

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ТЕМАТИКЕ ИНСТИТУТА

В. Н. ВЬЮХИН



Лаборатория аналого-цифровых измерительных систем была создана А.Н.Касперовичем в 1968 г. в составе отдела цифровых измерительных приборов (руководитель отдела - И.Ф.Клисторин). В эти годы в стране началось широкое внедрение цифровых измерений как для решения чисто метрологических задач, так и для автоматизации процессов контроля и управления оборудованием. Тогда же на крупных предприятиях начали использоваться цифровые ЭВМ (обычно ЭВМ серии «Минск», «Днепр») для проведения испытаний и управления установками, в связи с этим потребовались средства ввода в ЭВМ аналоговых сигналов. Различные аспекты этой проблемы обсуждались на ежегодно проводимых в Институте всесоюзных конференциях по автоматическому контролю и электрическим измерениям, на которых собиралось много специалистов, заинтересованных в проведении исследований и разработок по аналого-цифровым измерительным приборам.

Создание в Институте лаборатории

аналого-цифровых измерений было вполне закономерно и отвечало требованиям времени. В дальнейшем все исследовательские работы проводились синхронно с развитием вычислительной техники и микроэлектроники, и решаемые задачи всегда соответствовали запросам текущего времени. Коллектив лаборатории первоначально включал сотрудников, работающих в Институте с момента его организации, это: А.Н. Касперович, В.А. Алексеев, С.Р. Грибанов, Н.В. Литвинов, О.М. Мантуш, сотрудников, пришедших позднее из Новосибирских вузов Ю.А. Попов, В.А. Беломестных, Ю.В. Шалагинов, В.И. Солоненко, В.П. Юношев и приехавших из других городов по приглашению А.Н.Касперовича - В.И.Прокопенко, В.Н.Вьюхин. Круг решаемых лабораторией задач включал: поиск методов, разработки и реализацию аналого-цифровых измерительных устройств и систем сбора данных на их основе. Поскольку основным элементом таких устройств является аналого-цифровой преобразователь (АЦП), то в первую очередь значительные усилия были сосредоточены на теоретических и практических аспектах анализа и разработки АЦП.

В то время в стране (и в мире) были наиболее распространены два типа АЦП: поразрядного уравнивания и несколько

разновидностей развертывающих АЦП (с линейной разверткой и интегрирующих на основе двойного интегрирования и преобразования «напряжение-частота»). АЦП поразрядного уравнивания обеспечивают хорошее быстродействие, но имеют плохую дифференциальную нелинейность. Развертывающие АЦП, наоборот, имеют хорошую монотонность, но низкое быстродействие.

Основным направлением в работе лаборатории на тот момент стали исследования, анализ и разработка быстродействующих АЦП (это направление превалировало всегда, вплоть до настоящего момента) и построение измерительных систем на их основе. АЦП имеет аналоговый вход и цифровой выход, поэтому его скоростные характеристики определяются аналоговой полосой по входу и частотой дискретизации по выходу. Полоса по входу ограничена динамическими ошибками, причиной которых является конечное время измерения. Поэтому были выполнены теоретические исследования, в том числе и компьютерное моделирование, позволяющие оценить величину этих ошибок, а также разработаны аппаратные решения, позволяющие уменьшить их влияние. Для уменьшения влияния динамических ошибок были разработаны несколько типов аналоговых запоминающих устройств, собственная апертура которых гораздо меньше времени измерения АЦП. На тогдашней дискретной элементной базе (транзисторы и диоды) к 1970 г. удалось создать АЦП с числом разрядов 10 и частотой дискретизации 100 кГц. Одновременно разрабатывались и другие компоненты цифровых измерительных систем: усилители сигналов с низким дрейфом, компараторы, коммутаторы сигналов, цифро-аналоговые преобразователи. С целью уменьшить длительность такта в измерительных цепях широко использовались сигналы тока вместо традиционных сигналов напряжения.

