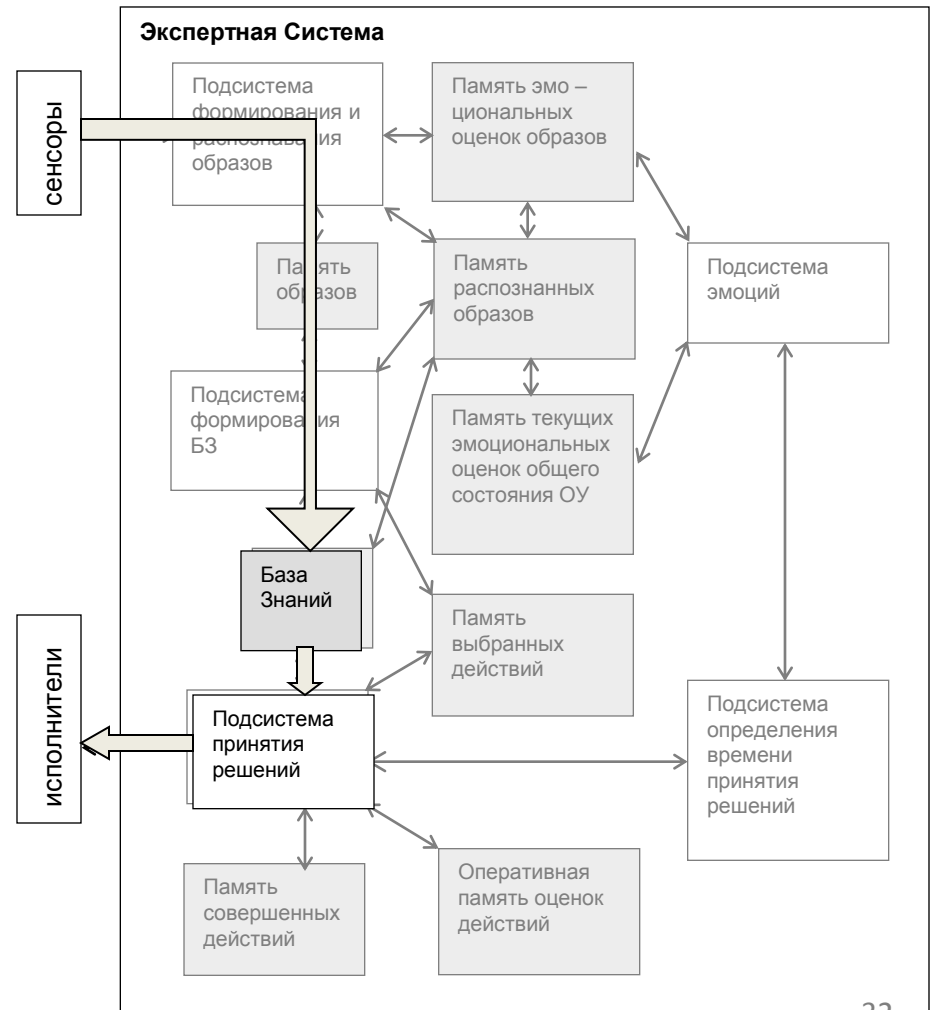


Качество управления группой постепенно растёт

Несколько критических замечаний в отношении общепринятого понимания процесса управления

Известные нам системы управления обычно являются частными случаями рассмотренной системы ААУ

