

Посвящается Рикке

Аналоговый компьютер – это красота и радость на века¹

¹ Джон Х. Маклеод, Сюзетт Маклеод. Информационный бюллетень Совета по симуляциям (John H. McLeod, Suzette McLeod, The Simulation Council Newsletter). В сб.: Instruments and Automation. Т. 31. Март 1958. С. 488.

Оглавление

Предисловие от издательства	11
Благодарности и разъяснительное замечание	12
Аббревиатуры.....	15
Глава 1. Введение.....	17
1.1 Что такое аналоговый компьютер?	17
1.2 Прямые и косвенные аналоги	18
1.3 Краткая история аналоговых вычислений.....	20
1.4 Характеристики аналоговых компьютеров	24
Глава 2. Вычислительные элементы.....	27
2.1 Машинные единицы.....	27
2.2 Сумматор	28
2.3 Интеграторы.....	33
2.4 Свободные элементы.....	40
2.5 Потенциометры	42
2.6 Генераторы функций	47
2.7 Умножение	50
2.8 Сравнители и переключатели	52
2.9 Устройства ввода/вывода	53
Глава 3. Работа аналогового компьютера.....	55
Глава 4. Основы программирования	62
4.1 Радиоактивный распад.....	64
4.1.1 Аналитическое решение	65
4.1.2 Использование аналогового компьютера	66
4.1.3 Масштабирование.....	69

4.2 Гармонические функции	71
4.3 Развертка по частоте	76
4.4 Математический маятник.....	77
4.4.1 Прямая реализация.....	78
4.4.2 Варианты	79
4.5 Система масса–пружина–демпфер	80
4.5.1 Аналитическое решение	81
4.5.2 Использование аналогового компьютера	83
4.5.3 Резистивно-индуктивно-конденсаторная схема	85
Глава 5. Специальные функции	88
5.1 Интеграл Стильтьеса	88
5.2 Обратные функции	89
5.2.1 Квадратный корень.....	89
5.2.2 Деление.....	90
5.3 $f(t) = 1/t$	91
5.4 Потенциалы и полиномы	92
5.5 Фильтр нижних частот.....	92
5.6 Генератор треугольных/квадратных волн.....	94
5.7 Идеальный диод.....	95
5.8 Абсолютное значение	96
5.9 Ограничители.....	97
5.10 Мертвая зона	98
5.11 Гистерезис	99
5.12 Максимум и минимум	100
5.13 Двухпозиционная схема.....	100
5.14 Схемы удержания минимума/максимума	101
5.15 Схема выборки и удержания	102
5.16 Временная производная	103
5.17 Временная задержка.....	105
5.17.1 Исторические подходы к задержке	106
5.17.2 Оцифровка	107
5.17.3 Схемы выборки и удержания	108
5.17.4 Аналоговые сети задержки.....	110
5.18 Передаточные функции.....	117
5.19 Экспоненциально отображаемое прошлое.....	117
Глава 6. Примеры	122
6.1 Вывод полиномов на осциллограф.....	122
6.2 Химическая кинетика.....	123
6.3 Модель SEIR.....	127
6.4 Демпфированный маятник с внешней силой	129
6.5 Уравнение Матье.....	132
6.6 Уравнение Ван дер Поля.....	136
6.7 Генерация функций Бесселя.....	138
6.8 Решение одномерного уравнения Шрёдингера.....	140
6.9 Баллистическая траектория	143