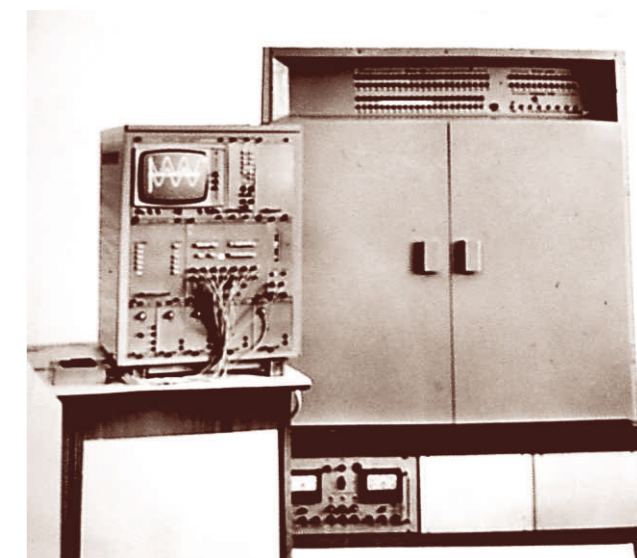
Из наиболее крупных работ, выполненных в начале 70-х гг., следует отметить две разработки, переданные для использования на предприятиях промышленности и науки. Многоканальная измерительная система (1970 г.) для измерения и ввода в ЭВМ сигналов от температурных датчиков имела 64 аналоговых канала, 12-ти разрядный АЦП поразрядного уравнивания и средства индикации и ввода результатов в ЭВМ. Микросхем тогда не было, поэтому все блоки коммутатор сигналов, ЦАП, усилители, компараторы, регистры, выполнялись на транзисторах (типа П416) и диодах. В конструкции устройства использовался прототип современных мезонинов. На

несущей плате с частью монтажа устанавливались идентичные каналные модули, содержащие усилители и ключи. На лицевую панель прибора были помещены знаковинтезирующие индикаторы на лампах типа «Никси», отображающие номер канала и результат в десятичном коде. Этот прибор использовался в составе стенда испытаний двигателей на машиностроительном предприятии в г. Калининграде (ныне г. Королев).

Другая разработка (1971 г.), выполненная по инициативе Ю.Е. Нестерихина, была предназначена для регистрации сигналов, получаемых от установки «Токамак» в Институте атомной энергии им. Курчатова. Была создана многоканальная система регистрации и записи сигналов в магнитную оперативную память с последующей передачей результатов в управляющую ЭВМ типа «Наири». В качестве магнитной памяти использовался куб памяти от ЭВМ БЭСМ-4 емкостью 4096*45разрядов. Четыре 10-разрядных отсчета АЦП упаковывались в одно слово и записывались в память. Устройство имело 16 каналов, у каждого канала было собственное устройство выборки и хранения для привязки отсчетов к единому времени. Для получения высокой скорости регистрации коммутатор каналов и цифро-аналоговый преобразователь были выполнены на генераторах тока, для чего входные сигналы преобразовывались в ток. Таким образом была достигнута скорость регистрации 2 мкс/канал. По сведениям от пользователей, эта система в 1983 г. еще использовалась экспериментаторами (но с более современным блоком памяти). На фото показано: слева - измерительная аппаратура с встроенным монитором, справа - куб памяти.



Слева направо:
В.А. Беломестных,
В.Н. Вьюхин,
Е.А. Шевердук,
Ю.В. Шалагинов,
В.А. Солоненко,
В.П. Юношев,
Е.А. Ковалев,
С.Р. Грибанов,
А.Н. Касперович.