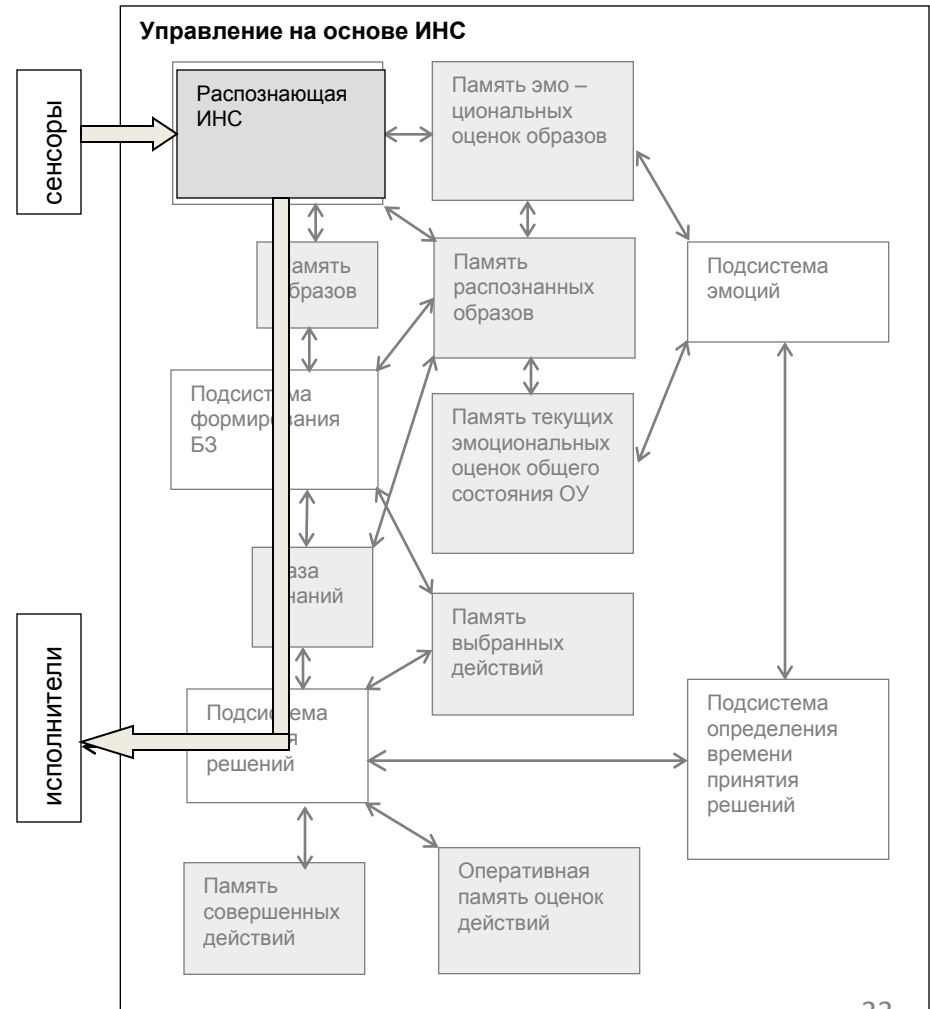
Например, «экспертная система» - это заранее заполненная база знаний и подсистема принятия решений



Несколько критических замечаний в отношении общепринятого понимания процесса управления

Например, нейросетевая система управления - это когда удалено все, кроме заранее обученной системы распознавания.

И т.п.

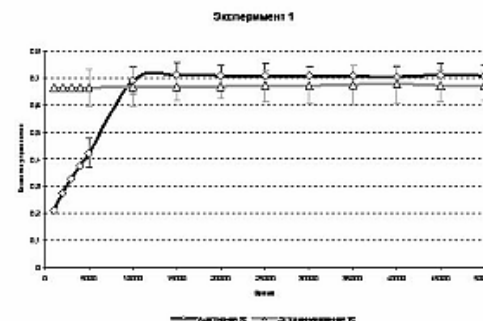


Технологические причины отсутствия адаптивных машин сегодня

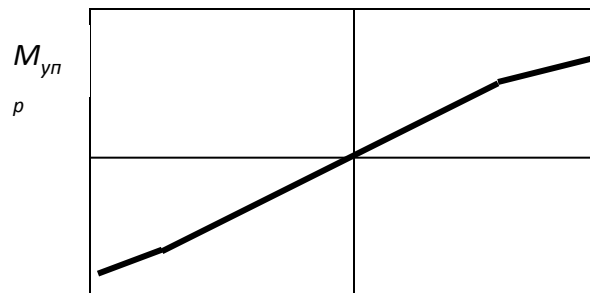
Все технологические процессы сегодня основаны на идее одноразовой оптимизации

Проблемы адаптивности обходятся на этапе проектирования систем, которые приспособляются к усредненным условиям эксплуатации.

Инженеры сегодня не знают о возможности создания адаптивных систем и машин и не умеют их делать.

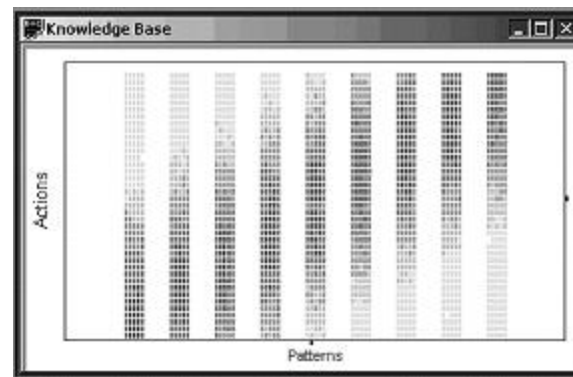


Соотношение метода ААУ и традиционных подходов к управлению



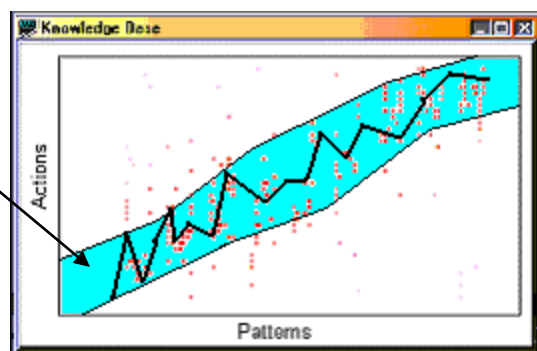
$$K_{\varphi(i)} \cdot \varphi(i) + K_{\varphi'(i)} \cdot \varphi'(i)$$

«Закон управления» АКА,
вычисленный аналитически.