6.10 Заряженная частица в магнитном поле	145
6.11 Резерфордовское рассеяние	148
6.12 Небесная механика	149
6.13 Подпрыгивающий мяч	155
6.14 Зомби-апокалипсис	157
6.15 Аттрактор Рёсслера	159
6.16 Аттрактор Лоренца	161
6.17 Еще один аттрактор Лоренца	163
6.18 Аттрактор Чуа	165
6.19 Нелинейный хаос	168
6.20 Аттрактор Айзавы	169
6.21 Осциллятор Нозе–Гувера	171
6.22 Модель SQ_M	172
6.23 Осциллятор Дуффинга	174
6.24 Вращающаяся спираль	175
6.25 Генерация спирали Эйлера	177
6.26 Модель Хиндмарша–Роуза	180
6.27 Симуляция полета планера	183
6.28 Обтекание аэродинамического профиля	188
6.29 Теплопередача	192
6.30 Двумерная теплопередача	198
6.31 Системы линейных уравнений	201
6.32 Человек в контуре	207
6.33 Инвертированный маятник	210
6.34 Упругий маятник	215
6.35 Двойной маятник	217
6.36 Создание музыки	223
6.37 Нейтронная кинетика	226
6.38 Гладкая сортировка	228
Глава 7. Гибридные вычисления	231
7.1 Гибридные контроллеры	232
7.2 Базовая работа	234
7.3 Траектория снаряда	236
7.4 Сбор данных	238
7.5 Тренировка ИИ с помощью аналогового компьютера	242
7.6 Гибридное решение систем линейных уравнений	247
7.7 Решение дифференциальных уравнений в частных производных с помощью случайных блужданий	249
Глава 8. Итоговый обзор и перспективы	253
Приложение А. Лапласово преобразование	256
А.1 Базовые функции	256
А.1.1 Шаговая функция	257
А.1.2 Дельта-функция	257
А.1.3 Рамповая функция	258

А.1.4 Экспоненциальные и тригонометрические функции	259
А.2 Лапласовы преобразования базовых операций.....	259
А.3 Дальнейшие характеристики	260
А.4 Обратное лапласово преобразование	261
А.5 Пример	262
А.6 Блок-схемы и передаточные функции	263
Приложение В. Решение уравнения тепла с помощью пассивной сети	264
Приложение С. Простой гибридный контроллер для THE ANALOG THING	269
Приложение D. Мультиплексор осциллографа	273
Приложение E. Генератор функции $\log()$	276
Приложение F. Генератор синуса/косинуса	278
Приложение G. Простой джойстиковый интерфейс	280
Приложение H. Система шин аналогового компьютера Analog Paradigm Model-1	282
Приложение I. Команды НуСоп	285
Библиография	288
Предметный указатель	296

Предисловие от издательства

Отзывы и пожелания

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте www.dmkpress.com, зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com; при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу http://dmkpress.com/authors/publish_book/ или напишите в издательство по адресу dmkpress@gmail.com.

Список опечаток

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг – возможно, ошибку в основном тексте или программном коде, – мы будем очень благодарны, если вы сообщите нам о ней. Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

Если вы найдете какие-либо ошибки в коде, пожалуйста, сообщите о них главному редактору по адресу dmkpress@gmail.com, и мы исправим это в следующих тиражах.

Нарушение авторских прав

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу dmkpress@gmail.com.

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.

Благодарности и разъяснительное замечание

Эта книга была бы невозможна без поддержки и помощи многих людей. Прежде всего я хотел бы поблагодарить свою жену Рикку Митсам, которая никогда не жаловалась на долгие часы, проведенные мной за написанием этой книги. Кроме того, она проделала много корректуры и подвергла постобработке все скриншоты осциллографов и различные фотографии, чтобы сделать их пригодными для печати.

Я также в большом долгу перед доктором Крисом Джайлсом, который не только дал много конструктивной критики, но и указал на целый ряд дополнительной интересной литературы и примеров программирования. Он также превратил бритву Оккама в бензопилу Оккама в процессе вычитки и доработки этой книги :-)

Кроме того, хочу выразить искреннюю благодарность доктору Дункану Кадду, Майкелю Хаджибади, Феликсу Леткеманну, Бернду Йоханну, Николь Матье, Оливеру Баху, Йенсу Флеммеру, доктору Кристиану Камински, доктору Роберту Шорру и Яну С. Кингу, которые вычитали эту книгу и дали полезные советы. В ходе обсуждения с Йенсом Брайтенбахом были выявлены многочисленные ошибки и несоответствия, которые были соответствующим образом исправлены.