В первой половине 70-х гг. в лаборатории интенсивно разрабатывались высокоскоростные АЦП на основе нетрадиционных архитектур. Максимальная частота дискретизации задается используемыми компонентами и архитектурой АЦП. Компоненты определяют длительность такта, а число тактов на измерение задается выбранной архитектурой. АЦП параллельного типа имеют время измерения - один такт, но аппаратные затраты пропорциональны 2^N , где N - число разрядов. В АЦП поразрядного уравнивания требуется N тактов измерения, а аппаратные затраты пропорциональны N . В лаборатории было предложено несколько оригинальных структур параллельно-последовательных АЦП, в которых за один такт определяется несколько разрядов. Новая структура кратно повышала частоту дискретизации, не требуя такого объема аппаратных затрат, как в чисто параллельных структурах. С помощью аналоговых устройств выборки и хранения удается включить ступени преобразования в конвейер и тем самым еще повысить частоту дискретизации. С использованием названных методов к 1975 г. удалось достичь частоты дискретизации 2.5 МГц для 8-разрядных АЦП.

В дальнейшем для уменьшения числа тактов измерения было предложено использовать аналоговую свертку сигналов. Суть этого метода заключается в том, что для кодирования сигнала используются аналоговые нелинейные устройства, имеющие периодическую зависимость выходного сигнала от входного. Набор таких устройств совместно с одним компаратором на канал создает набор шкал для считывания кода, примерно так, как это делается в оптических преобразователях угол - код. Реализовать свертку для всех разрядов АЦП технически очень сложно, поэтому она дополняется интерполяторами в виде набора компараторов на 2 - 4 разряда, которые кодируют уже свернутый сигнал. На основе аналоговой свертки, интерполяции и конвейера в 1981 г. был создан кодек телевизионного сигнала с числом разрядов 8 и частотой дискретизации 15 МГц.

Следует отметить, что все перечисленные здесь методы в настоящее время (2006 г.) являются ключевыми в производстве скоростных микроэлектронных АЦП.

Наивысшую скорость цифровой регистрации всегда обеспечивали устройства на основе потенциалоскопа запоминающей трубки, в которой сигнал при записи запоминается на мишени в виде рельефа и затем считывается посредством фотографии или вторым лучом с

малой скоростью развертки. Однако трудности скоростной записи длительное время не позволяли реализовать потенциальные возможности этого способа АЦ-преобразования. Положение изменилось тогда, когда (примерно к 1980 г.) в стране был освоен выпуск запоминающих трубок с усилителем яркости в виде микроканальной шайбы перед экраном, которую можно рассматривать как массив вторичных электронных умножителей. Аналогичная конструкция сейчас используется в приборах ночного видения. Усилитель яркости позволяет записывать потенциальный рельеф при очень высокой скорости развертки. На основе этой технологии в лаборатории был создан макет регистратора сигналов, позволяющий записывать однократные сигналы в полосе 1 ГГц с эквивалентной частотой дискретизации 100 ГГц и длине записи 512 точек. Для реализации этих параметров были разработаны специальные широкополосные усилители вертикального отклонения и развертки, согласованные отклоняющие системы типа «бегущей волны», система считывания и регистрации рельефа мишени. Однако в связи с отсутствием конкретных потребителей, высокой трудоемкостью и стоимостью аппаратуры в дальнейшем это направление не получило развития.

В начале 80-х гг. в лаборатории решалась задача создания электронной аппаратуры для регистрации подземных ядерных испытаний. Сейсмические датчики, применяемые для этих целей, имеют динамический диапазон 140 дБ (10^7) и поэтому чувствительность регистрации сейсмических сигналов полностью определяется электронной аппаратурой. Поскольку чувствительность всегда ограничена шумами, а мощность шума пропорциональна полосе частот, то для решения задачи требовалось найти: а) архитектуру измерительной части АЦП, имеющую при заданном времени измерения минимальную полосу; б) методы, обеспечивающие монотонность (дифференциальную нелинейность) характеристики преобразования на уровне шума. Требуемое время измерения - 1 мс, поэтому разного рода развертывающие АЦП, принципиально имеющие монотонную передаточную характеристику, не рассматривались. В результате анализа был получен на первый взгляд парадоксальный результат: минимальную шумовую полосу обеспечивает АЦП с минимальным числом тактов на измерение. Поэтому для реализации был выбран двухступенчатый параллельно-последовательный вариант, состоящий из двух АЦП поразрядного уравнивания. Немонотонность

