

Александр ЖДАНОВ,  
профессор, д.ф.-м.н., заведующий  
отделом Института системного  
программирования РАН



## Когда вещи научатся думать...

**Рано или поздно человечеству придется разбираться с главной технологией, существующей в мире – естественными системами управления – нервными системами. Первые успехи уже есть.**

**Лучше думать и бегать, чем бояться и прятаться**  
Среди окружающих нас машин уже не сразу заметен, но, тем не менее, существует такой класс чудных объектов в Природе – животные (кстати, человек тоже относится к этому биологическому царству). Посмотрим на них кибернетическим взглядом. Что общего есть у всех животных? Мы увидим, что все они отчаянно борются за свою жизнь под управлением нервной системы, спрятанной в самом надежном месте животного – в бункере черепной коробки и в броне позвоночника.

Мозг руководит оттуда движениями организма как капитан командует линкором из бронированной капитанской рубки. Поразительно, что мозг не прибывает на службу в тело молодым специалистом после окончания Института Интеллекта с полностью готовыми знаниями, но получает значительную часть образования самостоятельно, наблюдая с пеленок за полем боя окружающей и собственной жизни через узкие амбразуры своих рецепторов. И каковы успехи! Комплекс интеллектуальных задач, которые решает мозг животного: распознавание, прогнозирование, принятие решений и т.д. – в сово-

Статья проиллюстрирована фотографиями моделей адаптивных машин. Понимая, что лучше один раз увидеть на “физической” модели, чем сто раз – на “компьютерной”, мы в последнее время решили “материализовать” наши адаптивные системы управления и создать несколько реальных физических адаптивных машин. Первый снимок. Мобильный робот воплощает программную модель адаптивного робота “Гном № 8”, ранее жившего только на экране компьютера. Программные модели мобильного робота показали, что адаптивное управление позволяет роботу постепенно добиваться более высокого качества управления, чем заранее написанный детерминированный алгоритм (адаптивный “водитель”

допускает меньше ДТП, адаптивный "штурман" точнее указывает маршрут, адаптивный "командир экипажа" лучше ставит цели). Мы полагаем, адаптивный мобильный робот может иметь много различных практических применений.

Второй снимок. Мы воспользовались стандартными японскими роботами Aibo, позволяющими перепрограммировать их системы управления, и робототехническим набором Lego Mindstorms, из которого можно легко конструировать "тела" и сенсорно-исполнительные части роботов, оснащая их своими системами управления. Так, собака Aibo благодаря адаптивному алгоритму управления самостоятельно научилась владеть шарнирами головы и шеи, отслеживая направление на цель. В другом проекте, который выполняют сейчас студенты 3-го курса, одна собака Aibo обучает вторую собаку нажимать на кнопки с заданными цветами. Эта модель "в железе" идет вслед теории и программным моделям, в которых уже демонстрируется автоматическое возникновение "протоязыка" в общении адаптивных роботов. Мы полагаем, что умение роботов обучать друг друга, передавать накопленный опыт, может быть полезным во многих ситуациях.

Третий снимок. Модель спутника будет демонстрировать умение разработанной адаптивной системы стабилизации автоматически приспособиться к особенностям данного спутника, и к возможным изменениям его свойств, и надежно стабилизировать заданное угловое положение "спутника" в "космосе" (подвес на нитке).



купности пока не по плечу ни одному компьютеру. Но главное свойство мозга – это способность обучаться на протяжении всей жизни. И как тут не обучаться, когда жизнь вокруг так и кишит опасностями и врагами, не научился с ними бороться – пеняй на себя. Кто "не догнал", того съели еще 160 тысяч лет назад в Эфиопии. Некоторые животные пошли в борьбе с агрессивной окружающей средой иным путем, например, выращивая вокруг себя толстый непробиваемый панцирь – действительно, броню. Но где теперь эти "броненосцы", а где мы? Большинство животных Природа повела путем развития интеллекта как универсального оружия против любых опасностей и решила: пусть тело будет мягким и непрочным, но пусть оно имеет автономный адаптивный компьютер, который найдет способы, как уходить от погони, как самому нападать, как добывать пищу и делать множество других полезных действий. Получившие самообучаемый интеллектуальный компьютер животные с тех пор и вертятся, как уж на сковородке, спасая себя и исследуя окружающее пространство. Чем больше знаний добыто, тем больше шансов выжить с помощью интеллектуального управления. Действительно, интеллект – это антипод брони. Посмотрите, как интеллект раздел человека, лишив его не то что панциря и толстой кожи, но даже волосяного покрова, и, более того, поставил человека в самое неустойчивое

положение – на две длинные ноги, с которых ничего не стоит упасть, но зато визуальные сенсоры далеко видят. А дело в том, что физическая неустойчивость тела повышает маневренность (как у современного истребителя), и для управления ею поневоле приходится развивать интеллект, а уж он-то может справиться с врагами гораздо лучше, чем самая толстая броня.

