

## НАДО ЛИ ВОЗРОЖДАТЬ АНАЛОГОВУЮ ТЕХНИКУ?

Р. Р. Бабаян, В. П. Морозов

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва*

Кратко рассмотрены основные этапы развития и современное состояние аналоговой вычислительной техники. Отмечено, что резкое сокращение области применения аналоговых вычислений, затронувшее, в первую очередь, универсальные аналоговые машины, приводит к обеднению базы знаний в области проблем управления и к некоторой односторонности в подготовке специалистов. Обоснована целесообразность применения малых специализированных аналоговых вычислителей для учебных целей и для отработки алгоритмов управления подвижными объектами.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной предпосылкой последующего развития техники аналогового моделирования стало когда-то обнаружение и теоретическое осмысление простого факта — усилитель, охваченный глубокой отрицательной обратной связью через  $RC$ -цепи различного вида, можно использовать для достаточно точного и стабильного воспроизведения некоторых элементарных передаточных функций электрических цепей. Усилиями многих ученых и разработчиков аппаратуры это несложное "модельное средство" постепенно совершенствовалось и вскоре стало широко применяться также для структурного (через отображение последовательности звеньев) моделирования систем автоматического управления (САУ). Это обозначило более высокую степень абстракции модели по сравнению с ранее существовавшими моделями прямой аналогии.

Затем были развиты аналоговые методы и аппаратура для решения обыкновенных дифференциальных уравнений, вначале линейных, затем и нелинейных. Уже к середине 1960-х гг. аналоговые моделирующие устройства превратились в основной инструмент модельного исследования сложных систем, особенно в областях энергетики и автоматического управления подвижными объектами. Появились большие аналоговые машины, иногда называвшиеся вычислительными и содержавшие сотни операционных блоков, а также ком-

мутационное поле для соединения блоков в произвольном порядке. Данный этап характеризуется стремлением к моделированию на основе возможно более полного математического описания объекта. Разрабатываются методы решения уравнений с частными производными и интегрирования по невременному аргументу. Все это заставляло выдвигать повышенные требования к аппаратному обеспечению. Почти каждую постановку нового класса задач моделирования приходилось начинать с разработки более совершенных операционных блоков, усилителей и т. д. Вызывала трудности реализация нелинейных зависимостей, основным методом которой была кусочная аппроксимация, требовавшая трудоемких вычислений для расчета оптимального разбиения по участкам. Кусочно-нелинейная аппроксимация увеличивала аппаратные затраты и усложняла набор. Точность воспроизведения нелинейностей оставалась невысокой, то же относилось к умножению и делению. Вместе с тем, линейные операции выполнялись довольно точно, причем их точность зачастую ограничивалась лишь допусками на номиналы пассивных элементов — резисторов и конденсаторов. Тем не менее, задачи логического и интеллектуального характера, а также траекторные, требовавшие сложных вычислений с повышенной точностью, аналоговыми методами решать не удавалось.

На этом этапе важную роль сыграло появление аналого-цифровых вычислительных комплексов, так называемых гибридных вычислительных сис-



тем (ГВС) [1]. Разделение задачи между аналоговой и цифровой частями ГВС имело целью возложить операции с большим масштабом изменения переменных, логику и управление на цифровую часть, при этом ряд переменных приходилось передавать в обоих направлениях через А/Ц- и Ц/А-преобразователи.

Создание ГВС позволило аппаратно поддерживать организацию вычислительных процессов, выходящих за рамки получения одного частного результата (для определенного сочетания параметров системы управления или моделируемого объекта), что потребовало выполнения серии решений с различными исходными данными либо определенного числа взаимосвязанных последовательных решений (итераций). Здесь помогло использование в аналоговой части режима периодизации — быстрого повторения тактов решения с изменяемыми от такта к такту параметрами. Таким образом, с помощью аналоговых вычислителей (АВ) удалось эффективно решать оптимизационные, вариационные и краевые задачи, причем высокая частота периодизации позволяла получить значительный выигрыш в скорости решения по сравнению с чисто цифровыми методами. Именно в результате такого развития за аналоговыми машинами окончательно закрепилось название вычислительных — АВМ, а задачи полунатурного моделирования и динамики подвижных объектов частично отошли на второй план. Требования к точности и сходимости решений также стали определяться задачами вычислительного характера, в результате чего гибридные системы оказались довольно дорогостоящими и доступными, в основном, крупным исследовательским лабораториям. В то же время в тренажерных комплексах и полунатурных моделирующих стендах, где сама точность задания исходных параметров моделируемых объектов была не лучше 5...10 %, продолжали широко применяться менее точные большие универсальные АВМ, обеспечивавшие, тем не менее, удовлетворительную воспроизводимость экспериментов.