Я также в долгу перед г-ном Мирко Хольцером, который запрограммировал цифровую часть гибридной компьютерной установки, описанной в разделе 7.5.

И наконец, я хотел бы поблагодарить Тибора Флорестана Плуто за разрешение использовать некоторые из его фотографий в этой книге (рис. 6.63 и главный рисунок).

Все рабочие примеры, приведенные в книге, были реализованы на аналоговом компьютере Analog Paradigm Model-1¹ по двум причинам. Во-первых, автор является одним из основных разработчиков этой системы, а во-вторых, эта машина, похоже, является единственным аналоговым компьютером, доступным в настоящее время на коммерческой основе. Все примеры могут быть

¹ Подробнее о нем можно почитать здесь <https://www.analogmuseum.org/english/examples/hybrid/>

(и в значительной степени уже были) запрограммированы на других машинах, таких как классические настольные компьютеры Telefunken или EAI, если принять во внимание относительно небольшие различия в работе и коммутации. Использование аналогового компьютера Model-1 не преследовало рекламных целей. Многие примеры были ранее опубликованы в Сети в сокращенном виде в виде инструкций по применению.

Большое количество информации о типичных системах, таких как настольные компьютеры EAI или Telefunken, включая руководства пользователя, схемы и т. д., можно найти в разделе библиотеки на веб-сайте <http://analogmuseum.org>.

Аббревиатуры

AC	Alternating Current – переменный ток
ADC	Analog to Digital Converter – аналогово-цифровой преобразователь
AI	Artificial Intelligence – искусственный интеллект
BBD	Bucket Brigade Device – прибор с зарядовой связью типа «пожарная цепочка»
DAC	Digital to Analog Converter – цифроаналоговый преобразователь
DC	Direct Current – постоянный ток
DEQ	Differential Equation – дифференциальное уравнение
DDA	Digital Differential Analyzer – цифровой дифференциальный анализатор
DVM	Digital Voltmeter – цифровой вольтметр
EMP	Exponentially Mapped Past – экспоненциально отображаемое прошлое
FET	Field Effect Transistor – полевой транзистор
FPGA	Field Programmable Gate Array – программируемая пользователем вентильная матрица
GND	Ground – земля
HPC	High Performance Computing – высокопроизводительные вычисления
IC	Initial Condition – начальное условие
LF	Line Feed – перевод строки
NG	Noise Generator – шумогенератор
ODE	Ordinary Differential Equation – обычное дифференциальное уравнение

OP	Operate – режим работы
PDE	Partial Differential Equation – дифференциальное уравнение в частных производных
RAM	Random Access Memory – оперативное запоминающее устройство
RC	Resistor Capacitor – резисторный конденсатор
RLC	Resistor Inductor Capacitor – резисторно-индукционный конденсатор
SEIR	Susceptible Exposed Infected Recovered – восприимчивый к заболеванию, подвергнувшийся заражению, заразный, выздоровевший
SJ	Summing Junction – суммирующий переход/узел
THAT	The Analog Thing – это аббревиатура названия аналогового компьютера

Глава 1

Введение

1.1 Что такое аналоговый компьютер?

В XXI веке книга о программировании аналоговых и гибридных компьютеров может показаться анахронизмом – зачем ее писать и, что еще важнее, зачем ее читать? Как бы ни казались аналоговые компьютеры забытыми, у них не только интересное и славное прошлое, но и захватывающее и многообещающее будущее во многих областях применения, таких как высокопроизводительные вычисления, симуляция динамических систем, образование и исследования, искусственный интеллект (биологические мозги работают, по сути, как аналоговые компьютеры), и, наконец, в качестве сопроцессоров для традиционных цифровых компьютеров с хранимыми программами, образуя тем самым *гибридные* компьютеры.

