



## ВВЕДЕНИЕ. РОБОТЫ ДЛЯ НАУКИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Современные исследования в области робототехники развиваются по двум главным направлениям, которые условно можно разделить на "научное" и "промышленное".

Обсуждение темы, посвященное промышленным робототехническим системам, открывает обзор (авт. *В.М. Чадаев*), посвященный тенденциям развития робототехники и затрагивающий оба названных направления. Здесь анализируются научно-технические предпосылки развития робототехники, проводится параллель: современное развитие робототехники и экспоненциальное развитие вычислительной техники в соответствии с законом Мура. Со стороны промышленности обосновывается возможность взрывного технологического переворота в области робототехники для промышленности.

В нашей стране и за рубежом известны крупные научно-исследовательские институты, серьезно занимающиеся проектами создания роботов. В открытой печати опубликованы алгоритмические, математические и инженерные результаты исследований в области создания искусственного интеллекта, систем машинного зрения, систем позиционирования и т.д. Далее в журнале представлена статья об интеллектуальной системе безопасности и самосохранения робота (авт. *С.С. Магазов*). Хотя в этом материале речь не идет о промышленном применении робота, но научные результаты, полученные в ходе его разработки, могут найти применение при создании ПО для промышленных робототехнических систем.

Рассуждения о научной автоматизации, как интересной концепции, призванной подстегивать инженерное вообра-

жение ("На пути к научной автоматизации"), продолжают научное направление раздела. На примере создания автоматизированных производственных линий с использованием универсальных роботов показано, как положения научной автоматизации находят свое отражение в робототехнике.

Современным научно-техническим достижением является использование беспроводных средств связи в различных отраслях народного хозяйства. Подходы к проектированию систем передачи данных для мобильных роботов на примере проводных и беспроводных каналов связи представлены в статье авт. *Д.И. Воронкова и др.*

Разработки проектов промышленных роботов пошли по пути создания механизмов, способных заменить человека в неблагоприятных условиях, в труднодоступных местах и т.д. В настоящее время можно перечислить сотни тысяч видов работ, выполняемых человеком, которые можно автоматизировать с помощью специально сконструированных машин. Часто промышленных роботов можно рассматривать как "манипуляторы специального назначения". Вопросы создания и управления роботизированными промышленными системами рассмотрены в статьях авт. *О.Г. Тюрин и др.*; *В.Л. Колюх*; Робототехнические комплексы ЗАО "Тарис"; Роботы-специалисты; Питание сжатым воздухом для покрасочных роботов.

В разделе "Технические средства автоматизации" журнала рассмотрено оборудование (авт. *О.Н. Лысенко*; Новый цифровой контроллер EPOS2 50/5), которое может быть применено, в том числе и при разработке роботизированных промышленных систем.

## МЕХАНИЧЕСКАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

В.М. Чадаев (ИПУ РАН)

*Обсуждается современное состояние робототехники по данным отдела статистики Международной федерации по роботам (IFR). Анализируется возможность взрывного развития робототехники и того, что мешает этому. Среди основных причин приводятся: высокая стоимость и опасность промышленных роботов, малые серии и большой уровень брака при длинной цепочке операции. Рассматриваются пути снижения стоимости роботов.*

Последние 40 лет вычислительные машины развивались по экспоненте. По экспоненте падала стоимость бита памяти (рис. 1) и процессоров и нарастала тактовая частота [1]. Время удвоения колебалась в пределах 20...30 мес. Это был взрыв. Билл Гейтс считает [2], что взрыв был вызван появлением языка BASIC. Он прав в том смысле, что этот гениальный по естественности язык вызвал бум "персоналок", которые явились локомотивом, потянувшим вверх по экспоненте весь рынок и всю промышленность компьютеров. Конечно, в этом буме участвовал и целый букет технологических наработок для "больших" машин двойного применения.

В области промышленной автоматизации тоже сначала царила эйфория. Универсальные вычислительные машины открывали совершенно новые воз-

можности. В автоматизации крупных непрерывных производств (химия, нефтехимия и т.п.) компьютеры быстро нашли свое место. Там, где компьютер должен был считывать данные с датчиков и включать исполнительные устройства, большинство проблем были решены с помощью ЦАП и АЦП. Бум автоматизации непрерывных производств малозаметен, потому что таких производств мало даже в масштабах всей планеты.