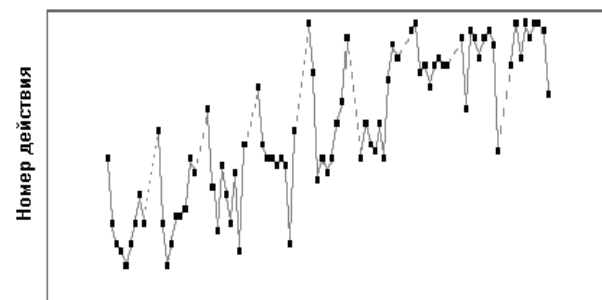


«База Знаний», эмпирически найденная методом
ААУ в полном пространстве параметров.

«Пространство
поиска»,
найденное
теоретически, и
обеспечивающе
е устойчивость и
управляемость.



«Закон управления», эмпирически найденный
методом ААУ в пространстве, обеспечивающем
устойчивость и другие требования.



Номер образа состояния ОУ

«Закон управления», эмпирически
найденный методом ААУ.

Психологические причины

1. Рынок адаптивных машин не сформирован, так как пока нет спроса. Никто не знает о возможности адаптивных машин и не спрашивает их в магазинах.
2. Психологически будет трудно приспособиться к появлению адаптивных машин
3. В некоторых отношениях человеку приятнее приспособляться самому, чем видеть, как вещи приспособляются к нему.
4. Однако появление адаптивных машин – **систем автономного искусственного интеллекта** неизбежно и специалисты уже понимают это.

- По методу ААУ защищена 1 диссертация д.ф.-м.н. и 4 диссертации к.ф.-м.н.
- Опубликовано более 80 статей и 2 монографии
- Выполнены проекты:

в России – НПО им. Лавочкина, ЦНИИМаш, Центр
Президентских Программ, МинНауки (2), РФФИ (6),
Президиума РАН (3)

Международные – INRIA (Франция), ATS Soft (2)