С точки зрения сегодняшнего дня аналоговые компьютеры воспринимаются главным образом как музейные экспонаты, а их парадигма программирования на первый взгляд кажется архаичной. Это впечатление как нельзя более ошибочно и вызвано в основном классическим *коммутационным полем*, или *коммутационной панелью*, на которую программы коммутируются в виде запутанного лабиринта проводов, напоминающего настоящий *спагетти-«код»*... Если задуматься, то такая форма программирования гораздо проще и интуитивно понятнее, чем алгоритмический подход, используемый в цифровых компьютерах с хранимыми программами (которые в дальнейшем для упрощения будем называть просто цифровыми компьютерами). В будущих реализациях аналоговых компьютеров, особенно тех, которые предназначены для использования в качестве сопроцессоров, вместо коммутационного поля, вероятно, будут использоваться электронные переключки. Программирование таких машин будет напоминать программирование *программируемых пользователем вентиляционных матриц (ППВМ)*, то есть компилятор преобразовывает набор уравнений задачи в подходящую конфигурацию переключек-переключателей, тем самым конфигурируя аналоговый компьютер под решаемую задачу.

Понятие *аналогового компьютера* уходит корнями в греческое слово *ἀνάλογος* («аналогос»), которое продолжает жить в таких терминах, как «аналогия» и «аналог». Оно хорошо характеризует аналоговый компьютер и отличает его от современных цифровых компьютеров. Последние имеют фиксированную внутреннюю структуру и управляются программой, хранящейся в памяти с произвольным доступом.

Аналоговый компьютер, напротив, вообще не имеет памяти для программ и программируется путем реального изменения своей структуры, пока не сформирует аналог, *модель*, заданной задачи. Этот подход резко отличается от того, что сегодня преподается на курсах программирования (за исключением тех, что посвящены *ППМ*). Задачи решаются не пошагово (алгоритмически), а путем соединения различных вычислительных элементов аналогового компьютера соответствующим образом, чтобы сформировать схему, которая служит моделью исследуемой задачи. Рисунки 1.1 и 1.2 иллюстрируют эти два принципиально разных подхода к вычислениям. В то время как классический цифровой компьютер работает более или менее последовательно, вычислительные элементы аналогового компьютера работают в идеальном параллелизме без проблем синхронизации, которые часто встречаются в цифровых вычислениях.

1.2 ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ АНАЛОГИ

Когда речь идет об аналогах в целом, необходимо различать *прямые* и *косвенные* аналогии, которые зависят от принципов, лежащих в основе решаемых задач и используемых для их решения аналогов. Вкратце, прямой аналог имеет в своей основе те же физические принципы, что и соответствующая задача, т. е. мыльный пузырь используется для моделирования минимальной поверхности, металлический лист с нагревателями и термодарами – для изучения закономерностей теплового потока и т. д. Если физические принципы, лежащие в основе задачи и аналогового компьютера, различаются, то компьютер называется косвенным аналоговым компьютером.

В дальнейшем в этой книге будут рассматриваться только косвенные аналогии, так как они гораздо более универсальны в применении, чем их прямые аналогии. Как правило, в основе таких машин лежат аналого-электронные вычислительные элементы, такие как сумматоры, интеграторы, умножители и т. п.

Хотя это звучит как противоречие, аналоговые компьютеры могут быть реализованы с использованием чисто цифровых компонентов. Два таких типа машин – *цифровые дифференциальные анализаторы* (*digital differential analyzer*) и *стохастические компьютеры*, примеры которых создавались на протяжении многих лет и, хотя они периодически возрождаются, так и не вошли в магистральное русло вычислительной техники. Программирование этих машин в основном подобно программированию аналоговых компьютеров. Эти цифроаналоговые компьютеры далее в книге рассматриваться не будут¹. Стохастические компьютеры рассматриваются в [Massen 1977].

¹ [Forbes 1957], [Forbes 1972], [Winkler 1961], [Beck 1958], [Klein 1957], [Goldman 1965], [Jackson 1960], [Ulmann 2010], [Shileiko 1964], и [Bywater 1973].