### Создаю и управляю

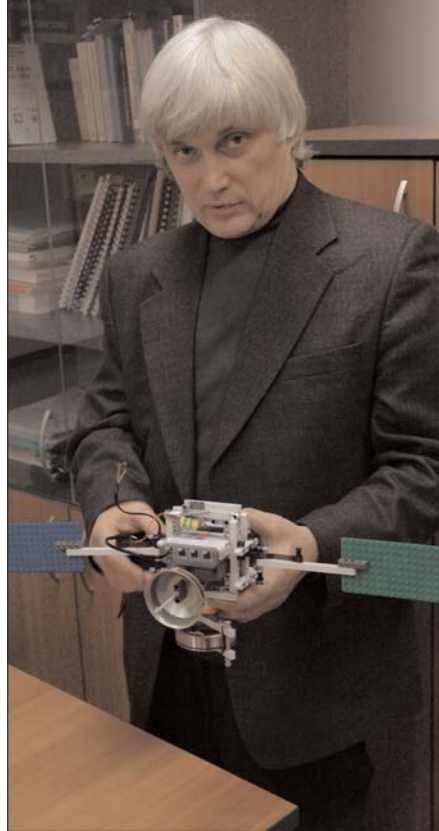
Существует другой класс объектов в Природе – искусственные машины, приборы, программы и системы, создаваемые нами, людьми. Попробуем сравнить их с живыми организмами с этой же, кибернетической точки зрения. И что же мы видим? Удручающая картина. Подавляющее большинство созданных нами машин – это попросту более или менее сложные инструменты, управляемые человеком и усиливающие силу его глаз, ушей, рук, ног и т.д., но при этом управляемые самим человеком. Например, микроскоп, мясорубка, автомобиль, самолет и т.п. – человек сам принимает решения и сам управляет таким механизмом. Даже если сюда прибавить машины, созданные для того, чтобы работать автоматически, без человека, то, все равно, у 99,99% наших искусственных творений полностью отсутствуют управляющие системы как специализированные устройства. Не то чтобы адаптивные, но просто хоть какие-то управляющие системы. Можно, конечно, считать, что реборда железнодорожного колеса – это тоже управляющая система – она "управляет" колесом и не дает ему съехать с рельса. Пружинный часовой механизм уже ближе. Но и это как-то не совсем то, что нам хочется понимать под системой управления. Хотелось бы видеть,



как минимум, какой-то встроенный вычислитель с интеллектуальной программой управления, с блоком принятия решений. Но машины и приборы со встроенными процессорами до недавнего времени еще надо было поискать. Только-только они стали появляться на производстве и в быту. Конечно, в оборонке такие штуки с ЭВМ внутри появились уже лет как 50. Вот только не до интеллекта им было, не до адаптивности. Места в памяти БЦВМ хватало только на то, чтобы записать туда “закон управления”, аналитически вычисленный в страшных усилиях математиками, до предела изоштившими в XX веке свой инструмент – математику. И уже пробуксовывает математика: далеко не каждый объект управления, отличающийся от “математического маятника”, опишет. Чуть в объекте какие-то более реальные черты – нелинейности, неопределенности – сразу записываем в трудноформализуемые и решаем численно-робастно (сказано с самоиронией и при полном и великом почтении к математике).

### Можно ли понять, как летит утка?

А требующих автоматического управления объектов, в которых уже встроен микропроцессор, в последние годы появляется все больше и больше. Их количество возрастает лавинообразно благодаря развитию компьютерной техники. Только в быту – стиральные машины, и цифровые камеры, кухонные комбайны, мобильные телефоны, MP3 плееры и т.д. – несть конца этой невесте откуда взявшейся наступающей армии. А управлять-то есть чем, господа? Оказывается, по большому счету и нечем. Микропроцессоры есть, а алгоритмов подходящих нет. Заказывать в ИПМ Келдыша разработку



Александр Жданов читает студентам МФТИ лекционные спецкурсы “Распознавание образов” и “Нейронные сети” на кафедре системного программирования на базе ИСП РАН (зав. кафедрой – член.-корр., профессор В.П. Иванников). “База” ИСП РАН популярна на Физтехе. Немаловажную роль играет и то, что в распоряжении сотрудников и студентов Института есть столовая, богатая библиотека, столы для маленького тенниса. Планируется открытие тренажерного зала. Институт имеет более 120 высококвалифицированных постоянных сотрудников и около 80 специалистов, работающих по контрактам. Сотрудники Института участвовали в крупных проектах СССР таких, как: программное обеспечение для знаменитой машины БЭСМ-6, архитектура и программное обеспечение распределенной неоднородной системы АС-6, суперкомпьютера “Электроника СС Бис”. В 90х годах Институт развивал международное сотрудничество с такими академическими организациями, как GMD (Германия), NPS (США), RAL (Великобритания), CDAC (Индия), INRIA (Франция) и др.