Программные инструменты для автоматизации разработки систем ААУ

1. 4GN
2. ISIADIS



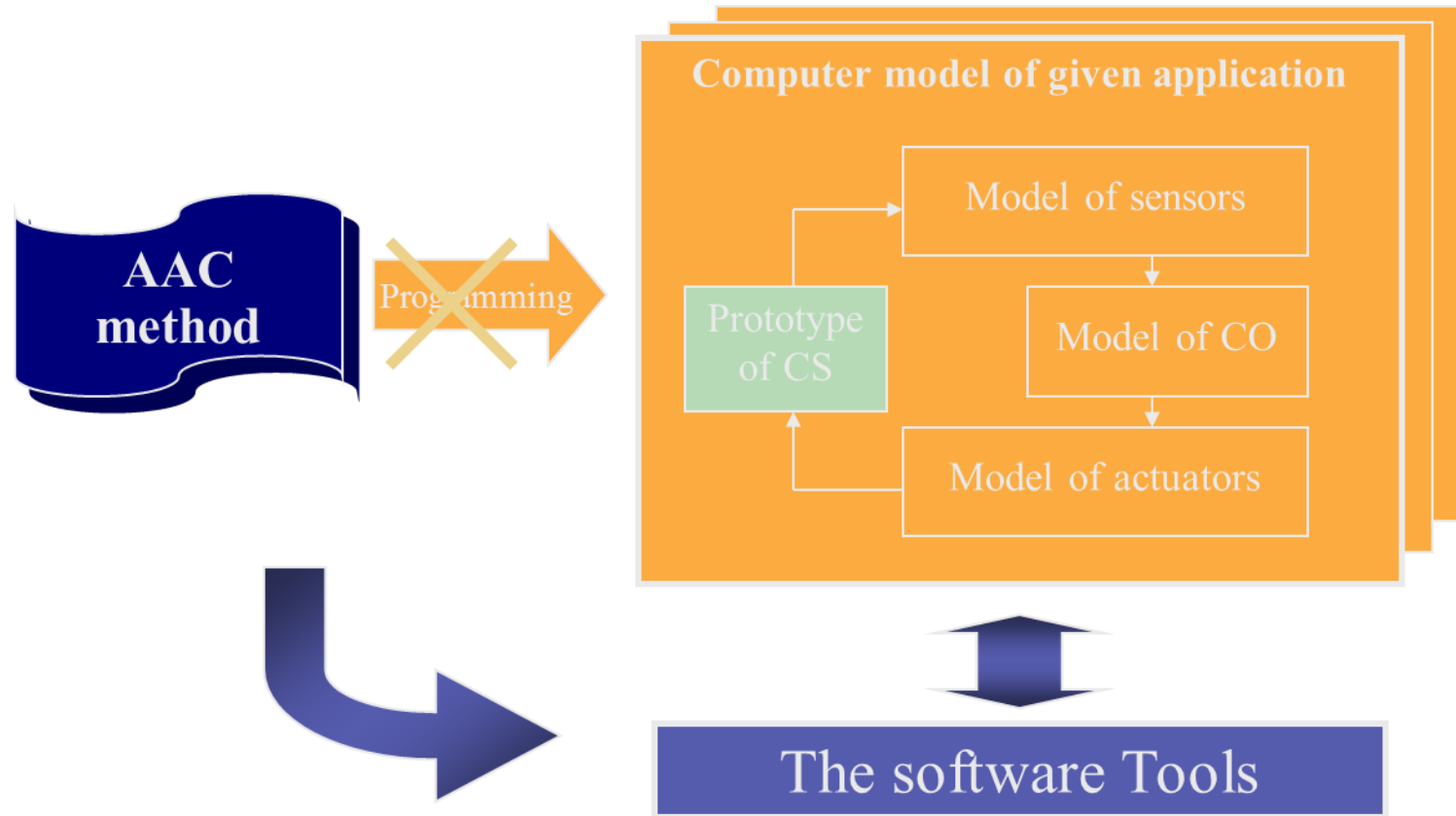
4GN Designer

- AI System Development Environment

ATS & ISP RAS



CASE for design of AI systems



Disadvantages of Other Solutions

- General-purpose systems
- Purpose: Physical/Hybrid system simulation
- Have no AI system design methodology behind it
- Are good for development of simple block systems, but as it comes to development of complex AI system, VisSim, Simulink solutions become overwhelmed with details

Advantages of 4GN Designer

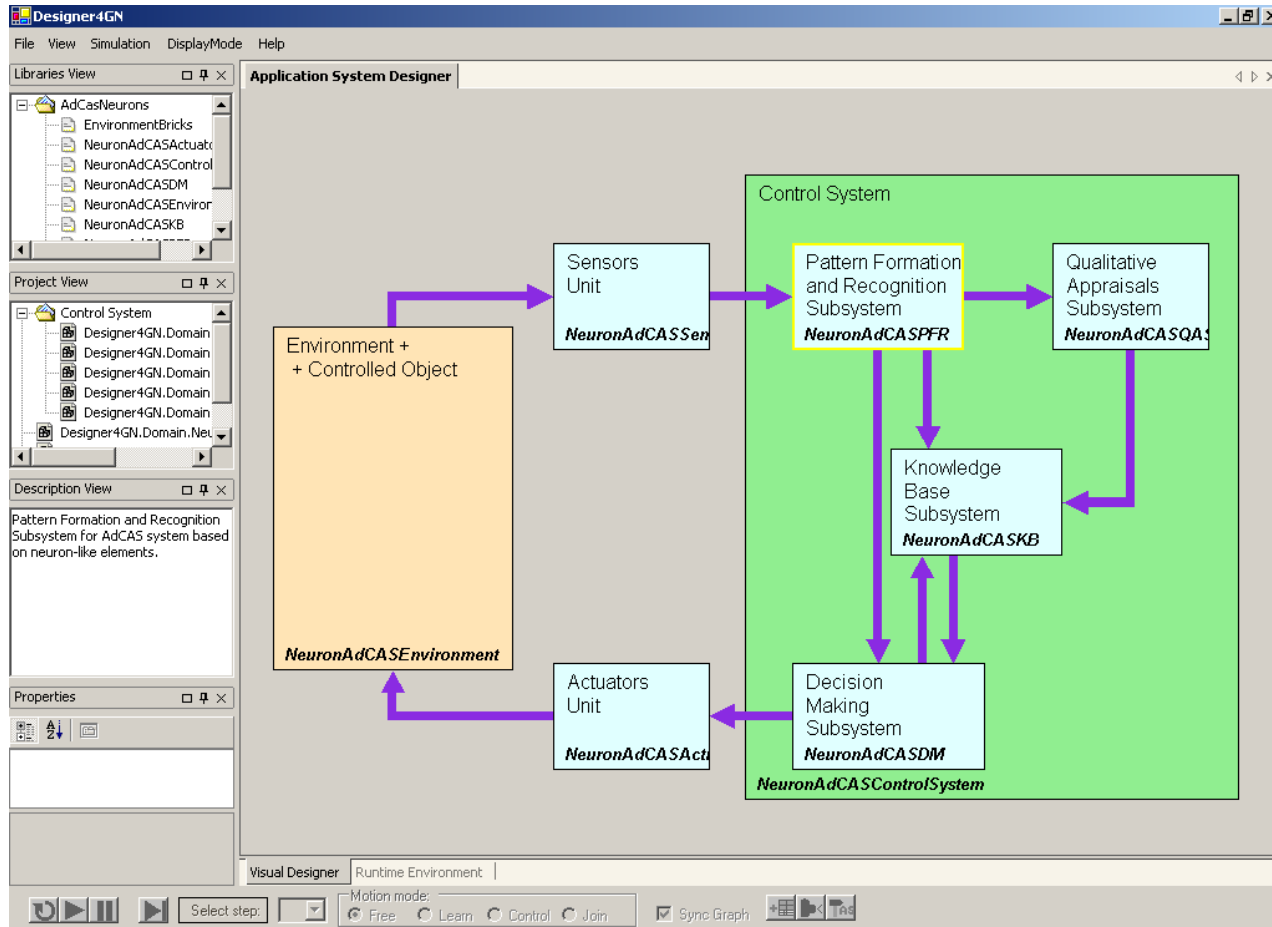
- Time and Cost reduction for AI system Development
- Complexity Reduction for AI System Development
- Interface Flexibility: it is possible to reuse existing components from MATLAB and other simulation systems
- Arbitrary Neuron Structure can be used
- Custom Visualization: easy to view dynamics of arbitrary parameters and add arbitrary visualization capabilities
- Portability: runs over .NET Framework (C#, VB assemblies)
- Based on Autonomous Adaptive Control Methodology and focuses on main components of AI systems