Цифровой компьютер эквивалентен высокооплачиваемому оператору очень надежного чрезвычайно быстрого (от 300 до 10 000 операций/с) настольного калькулятора



Рис. 1.1. Принцип работы цифрового компьютера с хранимой программой [Fruitt 1960]

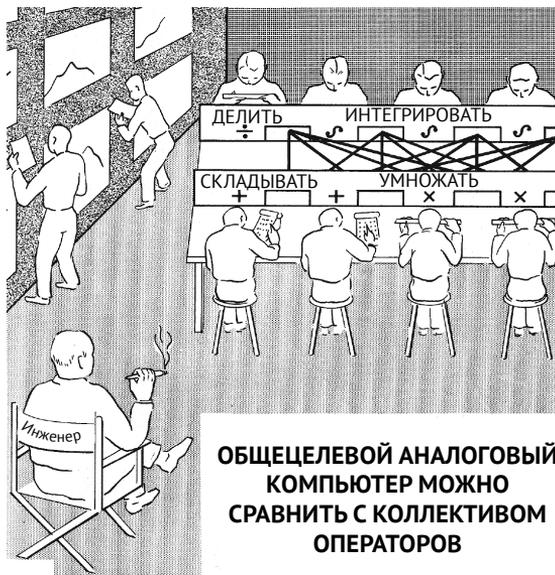


Рис. 1.2. Структура аналогового компьютера [Fruitt 1960]

1.3 КРАТКАЯ ИСТОРИЯ АНАЛОГОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Идея аналоговых вычислений, конечно, намного старше, чем современный преимущественно алгоритмический подход. Собственно говоря, самой первой машиной, которую можно с полным правом назвать аналоговым компьютером, или вычислителем, является *Антикитерский механизм* – чудо механики, построенное около 100 года до н. э. Он был назван в честь греческого острова *Αντικίθηρα (Антикитера)*, где его остатки были найдены в обломках римского судна ныряльщиками за губками в 1900 году. Поначалу не обращавшая на себя внимания, сильно проржавевшая глыба снастей вызвала интерес Дерека де Солла Прайса, который так резюмировал свои научные выводы¹:

«Немного страшно осознавать, что незадолго до падения своей великой цивилизации древние греки так близко подошли к нашему веку не только в своем мышлении, но и в своих научных технологиях».

Исследования этого механизма, который бросает вызов всем ожиданиям относительно древнего вычислительного устройства, продолжают до сих пор. Его назначением было вычисление положения солнца и луны, предсказание затмений и, возможно, многое другое. Механизм состоит из более чем 30 шестеренок необычайной точности, порождая механический аналог для изучения небесной механики, о которой никто не слышал и даже не думал в течение многих последующих веков².

Логарифмические линейки тоже можно считать простыми аналоговыми компьютерами, так как они позволяют выполнять умножение, деление, возведение в степень и т. д. путем сдвига (в основном) логарифмических шкал друг относительно друга. Тем не менее это довольно специализированные аналоговые компьютеры, как и *планиметры*, которые использовались (и в некоторой степени до сих пор используются) для измерения площади замкнутых фигур – данная задача часто возникает в геодезии, а также во всех отраслях естественных наук и техники.

В XIX и начале XX века с разработкой и применением практичных механических интеграторов дело пошло интереснее. На основе этих разработок Уильям Томсон, а впоследствии лорд Кельвин, создал концепцию машины, способной решать дифференциальные уравнения. Несмотря на то что на основе этой концепции не было создано ни одного пригодного для использования компьютера, его идеи оказались весьма плодотворными. В частности, его подход к программированию таких машин используется и сегодня и называется методом обратной связи Кельвина³.

¹ [Freeth 2008].

² [Freeth 2010].

³ Лорда Кельвина часто упоминают как человека, предложившего использовать аналоговые компьютеры для управления огнем орудий, но хотя механические дифференциальные анализаторы успешно применялись для управления огнем морских орудий в начале 1900-х годов, Ванневару Бушу понадобилось время, чтобы понять, что эти компоненты могут быть сконфигурированы в общецелевой компьютер.