### Тема номера: есть ли жизнь на базе?

“законов управления” в классическом дифференциально-интегральном виде для всей этой многочисленной мелочевки, а хоть и не мелочевки, но все равно многочисленной – не удастся. Во-первых, дорого, а во-вторых, большинство из этих объектов управления – те самые “плохоформализуемые”. Но как же Природа управляет всеми этими мириадами лягушек-квакушек, зайчиков-кроликов, мушек-пчелок? Ведь каждое из этих животных самым недвусмысленным образом и очень активно, без усталости приспосабливается и приспосабливается! Вот говорят, что крысы быстро распознают яд и ставят рядом часового. Трудно заподозрить и лягушек-квакушек в использовании дифференциальных уравнений! Так как же они управляют? Как эта цапля балансирует на одной ноге без “фи” и “фи с точкой”? Как эта самая полярная крачка, у которой и мозг-то невелик, пилотирует свое тело, попутно распознавая речь товарищей по эскадрилье, как заправский навигатор по звездам и магнитному полю держит путь не на соседнее дерево, а из Арктики в Антарктику два раза в год? Нет, это явно “не наши” технологии! Так можно ли эти технологии понять? Или оставить их в стороне, забыть и продолжать строить свои машины только на основе диффузов? Может быть, таким способом догоним Природу, что-нибудь придумаем, и обойдется как-нибудь? Нет! Увы, не догоняем Природу в умении строить системы адаптивного управления, не можем придумать как, и, следовательно, не обойдется. Рано или поздно, придется разбираться с этой технологией – с принципами работы естественных систем управления – нервных систем. Коллеги сейчас возразят – зачем так драматично? – развиваем “искусственные ней-

ронные сети", "экспертные системы" и другие направления искусственного интеллекта. Конечно, и слава Богу, что развиваем! Но ... это все равно не "то". Кто скажет, что это "то", пусть первым бросит в меня чем-нибудь. Современные системы управления и даже те, что называются «системами искусственного интеллекта», мало похожи по своему принципу действия на природные нервные системы. Сегодня, как ни странно, нет общепринятого представления об устройстве и принципе работы мозга, нервной системы даже самого простого организма, где нейроны уже можно пересчитать. Нет полного понимания принципа работы даже одного нейрона! Есть некоторое множество моделей, большая часть которых даже доведена до совершенства, используется в практических прикладных системах. Прекрасно работают на практике экспертные системы, искусственные нейронные сети, но ... какое отношение это имеет к нервным системам и мозгу? Довольно отдаленное, как говорят сами специалисты. Сходство только внешнее и поверхностное. Функциональность же и совсем мало похожа на биологические образцы. Для выразительности почти не сгущаю краски, безмерно уважая коллег по цеху. Вот этим хочется заниматься: понять, как же эти нервные системы работают. Что за чудесная технология! Вы представьте только – мало того, что эта машина – живой организм выросла из одной клетки, поумнела и всему сама научилась, она еще и сохранила свои чертежи в коде ДНК, благоразумно допустив мутации, и перед тем, как умереть, передала этот код в одной клетке (!!!) потомку. В свою очередь, код саморасшифровался и самопостроился из этой одной клетки в живой организм, затем в процессе роста

самообучился жить, передал все это дальше в вечность через потомков... Определенно "не наша" технология! Представьте себе маленький, только что родившийся автомобильчик, который постепенно растет, учится ездить, возить пассажиров, взрослеет, набираясь опыта, рождает потомство, передает ему свой накопленный опыт – базу знаний, и умирает, закодировав свою схему в половой клетке. Ребята физтехи! – вот чем надо заниматься – надо все это понять и применить в искусственных системах. Вопросы: "надо ли?", "а не опасно ли?". С верой в прогресс и здравый смысл скажем: "надо!". Да и жажду познания не остановить.