Features of 4GN designer

- Flexible Visual design of AI system
- Low-Level Neural Network Design (Connectionists structure)
- Flexibility: easy to modify existing functionality
- Extensibility: easy to add new functionality
- Integration with 3-rd party software (MATLAB)
- Integration with existing data sources (OLE DB)
- Reusability

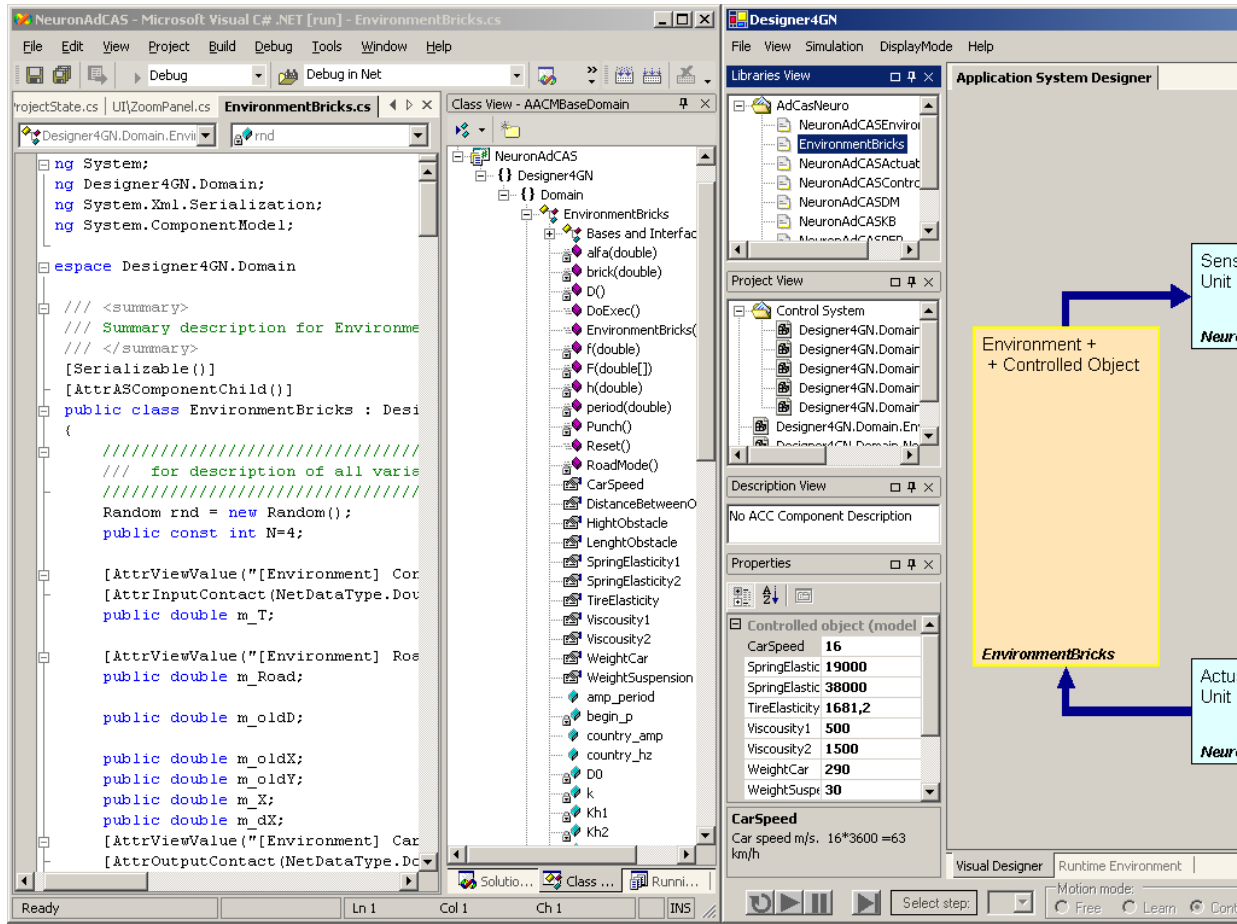
4GN Designer Use Case.