В связи с интенсивным развитием цифровой техники круг применений АВМ и ГВС для чисто расчетных целей продолжал сокращаться. Постепенно на цифровые устройства перешла большая часть задач инженерного проектирования, в том числе в области САУ. Несколько иным было положение в области полунатурного эксперимента с применением специализированных вычислителей. Бортовые ЦВМ и их стендовые аналоги по причине жестких ограничений на объем памяти и связи с внешними устройствами практически не могли быть применены для решения вновь возникающих задач динамики объектов в реальном, а тем более,

ускоренном масштабе времени. Эту нишу заняли небольшие специализированные АВ с быстрой периодизацией решения. Известен даже пример, когда такой АВ, успешно испытанный на стенде, после необходимой модификации вошел в состав бортового оборудования [2]. В то же время в Институте проблем управления РАН сложилась идеология применения "аналоговых приставок" — небольших по объему АВ, которые на моделирующем стенде или на реальном объекте, получая данные от штатной системы управления или ее датчиков, но, не затрагивая ее функций, осуществляют ускоренное моделирование процессов управления. Вывод результатов на отдельный указатель, так называемый "прибор-советчик", давал возможность оператору воспользоваться результатами опережающего моделирования для более эффективного управления объектом. Именно на основе такого подхода в реальных условиях были апробированы алгоритмы выработки критериев ухода на второй круг при посадке тяжелых самолетов [3], управления сильно колебательным рабочим органом — ковшом крупного экскаватора [4], движением колесного агрегата [5] и ряд других.

---

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

---

Как итог общего развития вычислительной техники в предшествующий период, в настоящее время задачи вычислительного характера, оптимизации и другие, ранее решавшиеся на АВ, решаются исключительно с помощью цифровых вычислителей класса персональных компьютеров. То же относится и к комплексному моделированию динамики сложных объектов, и к синтезу алгоритмов и систем управления ими. Для решения данного класса задач разработаны обширные пакеты программ, например, SPICE, MATLAB-SIMULINK и соответствующие методики [6]. По этим и другим причинам эксплуатация полунатурных аналого-цифровых комплексов полностью или почти полностью прекращена. Отсутствуют также сколько-нибудь определенные сведения о применении АВ специального назначения, но можно предположить, что оно крайне незначительно.

Заметную долю методы и устройства аналоговой обработки сигналов занимают во входных каналах обрабатывающих частях (front-end) систем сбора и обработки данных. Но там реализуется ограниченный набор отдельных аналоговых операций — масштабирование, сглаживание (фильтрация), выборка-хранение, мультиплексирование и т. п. Все эти операции укладываются в рамки предварительной подготовки сигналов для дальнейшей передачи в общий цифровой измерительный канал.

Вместе с тем, в развитых странах в настоящее время выпускается огромное количество микросхемных операционных усилителей (ориентировочно свыше 0,6 млрд. в год), в том числе весьма быстродействующих. Конечно, значительный процент такого рода изделий потребляется в измерительной и других смежных областях техники. Но крупными сериями выпускаются также многие другие специфические вычислительные аналоговые элементы — микросхемные множительно-делительные устройства, функциональные преобразователи, прецизионные источники опорных напряжений на всевозможные номиналы, компараторы, аналоговые коммутаторы и т. п. Не поддается перечислению разнообразие микросхемных А/Ц- и Ц/А-преобразователей с различными алгоритмами преобразования, разрядностью и быстродействием. Значительный прогресс наблюдается и в технологии — параметры элементов, такие как дрейф нуля операционного усилителя, входные токи, шумы, граничные частоты — непрерывно улучшаются. Широко практикуется объединение нескольких элементов в одном корпусе — до девяти операционных усилителей, компараторов или аналоговых переключателей. Постоянно уменьшаются габариты и улучшаются параметры пассивных элементов. Прецизионные высокостабильные малогабаритные резисторы и прецизионные пленочные конденсаторы с малыми потерями становятся общедоступными и недорогими изделиями.