### ААУ учится жить

Свою философию и модель нервной системы в ее основных чертах мы разработали уже лет 15 назад, с тех пор развивая ее со всех сторон. Называется она "метод Автономного Адаптивного управления" (ААУ), [www.aac-lab.com](http://www.aac-lab.com). Из чего мы исходили при построении модели? Мы просто встали на точку зрения Природы и спросили себя: "А как надо построить систему управления, чтобы, оказавшись однажды в неизвестном теле новорожденного, окруженного неизвестной ему средой, найти "обратные связи" через всю эту систему, запомнить их и с их помощью выжить"? Задумайтесь и вы, и рука сама начнет выводить "схему устройства нервной системы" и писать список задач, которые она должна решать. Все это кажется простым на первый взгляд. А может быть, не таким уж и простым. И вот схема построена, подзадачи расписаны – каждая сама по себе "не слабая" – тут самообучаемая система распознавания, тут представление знаний, тут

принятие решений и т.д. Каждой такой задачей люди полжизни занимаются. Но даже если каждую подзадачу упростить, но всю схему оставить, получаются неожиданные интересные и даже практически полезные системы. Нейрофизиологи, которые теперь внимательно рассматривают, что же у нас получилось, говорят время от времени: "вот этот эффект в биологии был обнаружен", "это было открыто в таком-то году"... Значит, в своих кибернетических построениях мы рассуждали правильно. И свойства систем ААУ подозрительно интересные. Например, мобильный самообучающийся робот – младенец, вдруг начинает пятиться задом, потому что стал бояться столкновений с препятствиями и понимает: поедешь задом – лбом не стукнешься. Или еще случай: научившись аккуратно рулить, не сталкиваясь с препятствиями, робот постепенно перестает бояться столкновений, теряет бдительность и начинает попадать в ДТП. Прямо как ставший самоуверенным водитель третьего года – известный эффект. Потом робот пугается, начинает бояться и снова ездит аккуратно, пока не перестанет бояться вновь и т.д. А какие роботы-мутанты появлялись у Леонида Земских (МФТИ) в процессе эволюционной оптимизации "вида" роботов с помощью генетических алгоритмов! Как возрастала острота и дальность зрения "зрения" робота при увеличении скорости его движения и уменьшении размеров препятствий – вспомним остроту и дальность зрения ястреба. А система ААУ для управления угловым движением спутника показала нам, что если "в молодости" с системой управления обращаются грубо, резко, то и "повзрослев", управлять она будет грубо, пока не приобретет "хорошие манеры". Еще помню, как при

демонстрации на архивных данных прототипа системы поддержки принятия решений, разработавшейся для правительственных органов, заказчик вдруг вскричал: “Я же говорил им, что ничего не надо делать, ситуация и так сама улучшалась! А вот ваша система приняла правильное решение”. Оснащенная ассоциативной памятью программа “Колумб” Андрея Устюжанина узнает один из Мальдивских островов, как только он покажется “на траверсе” “корабля”. Сейчас разрабатываем адаптивную систему управления для сустава протеза руки, которая должна заставить протез приспосабливаться к желаниям человека, ну, примерно так, как это делает домашнее животное: “Поддай мне карандаш...”.

Дел с системами ААУ еще много. Надо закрыть “белые пятна” в описании теории и технологии изготовления таких систем, разработать разные их варианты: нейросетевой, вероятностный, нечеткий и другие, разработать программные инструменты, “заточенные” под метод ААУ и облегчающие разработку таких прикладных систем. Наконец, пора создавать прикладные самообучающиеся системы – искать объекты с встроенными микропроцессорами, делать прототипы, убеждать производителей, что пора работать над адаптивными машинами. Последнее не просто – ведь еще очень мало кто из людей мечтал или думал о том, что предметы должны стать адаптивными, как живые организмы. Разве только Норберт Винер, который сказал: “Не за горами день, когда окружающие нас вещи научатся думать и станут много более полезны обществу”. Сказал не так и давно, всего в 1940 году. Однако пора уже и воплощать эти слова в жизнь.

Фото Алексея МАРТЫНОВА

## Разминка для мозгов

### Головоломка 2

Два робота-солдата десантируются в стан вражеских войск. Каждый из них может двигаться только влево и вправо на 1 шаг. Место высадки первого обозначаем буквой А, второго – буквой В. Написать программу, следуя которой роботы встретятся.

L – робот движется влево, R – вправо.

WGO – метка, обозначающая, что после того, как робот попал в место высадки, он может двигаться по-другому.



А



В

### Решение головоломки, опубликованной в ноябрьском номере журнала

Непрозрачная система с наименьшей длиной, которая известна автору, состоит из половины диагонали, и трёх отрезков, идущих из транспортной точки в вершины квадрата (см. рис.).

$$\begin{aligned} \text{Длина системы} &= 2a + b + c = \\ &= \frac{\sqrt{2-\sqrt{3}}}{\sqrt{3}} + 2\sqrt{\frac{2}{3}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 2,64 \end{aligned}$$