AI Application System Mainframe

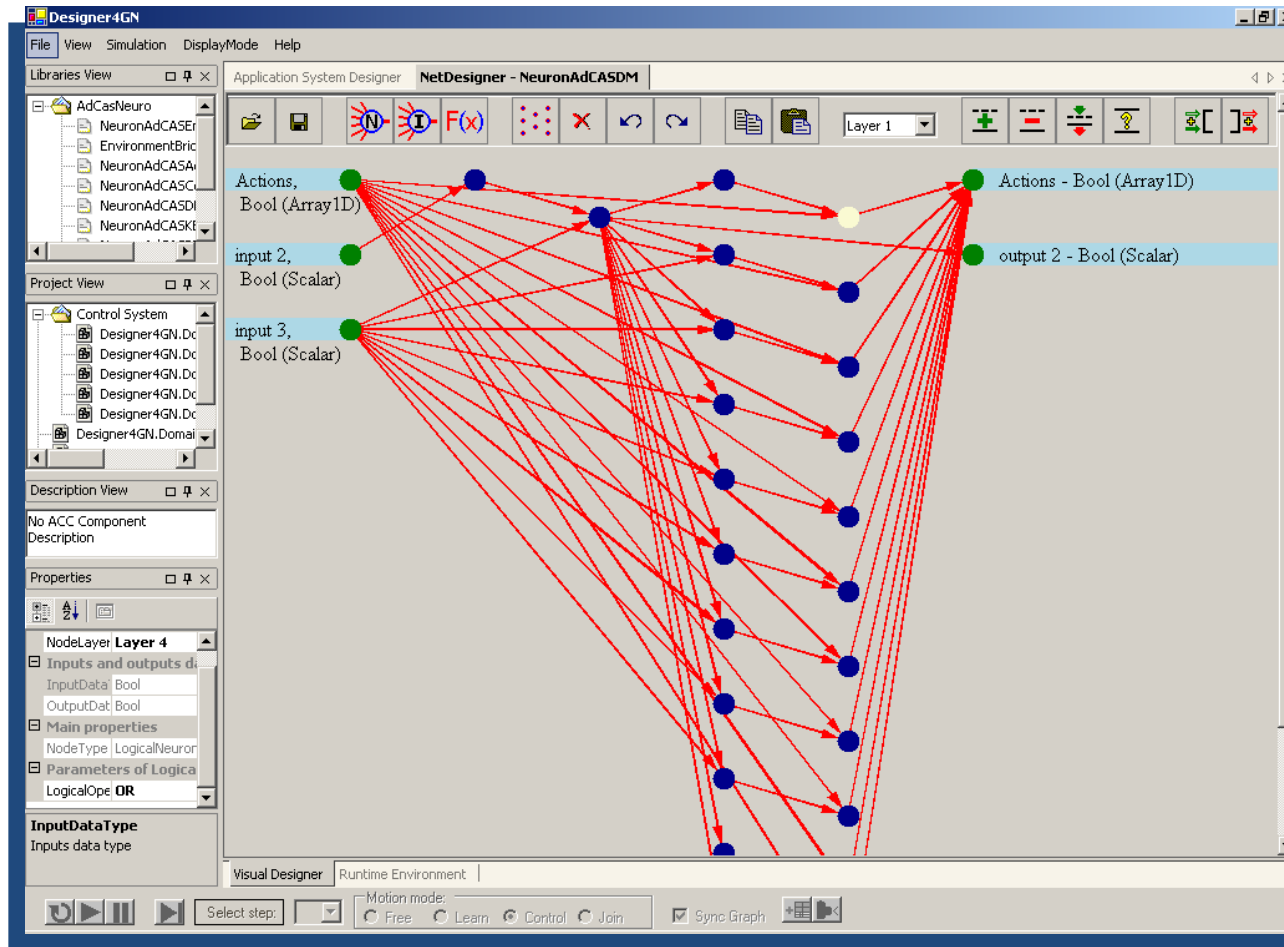


4GN Designer Use Case.