На рис. 1.3 показан механический аналоговый компьютер, именуемый *дифференциальным анализатором*. По обе стороны от длинной конструкции, напоминающей стол, в центре рисунка видны различные вычислительные элементы, такие как интеграторы (различимы по маленьким горизонтальным дискам), дифференциальные шестерни, графопостроительные столы и т. д. Вытянутая структура в центре – это, собственно, соединение этих вычислительных устройств, состоящее из огромного количества осей и шестеренок. Процесс программирования такой машины был громоздким и времязатратным, так как всякий раз при настройке машины под решение дифференциальных уравнений, описывающих новую задачу, приходилось более или менее полностью разбирать и пересобирать структуру взаимосвязей.

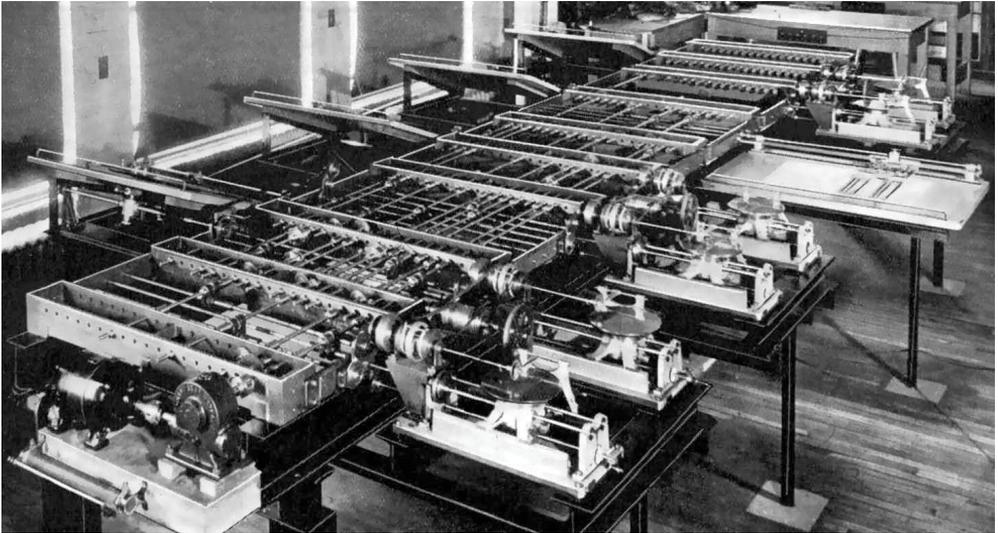


Рис. 1.3. Механический дифференциальный анализатор Ванневару Буша
[Meccano 1934]

На рис. 1.4 показана простая конфигурация дифференциального анализатора для интегрирования функции, заданной в графической форме. Центральный двигатель, показанный слева, приводит в движение все вычислительные элементы машины. Слева вверху виден входной стол. Он состоит из умножителя с перекрестием, который установлен таким образом, чтобы центральный двигатель перемещал его по горизонтали, а вертикальное положение контролируется вручную с помощью рукоятки, которая поворачивается так, чтобы перекрестие всегда шло по линии входной функции¹.

¹ Для выполнения этой задачи требуется твердая рука, которая была быстро автоматизирована, чтобы устранять этот довольно непредсказуемый источник ошибок во время вычислений.