Очевидно, для освоения этого ошеломляющего вала аналоговых компонентов необходимо располагать большим количеством разработчиков, владеющих методиками применения, т. е. свободно ориентирующихся в проблемах аналоговых вычислений. В свою очередь, подготовка таких специалистов требует наличия соответствующих методик и средств обучения. Видимо, именно поэтому ряд зарубежных фирм до настоящего времени выпускают АВ для учебных целей. В России, насколько известно, такие устройства не производятся, хотя кое-где на кафедрах учебных заведений еще доживают свой век давно устаревшие АВМ типа МН-10 и АВК-31.

С другой стороны, оценивая уровень развития и масштабы аналоговой элементной базы, можно утверждать, что в настоящее время возможно сконструировать аналоговый вычислитель современного уровня по точности и быстродействию только из серийных изделий, без каких-либо дополнительных исследований и разработок.

Единственная область, где прогресс пока незначителен — это разработка аналоговых БИС. Возможно, причиной является малая тиражируемость в виду относительно узкой специализации и, как следствие, довольно высокая ожидаемая стои-

мость. Определенным продвижением к созданию таких БИС можно считать выпуск так называемых аналоговых базовых матричных кристаллов (АБМК). Приятно отметить, что в данном направлении отечественная микроэлектроника оказалась на современном уровне [7].

Тем не менее, несмотря на все сказанное выше, следует признать, что область применения АВ в российской науке и промышленности крайне ограничена и вскоре может вообще исчезнуть. Означает ли это, что эпоха аналоговых вычислителей закончилась безвозвратно, так же, как, например, прошло время некогда универсальных электровакуумных усилительных приборов — радиоламп? Конечно, решение большинства прежде "аналоговых" задач по праву перешло к цифровым вычислителям. Однако отметим, что в этот поток попали и задачи, для решения которых аналоговые методы более эффективны. Прежде всего, сюда можно отнести различные виды информационного взаимодействия с реальными динамическими объектами, в том числе требующие быстрого решения систем дифференциальных уравнений.

Более взвешенно взглянуть на эти проблемы позволяет анализ приближающегося исчерпания предельных возможностей теперь уже цифровых вычислителей, основанных на двоичной арифметике и соответствующей элементной базе. Вот-вот появятся первые образцы квантовых компьютеров, в которых базисными будут не двоичные, а векторные операции. Сами процессы вычислений в таких компьютерах, пока слабо разработанные, будут существенно отличаться от нынешних дискретных алгоритмов. Ясно, что будущим пользователям (а сейчас они еще студенты) понадобится определенная широта взглядов относительно приемов решения задач, применяемых алгоритмов и элементной базы при проектировании целевых систем.

В этой связи нам представляется крайне важным не только техническое, но и мировоззренческое значение аналоговых методов и подходов как одного из важных видов информационного отражения свойств реальных динамических объектов. С этой точки зрения аналоговое моделирование можно считать фундаментальным понятием. Неслучайно в одной из своих недавних работ отечественный исследователь проблем управления называет аналоговые вычислители "моделирующими устройствами" [8]. В другой работе указывается даже, что базовый аналоговый элемент — операционный усилитель, охваченный глубокой отрицательной обратной связью, воплощает в себе "управленческую парадигму мира", т. е. некий, весьма общий принцип управления системами [9].



Так или иначе, аналоговые методы, представления и подходы, а также приемы непрерывной системотехники не могут, по нашему мнению, не войти как важная составная часть в аналитический арсенал современного инженера-разработчика в области систем управления.

Действительно, с аналоговыми представлениями тесно связаны амплитудно-частотные характеристики основных звеньев САУ, классификация и структурные схемы регуляторов, весь аппарат частотных и фазовых методов, критерии устойчивости и показатели качества систем с обратной связью и многое другое. Нельзя не упомянуть простоту и наглядность перехода от структурного описания систем регулирования к уравнениям в форме операторных и передаточных функций и далее — к аналоговому моделированию.

К сказанному можно добавить и ряд более частных соображений прикладного характера. Так, в обозримом будущем проектирование аналоговых регуляторов различного назначения, по-видимому, продолжится. Многие датчики, в том числе на подвижных объектах, останутся аналоговыми, как и системы первичной обработки их сигналов. Но ясно также и то, что в настоящее время процессы исследования и проектирования все больше формализуются, а потому зачастую проходят в чисто компьютерном формате, с меньшим вниманием к физике и реальным условиям протекания процессов. Исследовательские навыки, связанные, прежде всего, с предварительной, иногда полуинтуитивной оценкой адекватности модели и природы, постепенно утрачиваются. Вместе с отмеченным выше некоторым мировоззренческим перекосом в сторону дискретных методов и последовательных алгоритмов это может привести к обеднению "системы научных знаний" (в терминах работы [10]) в области проблем управления и некоторой односторонности в подготовке специалистов.

Поэтому нам представляется целесообразным начать переоценку роли аналоговых подходов и методов с образовательной области. Конечно, при этом необходимо учитывать, что ставший привычным способ информационного общения — взаимодействие человека с компьютером и его периферийными устройствами, хотя и существенно отличается от взаимодействия, например, с полунатурной моделью, даже не обязательно аналоговой, но не подлежит изменениям и к нему придется приспособиться.

Кроме того, ряд областей техники, родственных или смежных с рассматриваемой, с самого начала формировались как цифро-ориентированные и в соответствии с этим обзавелись солидной методикой, программной и аппаратной поддержкой. В первую очередь, сюда можно причислить цифро-

вую обработку сигналов, цифровую и дискретную фильтрацию, цифровую передачу данных и ряд других. Бессмысленно было бы пытаться искусственно внедрять в эти области аналоговые подходы. Совершенствуя обучение в области аналоговой схемотехники, безусловно, надо ориентироваться на те применения, где аналоговые методы имеют перспективы, основанные на:

- востребованности технических характеристик, присущих современным аналоговым устройствам (параллельный характер обработки, быстрое действие, надежность, экономичность);
- практически полной обеспеченности микроэлектронной элементной базой, постоянное совершенствование которой поддерживается запросами многих других отраслей техники [11];
- накопленном опыте в области методики и техники аналоговых вычислений, а также применении АВ в различных областях техники.

## ПЕРСПЕКТИВЫ

Полезные свойства АВ могут, по нашему мнению, в наибольшей мере проявляться при их применении совместно с цифровыми устройствами в задачах полунатурного моделирования и бортового управления — там, где требуются связь с реальной аппаратурой и высокое быстродействие. Сейчас в этой области широко распространены и применяются в качестве бортовых так называемые микро-РС, решающие, в том числе, и задачи динамики. Для таких применений может оказаться полезной, например, специфическая отказоустойчивость аналоговых устройств, имеющих совершенно иной по сравнению с цифровыми устройствами характер отказов при внешних воздействиях, в частности, радиационных. В микропроцессорных и микроконтроллерных системах наиболее подвержена таким отказам память, причем, например, радиационное повреждение всего нескольких ячеек может полностью разрушить довольно сложные алгоритмы. Разрабатываемые специальные меры борьбы с этим явлением, такие, как выделение резервных пространств памяти и традиционные меры резервирования (троирование) не дают должного эффекта, особенно, при медленно набираемой дефектообразующей дозе облучения. Для АВ статистически представительные данные об отказах при таких воздействиях нам не известны, но можно ожидать лишь некоторого возрастания погрешности вычислений. Кстати, методы контроля исправности, разработанные для быстродействующих АВ, позволяют локализовать погрешности и отказы сравнительно простыми



средствами, при этом расширяются возможности резервирования замещением.