характеристики преобразования АЦП поразрядного уравнивания определяется неточностью весов разрядов ЦАП, который уравнивает входной сигнал. Эта погрешность устранялась путем измерения неточности весов разрядов и последующей их коррекции цифровыми методами. Измерение ошибок весов базируется на том принципе, что вес старшего разряда «идеального» ЦАП должен быть равен сумме весов младших разрядов плюс единица младшего разряда. Вначале с помощью вспомогательного ЦАП измерялись N разрядных ошибок ЦАП первой ступени на переходных комбинациях типа $10..0 - 01..1$, затем вычислялись поправки для каждой из 2^N кодовых комбинаций. Процедуры вычисления поправок и коррекции результатов рабочих измерений выполнялись на микроЭВМ «Электроника-60». При проектировании учитывались также эффекты малого порядка: тепловые хвосты переходных процессов, суперпозиция весов разрядов, абсорбция конденсаторов. В итоге был получен динамический диапазон 120 дБ (20 разрядов) при времени измерения 1 мс, что соответствует (исключая габариты) характеристикам лучших современных сигма-дельта АЦП.

При наступлении в Институте эпохи «КАМАКа» в лаборатории был разработан набор аналого-цифровых КАМАК-модулей, позволяющий комплектовать типовые системы автоматизации научных исследований.

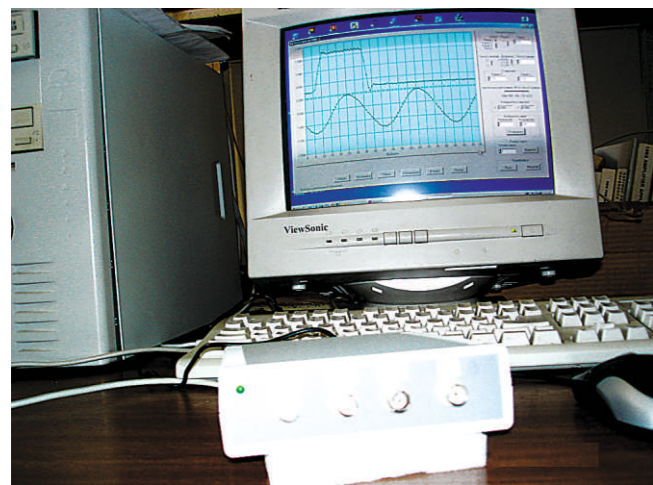
Последней крупной работой прошлого века было создание и в дальнейшем совместно с КТИ НП тиражирование измерительно-вычислительного комплекса статистической обработки широкополосных сигналов. Суть решаемой задачи состояла в изучении тонкой

структуры входного сигнала и обнаружении в нем наличия или отсутствия характерных признаков, описание которых задавалось извне. Полезный сигнал микровольтового уровня и полосой сотни мегагерц «сидит» глубоко под шумом, поэтому его выделение и обработка возможны только на основе мощной статистики, которую можно было реализовать только аппаратными средствами. Для этого был разработан процессор первичной статистической обработки с производительностью 300 Мбайт/сек., с его выхода предварительно обработанные данные передавались в компьютер. В компьютере вычислялись условные и безусловные вероятности наличия в исследуемом сигнале определенных признаков. В этой работе впервые был реализован способ параллельного включения АЦП для повышения частоты дискретизации. Аналого-цифровой блок включал 4 шестиразрядных АЦП с частотой дискретизации по 75 МГц и четырехканальную систему синхронизации с разрешением 1 нс, что обеспечивало суммарную производительность по аналоговому входу $300 \cdot 10^6$ измерений/сек. Система синхронизации позволяла также включать стробоскопический режим работы с разрешением 1 нс. Конструкция была модульной, на базе передовых стандартов VME и VXI. Для этой работы были выделены валютные средства на закупку шести персональных компьютеров и это было фактически первое поступление партии «персоналок» в Институт. Для сравнения с нынешней техникой: это были IBM/AT, 8МГц, 4 Mb ОЗУ, 2*20Mb диск, стоимость \$4000. На фото показан комплекс в варианте с крейтом VXI, а также коллектив разработчиков.