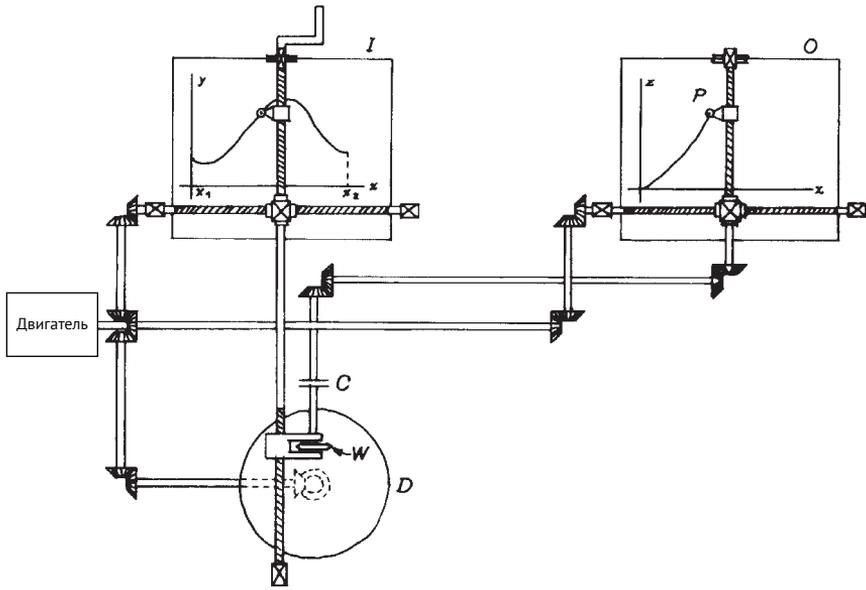


Рис. 1.4. Простая конфигурация дифференциального анализатора для интегрирования [Karplus 1958], [Soroka 1962]

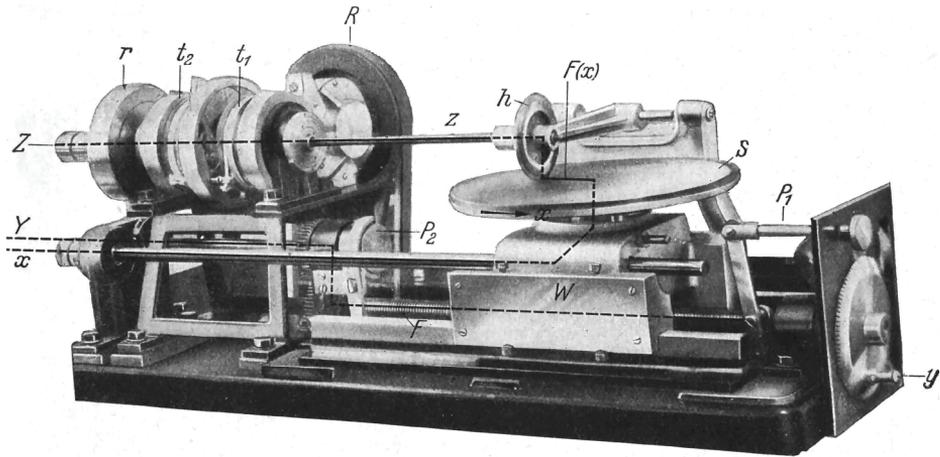


Рис. 1.5. Интегратор из дифференциального анализатора Oslo [Willers 1943]

В основе этой конфигурации лежит интегратор, показанный в нижней части рисунка. В сущности, он состоит из вращающегося плоского диска, приводимого в движение центральным двигателем, и фрикционного колеса, катящегося по поверхности диска. Радиальное положение этого колеса на диске теперь контролируется вертикальной компонентой перекрестия на столе ввода. При определенной угловой скорости вращающегося диска угловая скорость фрикционного колеса зависит от его радиального положения.

Если бы он располагался непосредственно над осью диска, то не вращался бы вообще, тогда как его угловая скорость была бы максимальной, если бы он располагался у края диска. Таким образом, это устройство эффективно выполняет операцию интегрирования базовой формы

$$\int_0^T f(\tau) d\tau,$$

где τ представляет *машинное время* (подробнее об этом позже) – в данном случае вращение горизонтального диска, – а $f(\tau)$ управляет радиальным положением фрикционного колеса. Интегратор работает в течение интервала времени $[0, T]$. На рис. 1.5 показана реальная реализация интегратора, который использовался в *дифференциальном анализаторе Oslo*.

В этой конфигурации выход из фрикционного колеса используется для управления вертикальным положением пера выходного стола¹ (правый верхний угол рисунка), тогда как его горизонтальное положение управляется центральным двигателем. В результате получается график интеграла над входной функцией.

Подобного рода механические дифференциальные анализаторы использовались недолго, так как их недостатки было нелегко преодолевать. Их конфигурирование отличается громоздкостью и времязатратностью, большое число механических деталей требуют большого объема работ по техническому сопровождению и обслуживанию, а скорость вычислений ограничена в связи с пренебрежимо малой инерционностью вращающихся и движущихся частей.