Укажем для сравнения, что при троировании один из трех комплектов аппаратуры служит только для обнаружения отказов в двух других и не может быть использован по прямому назначению. Но даже глубокое резервирование цифровой аппаратуры не исключает таких случаев, как имевший место отказ счетверенной бортовой системы управления экспериментального летательного аппарата вследствие общей для всех комплектов вычислителя ошибки программирования. В подобных ситуациях дублирование цифровой САУ даже упрощенной и грубой аналоговой подсистемой способствовало бы поддержанию живучести объекта. По мере развития аэродинамики острота этой проблемы будет возрастать в связи с появлением все большего количества летательных аппаратов, неустойчивых без САУ. Примером объекта, кардинальному улучшению управляемости которого в вертикальной плоскости способствовало применение в составе САУ бортового АВ, может служить корабль-экраноплан [2].

Как уже отмечалось, важным для подобных применений может быть высокое потенциальное быстродействие АВ, обусловленное параллельным характером вычислений — решение сложного уравнения или системы уравнений происходит за один такт, а частота повторения тактов может составлять тысячи в секунду, позволяя реализовать различные варианты предсказания.

Вообще предсказание поведения какого-либо объекта на основе информации о его начальном состоянии — одна из важнейших научных и прикладных задач в области управления. Она сводится к нахождению некоторого алгоритма, позволяющего по состоянию объекта в исходный момент времени  $t_0$  в точке  $x_0$  пространства определить его будущие состояния в произвольные моменты времени  $t > t_0$ . Особо важно прогнозирование для такого большого подкласса динамических систем, как подвижные объекты различного назначения (летательные аппараты, суда, подводные лодки и др.). Как правило, подобные объекты, оснащенные собственными САУ, управляются с участием человека (пилота, судоводителя и т. д.), которому и приходится осуществлять прогнозирование. Строгая математическая постановка задачи прогнозирования применительно к указанному классу объектов дана в работе [12]. Важным свойством САУ с прогнозированием в смысле работы [12] при использовании ускоренной модели является мгновенная реакция производной предсказанной координаты на управляющие воздействия, что оказывается весьма полезным не только при управлении инерционными объектами, но и при обучении

операторов на стендах и тренажерах. К этому добавим, что аналоговое моделирование в ускоренном масштабе времени, уже подтвердившее свою эффективность в работах [3—5] и на тренажере [2], целесообразно применять для тех же целей и в дальнейшем.

Аналоговые вычислители с быстрой периодизацией решения могут оказаться полезными и в возникших за последнее время задачах реконструкции нелинейных динамических систем с непериодическими колебаниями [13]. Эти задачи сводятся к поиску алгоритмов, позволяющих по временной зависимости одной из координат системы определить вид и размерность самой системы. Здесь аналоговое устройство с быстрой перестройкой параметров могло бы, по нашему мнению, быть полезным в качестве управляемого генератора модельных временных зависимостей, позволяющих сравнивать различные алгоритмы реконструкции. Как видно, и данный, и предыдущий примеры иллюстрируют не вычислительное, а именно моделирующее применение АВ, основным назначением которых всегда было не получение численных значений, а генерация процессов, зависимостей и т. д. Поэтому перспективной областью применения АВ можно по-прежнему считать обработку алгоритмов, математически связанных с решением систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В этой связи отметим возможность расширения круга решаемых задач за счет серийного выпуска в микросхемном исполнении прецизионных и широкополосных множително-делительных устройств, перестраиваемых функциональных преобразователей, синусно-косинусных генераторов функций, аналоговых компараторов. Объединение в одной микросхеме нескольких элементов позволяет с помощью несложных устройств реализовать операции быстрой выборки и точного хранения, точного ограничения выходных величин операционных блоков на заданном уровне и т. д. С учетом столь широких возможностей создать АВ средней сложности с периодизацией решения, предназначенный, например, для проверки алгоритмов на реальном объекте, можно за короткое время. В дальнейшем отработанной с помощью АВ алгоритм может быть встроен в уже имеющееся или проектируемое цифровое управляющее устройство.

Более того, можно утверждать, что для многих задач, требующих решения дифференциальных уравнений, особенно нелинейных и нестационарных, аналоговые подсистемы могут оказаться весьма перспективными. Скорее всего, этого можно ожидать в составе гибридных систем, поскольку преимущества цифровых вычислителей в области обработки, хранения, вывода и представле-



ния больших массивов информации на сегодня неоспоримы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Применение гибридной вычислительной системы ГВС-100 для решения задач управления.* — М.: ИПУ, 1975.
2. *Диомидов В. Б.* Автоматическое управление движением экранированных объектов. — СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ "Электроприбор", 1996. — 204 с.
3. А. с. 1321283 (СССР). *Гулько Ф.Б., Волков В.К., Крючков Л.А., Морозов В.П.* Устройство сигнализации о необходимости повторного захода на посадку / БИ. — 1985. — № 4.
4. *Гулько Ф. Б., Залесов А. В., Морозов В. П., Певзнер Л. Д.* Синтез системы квазиоптимального управления механизмом шагающего экскаватора-драглайна методом прогнозирования // Техн. кибернетика. — 1984. — № 1. — С. 59—66.
5. А. с. 1166690 (СССР). *Волков В.П., Морозов В.П., Ситников А.П.* Устройство для автоматического вождения мобильных агрегатов / Б. и. — 1985. — № 26.
6. *Веремей Е. И., Корчанов В. М., Коровкин М. В., Погожев С. В.* Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов. — СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. — 370 с.
7. *Гольдшер А., Аткин Э.* Быстродействующие аналоговые интегральные микросхемы для аппаратуры физического эксперимента // Chip News. — 2000. — № 6. — 812 с.
8. *Бутковский А. Г.* О единой геометрической теории управления // Проблемы управления. — 2003. — № 1. — С. 8—12.
9. *Бабичев А. В., Бутковский А. Г., Похиолайнен С.* К единой геометрической теории управления. — М.: Наука, 2001.
10. *Эпштейн В. Л.* Антропоцентрическое информационное взаимодействие (вопросы терминологии) // Проблемы управления. — 2003. — № 1. — С. 28—32.
11. *Бабаян Р. Р.* Микроэлектронные устройства для обработки непрерывной информации. — М.: Наука, 2003. — 207 с.

*Роберт Рубенович Бабаян — проф., д-р техн. наук, зав. лабораторией Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН;*

*Виталий Пантелеймонович Морозов — канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник Института проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН.*

☎ (095) 334-93-01

E-mail: robab@ipu.rssi.ru

## Новая книга

**Шмидт Б. Искусство моделирования и имитации: Введение в имитационную систему Simplex3 / Пер. с нем. Под. ред. Ю. А. Ивашкина, В. Л. Конюха. — Ghent (Belgium): SCS-Europe BVBA, 2003. — 550 с.**

Подробно описана универсальная система имитационного моделирования Simplex3, состоящая из открытого банка моделей для различных сфер приложения, среды экспериментирования, обеспечивающей построение моделей, управление экспериментом, обработку, анализ и представление результатов, и специализированного объектно-ориентированного языка описания моделей Simplex-MDL.

Книга содержит изложение теоретических основ и практических методов имитационного моделирования реальных систем с многочисленными примерами реализации моделей непрерывных и дискретных процессов, массового обслуживания, производственных и транспортных систем, ситуационных моделей принятия решений. К изданию прилагается CD-ROM с цветным текстом и бесплатным программным обеспечением системы Simplex3.

Для системных аналитиков и разработчиков компьютерных систем поддержки принятия решений в различных сферах производственно-хозяйственного и административного управления, студентов вузов, специализирующихся в области автоматизированных систем обработки информации и управления.

Книгу можно приобрести в книжных киосках в Московском энергетическом институте и РХТУ им. Д. И. Менделеева, а также заказать по электронной почте <simulation@mail.ru> для отправки наложенным платежом.

*Профессор Бернд Шмидт — заведующий кафедрой исследования операций и теории систем университета Пассау (Германия), крупный специалист в области теории систем, имитационного моделирования и мультиагентных систем. Член Немецкого общества информатики (GI), Международного Союза моделирования и имитации систем (SCS), Ассоциации компьютерной техники, Немецкого общества исследования операций (DGOR). Автор ряда монографий, изданных в Германии и за ее пределами.*