Другая ситуация сложилась в производствах, где требовались механические перемещения. Вычислительных мощностей за приемлемую цену было достаточно, чтобы автоматизировать большинство производств, но не было универсального механического терминала. Этот пробел по идее должны восполнить роботы. Но возникли проблемы.

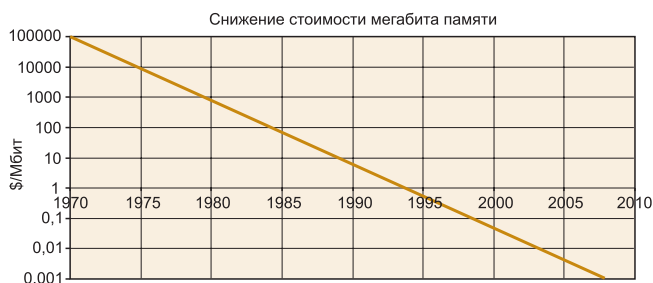


Рис. 1. Снижение стоимости мегабита памяти

### Объективные причины роботизации

Автоматизации производства нет альтернативы. Реальная производительность труда может вырасти только за счет автоматизации ТП. Интенсификация труда рабочего — тупиковый путь. Две разнонаправленные тенденции объективно стимулируют процесс роботизации промышленности. С одной стороны, ресурсы дешевой рабочей силы из слаборазвитых стран быстро сокращаются, из-за чего стоимость самой рабочей силы растет. Даже в Китае намечаются проблемы со старением населения из-за искусственного ограничения рождаемости. С другой — стоимость единицы рабочего времени робота уменьшается. Например, в период 1990-1999 гг. средняя цена промышленных роботов на рынке США снизилась на 40%, в то время как стоимость рабочей силы за то же десятилетие повысилась на 38...39% [3].

Если эти тенденции сохранятся, то роботы будут вытеснять людей. И этот процесс идет. Но медленно. Рассмотрим современное положение дел.

### Роботы идут

Так назван один из разделов годового отчета IFR — Международной федерации по роботам за 2007 г. Действительно, по данным отдела статистики IFR ([www.IFR.org](http://www.IFR.org)), несмотря на большие колебания годового выпуска (рис. 2), число реально работающих роботов в промышленности монотонно растет (рис. 3).

Относительно данных, приведенных на рис. 3, нужно заметить, что они основаны на добровольных сообщениях производителей и пользователей. Поэтому, если сведения об установке роботов достаточно точны, то информация о демонтаже весьма приблизительна. Однако тенденция монотонного и быстрого роста не вызывает сомнения.

Анализ графиков, приведенных на рис. 2 и рис. 3, показывают, что роботы действительно идут и быстро идут. Но взрыва, как это было с компьютерами, нет, то есть их число не увеличивается по экспоненте. Почему это так и как изменить ситуацию обсудим позже.

### Далеко ли идти?

Предел роботизации — полностью безлюдное производство. Люди бы занимались наукой, изобретали и писали стихи, а на производстве были бы одни роботы. Как далеко мы от этого предела? Ответ — далеко.

Во-первых, распределение роботов по земному шару неравномерно. Основные покупатели (а также и про-



Рис. 2. Годовое производство промышленных роботов в мире (сплошная линия), линейный тренд (пунктирная линия)

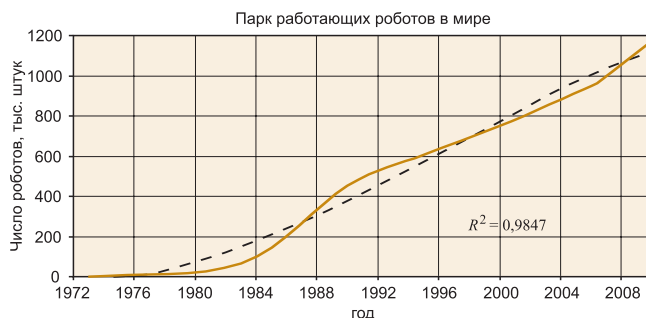


Рис. 3. Парк работающих роботов в мире (сплошная линия), тренд третьего порядка (пунктирная линия)