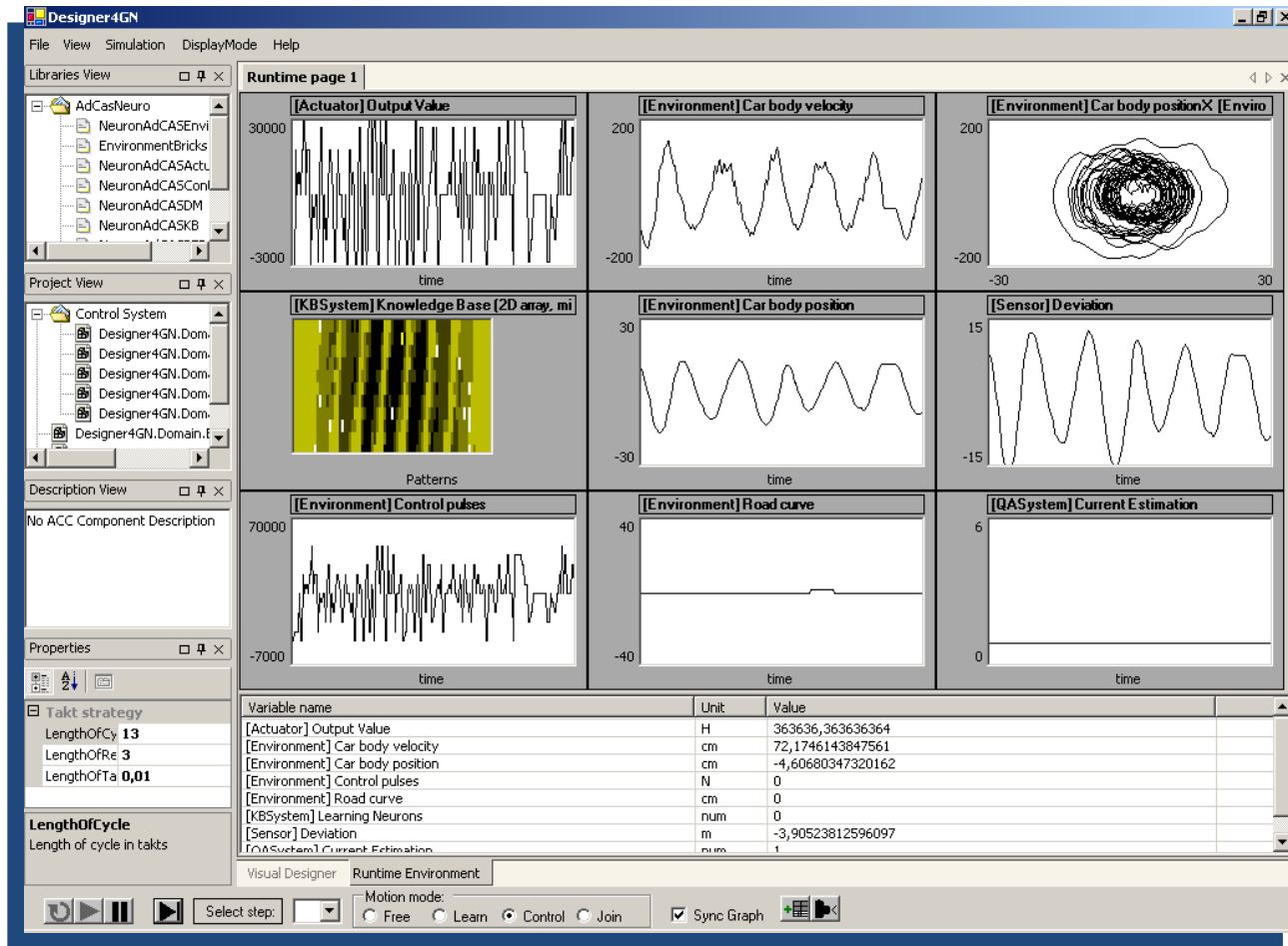
C# Assemblies



4GN Designer Use Case. Neural Network



4GN Designer Use Case. Runtime Environment



Simulation system comparison

<i>MATLAB, Simulink</i>					Layer	2D, 3D
<i>VisSim</i>					N/A	Predefined plots
<i>Dymola</i>					N/A	3D
<i>AnyLogic</i>					N/A	Custom 2D, 3D
<i>Model Vision Studium</i>					N/A	3D, internal designer
<i>Designer 4GN</i>					Neuron, Layer	DirectX, OpenGL, 2D, Flash animation