Сидят (слева направо): В.Н. Вьюхин, Ю.В. Шалагинов, Р.Г. Бульбак, Г.С. Прокопенко, В.Д. Васильев. Стоят: Ю.В. Бондаренко, А.Ю. Булгаков, Л.Е. Доленко, Ю.А. Попов, Е.А. Шевердук, А.Н. Касперович.

Современные микросхемы высокоскоростных АЦП имеют полосу частот по входу выше, чем максимальная частота дискретизации, хотя для их нормального применения соотношение должно быть обратным. Это дает основание повышать частоту дискретизации путем параллельного включения каналов с АЦП. Необходимо соблюдать следующие условия: каналы должны иметь идентичные передаточные характеристики и должны стробироваться точно со сдвигом по фазе $1/K$, где K - число каналов. При выполнении этих условий параллельные каналы будут функционировать точно так же, как одиночный канал с повышенной в K раз частотой дискретизации. Компьютерное моделирование работы такой системы позволило оценить качественно и количественно результирующие ошибки при несоблюдении названных условий и разработать методы их коррекции. Ошибки смещения нуля в каналах приводят к появлению в спектре выходного сигнала компонент с частотой дискретизации одного канала и ее гармоник. Масштабные ошибки и ошибки синхронизации вызывают появление на выходе комбинаций частоты дискретизации канала и частоты входного сигнала, число которых равно числу каналов. На основе исследования особенностей работы системы параллельно включенных аналого-цифровых каналов в 2005 г. был разработан регистратор широкополосных сигналов, имеющий полосу 200 МГц, частоту дискретизации 1 ГГц, число разрядов 8.



В заключение можно указать тенденции развития быстродействующих АЦП, под которыми здесь понимаются АЦП со временем измерения в один такт. До недавних пор здесь господствовала чисто параллельная архитектура, в которой имелось $2^N - 1$ компараторов (где N - число разрядов), определяющих кодовую комбинацию входного сигнала. Соответственно аппаратная сложность, тепловыделение и стоимость были также пропорциональны 2^N .



Ю. В. Бондаренко



В. А. Алексеев

Можно предположить, что «идеальная архитектура» АЦП должна содержать всего лишь N каскадов, по одному на разряд. Такая архитектура может быть реализована с помощью упомянутых ранее устройств аналоговой свертки (УАС), выходной сигнал которых является периодической функцией входного. Последовательное включение N каскадов УАС позволяет считывать код сигнала примерно так же, как это делается в оптических преобразователях угол - код. Выходной сигнал УАС образно можно представить в виде набора зубцов, число которых в каждом из N УАС равно 2^{k-1} , где k - номер разряда, начиная со старшего. Устройства, реализующие периодическую зависимость выхода от входа, естественны для оптики и джозефсоновских сквидов за счет периодичности фазы, однако в кремнии для 8 разрядов эта задача не решена. Поэтому в современных микросхемах АЦП помимо свертки (fold) используется также интерполяция выходных сигналов УАС компараторами, что позволяет уменьшить число УАС за счет увеличения числа компараторов. Для минимизации длительности такта широко используется конвейерная техника, причем длина конвейера может достигать 14 тактов. Все эти способы повышения быстродействия в разное время были исследованы и апробированы в лаборатории. Существующие сегодня микросхемы АЦП могут обеспечить поток 2 Гбайт/с, и возникает серьезная проблема, как с ним справиться. У нас эта задача решается за счет распараллеливания как процесса измерения, так и записи результатов в память.



Ю. А. Попов
и В. Н. Вьюхин