изводители) роботов — Япония, ЕС и США, а на остальные страны приходится доли процентов мирового рынка. Во-вторых, и в абсолютных цифрах уровень роботизации невелик. Наиболее роботизированная страна Япония, где роботы составляют 3% человеческой рабочей силы. В некоторых странах Евросоюза — до 1%, в США — 0,5%. Так что до теоретического предела даже в наиболее "автоматизированных" странах еще далеко.

### Проблемы роботизации

**Научные проблемы.** Задача перемещения в реальном пространстве оказалась существенно сложнее перемещения в виртуальном пространстве. Перемещение файла и перемещение груза — задачи разной сложности. Для универсального механического терминала необходимо силовое перемещение с точной навигацией. Сейчас созданы и реально работают десятки, а возможно, и сотни тысяч уникальных конструкций роботов от сверх дорогих конструкций для работы в экстремальных ситуациях стоимостью в 100 тыс. долл. США до примитивных, собранных из детского конструктора, ценой 100 долл. США.

Нет только мощного, точного и дешевого универсального механического терминала для вычислительных машин. Хотя разработано много специализированных механических устройств, управляемых компьютером. Особенно много видов принтеров.

Проблема здесь состоит в том, что механический терминал будет перемещаться в реальном пространстве. Чтобы избежать аварий и выполнить задачи по перемещению деталей и инструмента, робот должен контролировать окружающее пространство. Работы в этом направлении давно и интенсивно проводятся во

*Великие идеи приходят,  
когда мир нуждается в них.*

Остин Фелпс

всем мире. Для этого используются оптические, тактильные и другие виды датчиков и целые системы видения. Для перемещений на большие расстояния используются навигаторы.

По-видимому, старый проект "глаз-рука" все еще актуален теперь уже в конструкторском плане при создании дешевого универсального механического терминала. Это одно из узких мест роботизации.

*Предпосылки взрыва.* В мире накопилось около миллиона оригинальных экспериментальных моделей роботов. Изобретают их все кому не лень. А не лень крупным компаниям и концернам (IBM, Sony и т. п.), лабораториям университетов (Кембридж, МВТУ, Массачусетский технологический институт и т.д.), студентам и школьникам. Теперь и дошкольники могут создавать радиоуправляемых автономных роботов из детского конструктора.

Многие, и в том числе Билл Гейтс, считают, что робототехническая промышленность стоит на пороге технологического переворота и для совершения революции необходимо только найти способ объединить разрозненную робототехнику [2]. Б. Гейтс считает, что если для компьютеров — это был BASIC, то для роботов это должен быть язык многопоточного программирования, но такой же простой.

Однако пока робототехника развивается не по экспоненте, как развивались компьютеры. Тому есть много причин и объективных и субъективных.

*Опасности.* Философскую проблему — вытеснят ли нас из жизни роботы — должны решать инженеры на генном уровне (т.е. на уровне проектирования), ограничивая физические и коммуникационные возможности роботов. Конечно, возникнут расовые проблемы. Но это дело будущего и здесь эту проблему обсуждать не будем.

Робот более опасен для человека, чем компьютер. И не своим посягательством на его интеллект. Робот боится того же, что и компьютер: сбоев, вирусов, отключения питания и т. п. Конечно, все это не очень важно, если робот перекладывает кубики в лаборатории. На производстве робот двигается среди реальных машин и людей, и сбои в его системе управления могут привести к тяжелым последствиям. При этом для пострадавшего не играет роли, по какой причине робот двигался неправильно из-за сгоревшей микросхемы или из-за вируса в программе.

В настоящее время и в ближайшем будущем реальная опасность возникает только для людей работающих непосредственно с роботами. Робот перемещает реальные физические объекты. Если компьютерная автоматизация портит человеку только глаза и нервы, то роботы могут поломать и руки, и ноги. Статистика в этой области по понятным причинам крайне скудная. Производители роботов ее не афишируют, потребители тоже. Об этом можно узнать только в специальных исследованиях. Причины травматизма: "человеческий фак-

тор" — сует нос, куда не следует, поломка манипулятора (перегрузка и т.п.), сбой электроники, сбой программы.

*Защита исполнительных устройств.* Эта проблема не нова. Аналогичная задача защиты систем управления с помощью компьютера механическими устройствами возникла и решалась ранее. Более 30 лет назад была запущена цифровая система управления станом горячей прокатки труб [4]. Половина ее программ занималась обеспечением надежности. Эти программы реализовали многоуровневую систему защиты окружающих от несанкционированных действий системы в случае отказа какого-либо ее элемента.

Проверялось все: датчики (диапазон сигнала и т.п., для некоторых датчиков использовались коды с исправлением ошибок); вычисления; управляющие сигналы. Контролировался сигнал управления и сигнал обратной связи с прокатного стана. Все было реализовано в режиме РВ на советской вычислительной машине УМ1-НХ с оперативной памятью 256 слов. Программа для надежности, защитая проволокой, имела 2000 команд. Реализация этой программы защиты обеспечила безаварийную работу системы управления прокатным станом в течение многих лет.

Подобными системами должны быть оснащены все промышленные роботы, работающие на реальном производстве.

*Брак и надежность.* Все технологические операции выполняются, в том числе и роботом, за определенное время  $\tau$  и с определенной вероятностью  $p$ . Вероятность правильного выполнения отдельной механической операции в промышленности имеет порядок 0,99. Это достаточно хорошо, если нужно выполнить одну операцию, например, установить одну микросхему на печатной плате. Но если на плате  $n$  микросхем, то вероятность изготовить всю плату без ошибок уже будет определяться формулой

$$P(n) = p^n. \quad (1)$$

Если на плате 30 микросхем, то изготовить ее без ошибок, выполняя последовательно одну технологическую операцию за другой, можно только с вероятностью  $P = 0,75$ , то есть каждую четвертую плату придется выбрасывать. Время изготовления одной годной платы возрастет с 30т до 40т, не считая 10 выброшенных микросхем. Выход из этой ситуации в иерархии [5].

*Принципиально здесь то, что промышленный робот не может работать по жесткой программе!* Он должен выполнять разные действия в зависимости от результатов выполнения предыдущих технологических операций. Логикой, учитывающей возможность брака, должны оснащаться все промышленные роботы. В противном случае роботы обречены на выполнение только примитивных операций, когда их число мало или брак не приводит к летальному исходу. Это, надо отметить, мы и наблюдаем в теперешней действительности.

Пресса пестрит сообщениями, что робот может делать и то, и это — сваривать автомобили, собирать насосы, проводить хирургические операции и т.п. Анализ работы каждого конкретного робота из этого

списка показывает, что все они выполняют короткий набор примитивных технологических операций. Причина здесь в законе умножения вероятностей (1) и отсутствии стратегии его обхода. Правильная организация чередования технологических и контрольных операций будет основной проблемой при робототехническом изготовлении сложных изделий.

**Малые серии.** Хотя производство роботов почти непрерывно нарастает и достигло уже 100 тыс./г, конкретные модели выпускаются не очень большими сериями и поэтому дороги. В то же время робот имеет шанс стать дешевым, только если его производство будет автоматизировано. Но автоматизировать малые серии невыгодно. Автоматизация производства малой серии только увеличит стоимость робота. Замкнутый круг – малые серии делают робот дорогим, а снижение стоимости робота путем автоматизации дорогими роботами невозможно.

#### Пути решения проблемы роботизации

**Два пути.** Естественным сдерживающим фактором на пути широкого внедрения роботов в промышленность является их стоимость. Если бы они были дешевыми, то внедрять их было бы проще. Но они дороги и дешеветь медленно. Есть два пути.

**Первый.** Путем больших капитальных вложений автоматизировать производство ограниченного спектра роботов и организовать их массовый выпуск на рынок на грани себестоимости. Прибыль на этом пути будет, во-первых, маленькая, а во-вторых, отложенная.

**Второй.** Альтернатива первому пути основана на том, что промышленные роботы – это не все роботы. Больше того, эта малая часть всех реализованных к настоящему моменту конструкций. Большая часть оригинальных роботов – экспериментальные. Для них стоимость не главное. Но самую динамично развивающуюся часть роботов составляют бытовые роботы – помощники и игрушки.

**Как запустить экспоненту?** Конечно, при проектировании робота, который решит проблему автоматизации промышленности, главная роль принадлежит инженерам и программистам, понимающим физическую суть задачи. Но не менее важна стратегия внедрения, позволяющая быстро получить прибыль и деньги на развитие.

Потребительские роботы, типа пылесосов или игрушек, имеют больше шансов достичь больших серий, чем промышленные роботы. Большие серии позволяют использовать промышленных роботов для производства роботов потребительских. Оба типа роботов могут иметь общие элементы, например, электроприводы, техническое зрение, программное и аппаратное обеспечение и т.п. Массовое производство позволит применить автоматизацию и удешевить элементы двойного применения.

**Главное звено.** Сейчас наиболее интенсивно развивается производство бытовых роботов (в первую очередь пылесосов и зверей). Их уже более миллиона.

**Чадеев Валентин Маркович** – д-р техн. наук, проф. ведущий научный сотрудник ИПУ РАН.  
Контактный телефон (495) 334-87-50.

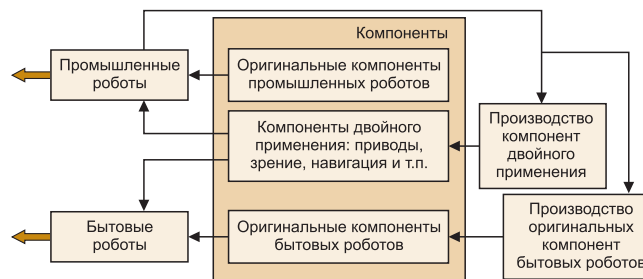


Рис. 4. Положительная обратная связь

Где главное звено, за которое нужно тянуть, чтобы роботизировать промышленность? Самое интересное, что все звенья цепи есть, нужно только соединить их так, чтобы она сама себя вытянула. В чем главная проблема? Роботы дороги. Чтобы они подешевели, необходимо автоматизировать их производство. Но серии промышленных роботов слишком малы, чтобы это было выгодно. Получается замкнутый круг.

Разорвать его можно с помощью бытовых роботов. Бытовые роботы выпускаются большими сериями и размер серий, по-видимому, будет увеличиваться, что позволяет надеяться, что автоматизировать их производство будет экономически выгодно. Следовательно, снизится и стоимость компонент бытовых роботов, производство которых было автоматизировано. И бытовые и промышленные роботы во многом используют одни и те же компоненты, как показано на рис. 4.

Изюминка этой идеи состоит в том, чтобы использовать дешевые компоненты бытовых роботов при изготовлении промышленных. Если это будет сделано, то далее вступит в действие положительная обратная связь: дешевые компоненты снижают стоимость промышленных роботов. Дешевые промышленные роботы снижают стоимость производства компонент и бытовых, и промышленных роботов, это в свою очередь снижает... и т.д. Конечно, это произойдет только в том случае, если цена роботов будет сильно коррелирована с себестоимостью, что в наше время не всегда так.

Описанная положительная обратная связь запускает процесс самовоспроизведения [5], который и развивается по экспоненте.

А дальше? Вперед, к безлюдному производству, науке и стихам!

#### Список литературы

1. Цилькер Б., Орлов С. Организация ЭВМ и систем. Учебник для вузов. Изд. дом "Питер", 2006.
2. Теџмс Б. Механическое будущее // В мире науки. Май. 2007.
3. World Robotics 2000. United Nations/Economic Commission for Europe, The International Federation of Robotics. 2000.
5. Адаптивное управление точностью прокатки труб /Под ред. Ф.А. Данилова и Н.С. Райбмана. М., "Металлургия". 1973.
6. Чадеев В.М. Стратегия автоматизации // Автоматизация в промышленности. 2003. №2-4.