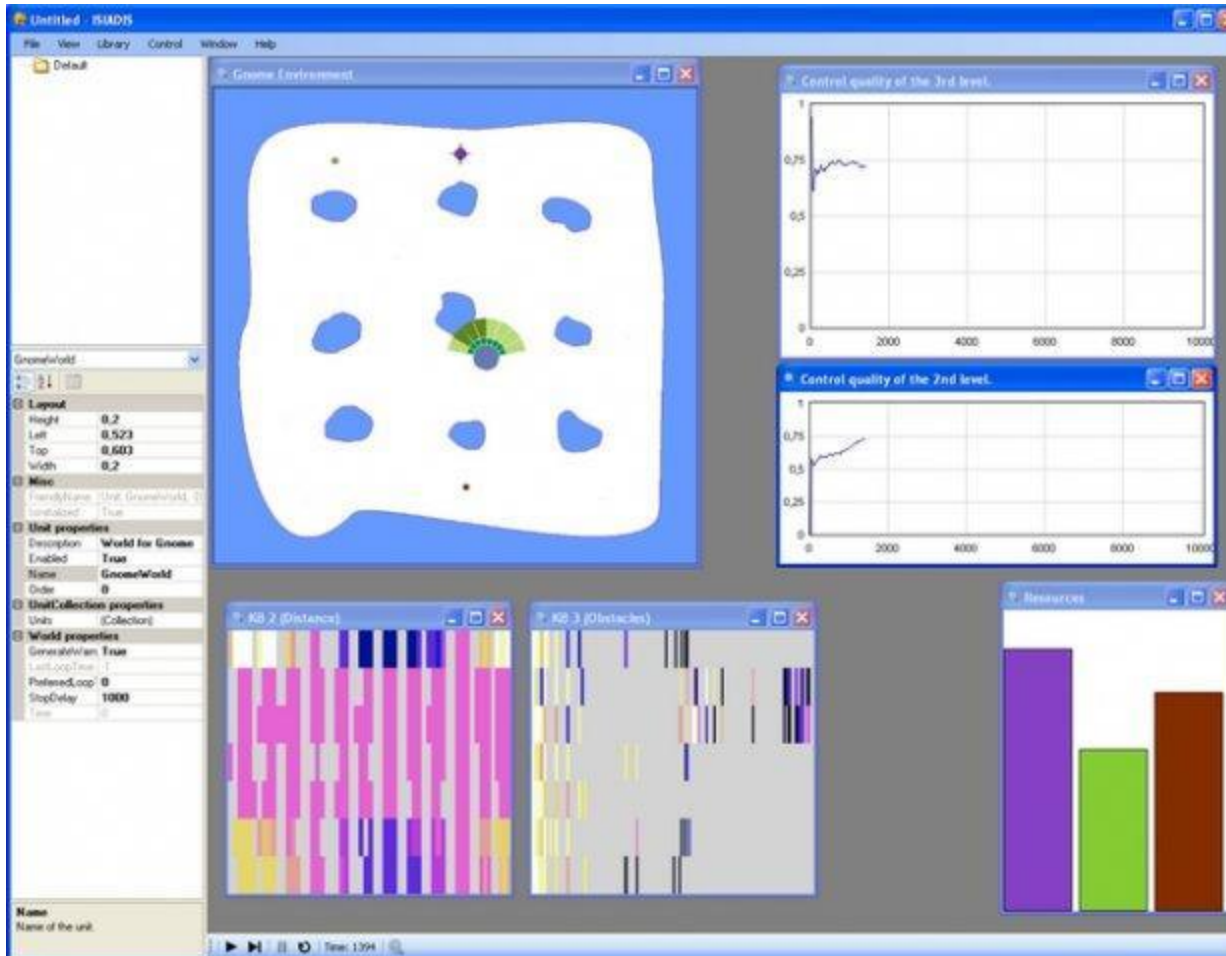
ISIADIS: среда разработки иерархических программных систем



ИСИАДИС позволяет прототипировать, конструировать и исполнять программные системы, в основе которых лежит иерархическая архитектура. Это могут быть системы анализа данных, системы распознавания, системы управления и многие другие системы.

SOURCEFORGE.NET®

ISIADIS: среда разработки иерархических программных систем



Пример скриншета
проекта

Вопросы:

1. Нужно ли вообще разрабатывать инструмент для создания систем ААУ или лучшим инструментом является среда программирования C++?
2. Если нужно, то какими свойствами такой инструмент должен обладать?

Спасибо за внимание!

Жданов Александр Аркадьевич

профессор, д.ф.-м.н.,
главный научный сотрудник,

ОАО «Институт точной механики и вычислительной техники имени
С.А. Лебедева РАН»

<http://www.ipmce.ru>,

<http://www.aac-lab.com>