Были попытки создать электромеханические дифференциальные анализаторы, в которых базовые вычислительные элементы оставались чисто механическими, а их взаимосвязь осуществлялась с помощью серводвигателей и синхронизаторов². Выходы синхронизаторов можно было соединять со входами серводвигателей с помощью центрального электрического коммутационного поля, что по меньшей мере упрощало базовую настройку такого вычислителя.

Механические и электромеханические аналоговые компьютеры использовались в огромных количествах в *системах управления огнем орудий* во время Второй мировой войны. Будучи очень специализированными аналоговыми компьютерами, эти машины не оказали прямого влияния на дальнейшее развитие данного направления.

¹ Сегодня это устройство называется графопостроителем, или плоттером.

² *Синхронизатор* (также именуемый *Selsyn*) – это, по сути, вращающийся трансформатор с первичной обмоткой на роторе, который окружен, как правило, тремя вторичными обмотками. Когда на первичную обмотку подается сигнал переменного тока, в обмотках статора индуцируются сигналы, соответствующие угловому положению ротора, которые затем могут использоваться для определения угла поворота ротора. Два синхронизатора могут быть соединены друг с другом, образуя пару «передатчик – управляющий трансформатор», которая может стать основой сервосистемы для умножения крутящего момента – одной из самых сложных задач при создании механического дифференциального анализатора. Арнольд Нордсик использовал эти устройства в своем дифференциальном анализаторе, см. [Nordsieck 1953] и [Brock 2019].

Аналоговые компьютеры были разработаны независимо друг от друга примерно с начала 1940-х годов Гельмутом Хольцером в Германии, Джорджем А. Филбриком и А. Б. Макни в США. Их цели были совершенно разными.

Хельцер работал в немецком городе Пенемюнде над созданием знаменитой ракеты А4 (также известной как V2) и был ответствен за то, что в современных терминах называется бортовым компьютером. Результатом его работы стала первая в мире электронная система стабилизации и управления ракетой. Кроме того, он разработал первый в мире настоящий общецелевой аналоговый компьютер, который использовался при разработке А4. После Второй мировой войны этот уникальный компьютер был перевезен в США и использовался в Редстоунском арсенале для дальнейших ракетных разработок вплоть до 1950-х годов. Эта машина показана на рис. 1.6.

По другую сторону Атлантики электронный аналоговый компьютер Филбрика, получивший название *Polyphemus* из-за своего необычного внешнего вида с единственным осциллографом, установленным в верхнем положении стойки, вовсе не был нацелен на военное применение. Его машина была разработана и использовалась для решения задач, которые обычно возникают при управлении технологическими процессами в химической промышленности.

Машина Макни, разработанная в Массачусетском технологическом институте, была чисто академическим исследовательским устройством и, вероятно, первым высокоскоростным электронным аналоговым компьютером, способным выполнять повторяющиеся операции, в которых задача решается снова и снова с такой высокой скоростью, что на экране осциллографа появляется (почти) немерцающая картинка решения.

С сегодняшней точки зрения эти ранние аналоговые компьютеры кажутся довольно знакомыми. За исключением того, что в них использовались вакуумные лампы, они уже обладали всеми типичными аналоговыми вычислительными элементами, такими как сумматоры, интеграторы, умножители, генераторы функций и т. д. Более того, они были запрограммированы с использованием тех же методов, которые применяются и сегодня¹.

1.4 ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛОГОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

Хотя на первый взгляд вычисления с помощью косвенных аналоговых компьютеров с мириадами проводов межсоединений выглядят как недостаток, вполне вероятно, что этот способ программирования вскоре будет заменен сложными и высокоинтегрированными перекрестными переключателями, управляемыми сопутствующим цифровым компьютером. Но даже традиционная коммутационная панель, соединяющая множество вычислительных элементов, имеет ряд огромных преимуществ перед алгоритмом, хранящимся в памяти.

¹ [Ulmann 2023], [Small 2001].

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru