

в 500 раз за время 250 нс. Зарядка ВМГ осуществляется от конденсаторной батареи емкостью  $C=1,8 \cdot 10^{-3}$  Ф с зарядным напряжением  $u_0=8$  кВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Сахаров, Р. З. Людаев, Е. П. Смирнов, Ю. И. Пезоцев, А. И. Павловский, В. К. Чернышев, Е. А. Феоктистова, Е. И. Жаринов, Ю. А. Зысин. Магнитная кумуляция.— Докл. АН СССР, 1965, № 1.
2. J. C. Crawford, R. A. Damerow. Explosively Driven High-Energy Generators.— J. Appl. Phys., 1968, v. 39, № 11.

Поступила в редакцию 13 сентября 1972 г.

УДК 621.317+681.14

Г. РЕЗНИКОВ, К. ТАРНАИ

(Будапешт)

### РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АМПЛИТУДНО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА ЭВМ

При разработке амплитудно-цифрового преобразователя [1] с высокой разрешающей способностью в ЦИФИ АН ВНР с целью расчета и моделирования процесса преобразования была использована функционирующая в институте ЭВМ типа ИСТ-1905.

Упомянутый преобразователь является одним из входных блоков целевой вычислительной машины — амплитудного анализатора, служащего для измерения ядерной энергии. В статье рассматриваются характеристики амплитудного спектра, причины его искажения, классические формы подсчета потерь. Подробно обсуждаются амплитудно-цифровое преобразование и моделирование потерь в счете. В заключение проводится параллель между классическими методами и моделированием на ЭВМ.

**Анализ амплитудного спектра.** На рис. 1 представлен общий вид одной из установок измерительного комплекса реактора, входным устройством которого является 8192-канальный амплитудно-цифровой преобразователь типа (NE-289). Преобразователь используется для измерения амплитудных спектров.

На рис. 2 показан амплитудный спектр первичной охлаждающей воды реактора VVR-S: кривая 1 соответствует измерению, проведенному с кристаллом NaJ (Tl), а кривая 2 — измерению с полупроводниковым детектором Ge(Li). Две кривые хорошо отражают разницу в разрешающей способности двух детекторов. С помощью полупроводникового детектора удалось определить целый ряд пиков, которые при сцинтиляционном измерении даже не заметны. Для распознавания радиоактивных материалов в первичной охлаждающей воде знать только места пиков, т. е. значения энергии (Zn—71, Ta—186, Xe—138, Zn—62, Rn—222, Mo—101, Ta—177; 510 кэВ), недостаточно; для однозначного определения нужно знать и время полураспада. Многократно измеряя и усредняя амплитудный спектр, можно определить время полураспада с хоро-

шим приближением. Изменение как шкалы энергии, так и шкалы интенсивности искажает спектр [2, 3].

Исследуем основные причины искажения спектра. Оценка всех комплексных измеренных спектров затрудняется ошибками, зависящими от времени и амплитуды. Эти ошибки появляются вследствие ошибочной информации, вызванной статистикой детектирования частиц, а также вследствие ошибки в самом амплитудно-цифровом преобразовании.

Исследуем статистику временного распределения частиц при радиоактивном распаде. Вероятность того, что атомное ядро не распадается в течение времени  $t$ , можно записать как

$$P(t) = e^{-nt}, \quad (1)$$

где  $n$  — постоянная, пропорциональная интенсивности излучения. Производная от  $P(t)$ , т. е. плотность вероятности, дает вероятность того, что за время  $dt$  появится первый импульс, т. е.

$$p(t) = \left| \frac{dP(t)}{dt} \right| = ne^{-nt}. \quad (2)$$

При моделировании на ЭВМ была использована зависимость (2) и соответствующая подпрограмма была обозначена `gdmexp 1 (n)`. С помощью распределения Пуассона в более общей форме можно охарактеризовать вероятность того, что за время  $T$  будет появляться  $m$  импульсов:

$$p(m, T) = \frac{(nT)^m}{m!} e^{-nT}. \quad (3)$$

Статистика амплитудного распределения частиц может быть охарактеризована нормальным распределением. Хотя изотопы излучают энергию дискретно, пики, измеренные на амплитудных анализаторах, обычно попадают в несколько каналов. Первым источником ошибок является то, что в полупроводниковом или сцинтилляционном детекторе появляется не бесконечное число частиц, а дискретное число ( $N$ ) с вероятностью  $p$ . Число пар электрон — дырка в полупроводниковом кристалле, или число фотонов, вылетающих с фотокатода умножителя, соответствует распределению Бернулли, которое приближается к распределению Гаусса, если  $N$  достаточно большое:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

где  $m$  — первый момент распределения;  $\sigma^2$  — второй момент распределения. При моделировании (4) на ЭВМ подпрограмма была обозначена `gdmnorm 1 (m, s)`.

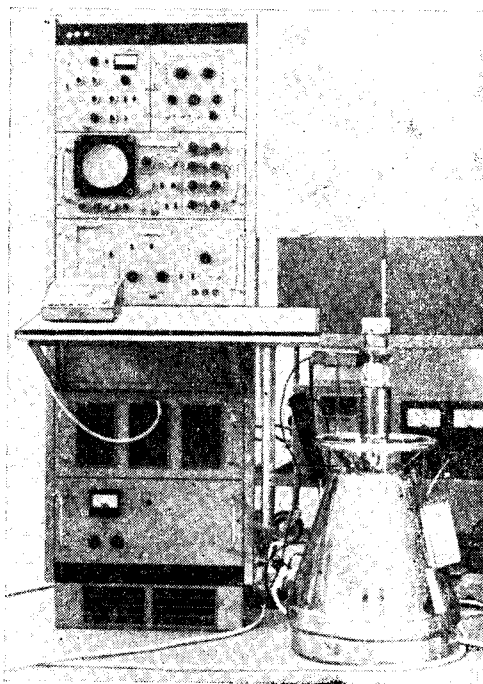


Рис. 1.

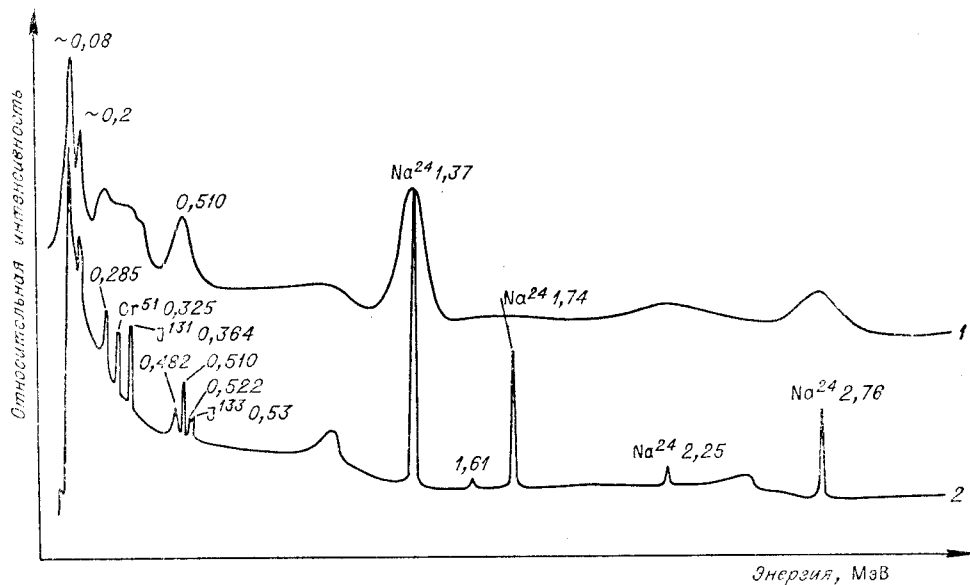


Рис. 2.

Амплитудно-цифровое преобразование также вызывает ошибки, зависящие от времени и амплитуды. Среди ошибок временного характера в первую очередь нужно упомянуть конечное время преобразования, вследствие которого возникают потери счета. Время преобразования может быть постоянным или переменным. Переменное время преобразования зависит от измеряемой амплитуды, например, может быть пропорциональным ей. Таким образом, ошибки временного и амплитудного характера суммируются.

В измерениях с совпадением ошибки могут вызываться еще и временной разрешающей способностью схемы совпадения. При анализе изотопов большой интенсивности эффект наложения уже непренебрежим и его появление ведет к характерному искажению спектра.

Важной характеристикой преобразования является дифференциальная нелинейность, определяющая равномерность преобразования. Ошибка может возникать из-за шума входного усилителя. Стоит также упомянуть и ошибку квантования, появляющуюся вследствие преобразования аналоговой величины в цифру.

Разработанный конвертер имеет систему регулирования с двумя петлями, которая уменьшает влияние нестабильности нулевой точки и крутизны характеристики преобразования.

**Исследование амплитудно-цифрового преобразования классическими методами.** Подробно изучены классические методы исследования измерений амплитудных спектров, зависящих от энергии и интенсивности. Выделим среди них зависимости, относящиеся к потерям в счете. Потери в счете определяются отношением зарегистрированных и всех поступивших частиц

$$V = \frac{\bar{n}_r}{\bar{n}} = \frac{1}{1 + g(T)}, \quad (5)$$

где  $\bar{n}$  — число частиц, поступающих в единицу времени;  $\bar{n}_r$  — число частиц, зарегистрированных в единицу времени;  $g(T)$  — среднее число

импульсов, теряющихся за один период «мертвого» времени;  $T$  — мертвое время (время между двумя измерениями импульсов).

Исследуем потери в счете в случае постоянного мертвого времени. Количество импульсов за время  $T$  будет составлять

$$g(T) = \sum_{m=1}^{\infty} mp(m, T), \quad (6)$$

где  $p(m, T)$  — вероятность того, что за время  $T$  поступило как раз  $m$  импульсов. Так как  $p(m, T)$  является распределением Пуассона, то

$$g(T) = \sum_{m=1}^{\infty} m \frac{(nT)^m}{m!} e^{-nT} = nT. \quad (7)$$

Таким образом, в случае постоянного мертвого времени получим хорошо известную формулу потерь в счете:

$$V = \frac{1}{1 + nT}. \quad (8)$$

Для переменного мертвого времени зависимость распределения мертвого времени обозначим  $q(T)$ . Среднее число импульсов, теряющихся за один период мертвого времени, равно

$$G(T) = \int_T g(T) q(T) dt = nM_{1T}, \quad (9)$$

где  $M_{1T}$  — первый момент распределения мертвого времени  $q(T)$ . Так как в случае переменного мертвого времени  $q(T)$  зависит от распределения амплитуд, определим зависимость между  $q(T)$  и  $f(A)$ . Предположим, что преобразователь работает по принципу линейного кодирования и данные накапливаются в памяти. Тогда

$$T = T_m + cA, \quad (10)$$

где  $T_m$  — мертвое время запоминания;  $cA$  — один период амплитудно-временного преобразования. Распределение мертвого времени можно получить путем трансформации амплитудного распределения, т. е.

$$q(T) = f[A(T)] \frac{dA(T)}{dT} = \frac{1}{c} f\left(\frac{T - T_m}{c}\right). \quad (11)$$

Для распределения Гаусса потери в счете определяются с хорошим приближением соотношением

$$G(T) = nT_m + ncM_{1G}, \quad (12)$$

где  $M_{1G}$  — ожидаемое значение распределения Гаусса. Если  $c=0$ , то получим выражение, относящееся к постоянному мертвому времени.

Упомянутые выражения являются только основными. Потери в счете описываются значительно более сложными формулами. Дальнейшие трудности возникают тогда, когда оцениваемый спектр состоит из нескольких пиков с различной энергией.

**Моделирование амплитудно-цифрового преобразования.** Основная программа амплитудно-цифрового преобразования показана на рис. 3. В начале каждого цикла вводится одно случайное число  $\tau$  из экспоненциального распределения с  $n$  параметрами. Случайные числа с экспоненциальным распределением устанавливаются с помощью `rdmexp 1 (n)`. Если момент времени, внесенный подпрограммой `rdmexp 1 (n)`, появляется по окончании мертвого времени, то с помощью `rdmpgm 1 (m, s)` устанавливается случайное число ( $u$ ) нормального распределения, характеризующее амплитуду измеряемого напряжения.

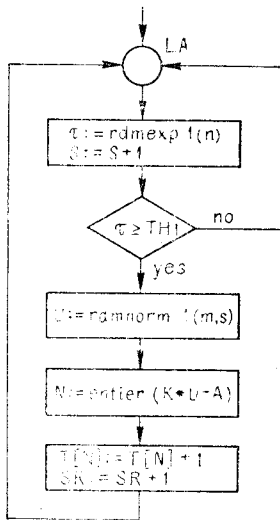


Рис. 3.

Заметим, что основой обеих подпрограмм является YNEXTRAN — 2, который создает псевдослучайные числа из почти равномерного распределения, находящиеся в интервале  $[0, 1]$ . Обе подпрограммы устанавливают случайные числа основной подпрограммы по предписанной зависимости. Подпрограмма `rdmexp 1 (n)` устанавливает одно случайное число за 640 мкс, а подпрограмма `rdnorm 1 (m, s)` — за 800 мкс.

Зная параметры конвертера по входному напряжению  $u$ , можно определить помер канала, а затем к содержанию определенного таким образом канала прибавить единицу. Число зарегистрированных событий подсчитывается в регистре SR. После этого начинается новый цикл. Если  $S$  достигает наперед заданного значения, то ввод значений пар  $\tau$ ,  $u$  заканчивается. По выходе из цикла амплитудный спектр можно вывести на телетайп или самописец. Потери в счете определяются отношением  $SR/S$ . Основную программу амплитудно-цифрового преобразования целесообразно еще дополнить некоторыми параметрами преобразователя.

На рис. 4 изображена расширенная программа амплитудно-цифрового преобразования.

Переключатель режимов работы SPECTRUM делает возможным выбор нормального режима работы, режима работы с совпадением и несовпадением. Верхний и нижний пороги диапазона измерения могут устанавливаться потенциометрами. В зависимости от положения переключателя мертвое время может быть постоянным или переменным.

Исследуем, какие отклонения имеются здесь от основной программы. Прежде всего определим момент времени поступления сигнала совпадения. Если соответствующее значение логического выражения ТКР будет true, то сигнал совпадения является периодическим, а если false, то статистическим, т. е.

if ТКР then ТКО := N \* T else; ТКО := ТКО +  $\tau$  \* entier (rdmuni 1 + 0,5),

где ТКО — момент времени поступления сигнала совпадения; T — время повторения сигнала совпадения; `rdmuni 1` для каждой процедуры задает одно псевдослучайное число из почти равномерного вероятностного распределения в интервале  $[0, 1]$ . Установка органов управления на передней панели исследуется следующим логическим условием:

if LOGU

or (LOGK and ( $\tau \geq 0.9 * ТКО$  and  $\tau \leq 1.1 * ТКО$ )) or (not LOGK and ( $\tau \leq 0.9 * ТКО$  or  $\tau \geq 1.1 * ТКО$ ))

then

$u := rdnorm 1 (m, s)$  else goto LX

Значит, случайное число  $u$ , определяющее амплитуду, записывается только тогда, когда переключатель режима находится в положении нормальной работы или в положении совпадения и условия совпадения выполняются, или в режиме несовпадения и временные условия не выполняются.

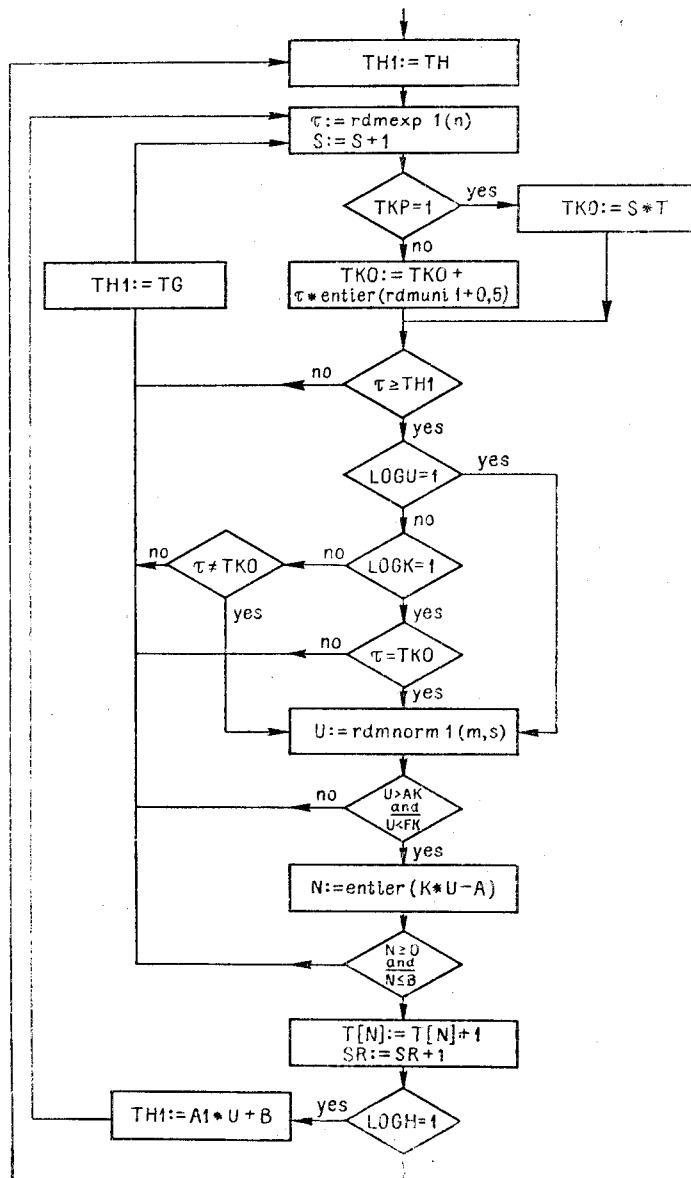


Рис. 4.

Следующее логическое условие исследует, имеет ли амплитуда входного сигнала  $u$  значение, находящееся между верхним и нижним порогами:

if  $u \geq AK$  and  $u \leq FK$

then

$N := \text{entier } K * u - A$

где  $AK$  — напряжение нижнего порога;  $FK$  — напряжение верхнего порога. Если номер канала  $N$  попадает в измерительный диапазон (максимальный номер канала  $B$ ), то содержание канала увеличивается на единицу. Если мертвое время постоянно, то оно учитывается в основ-

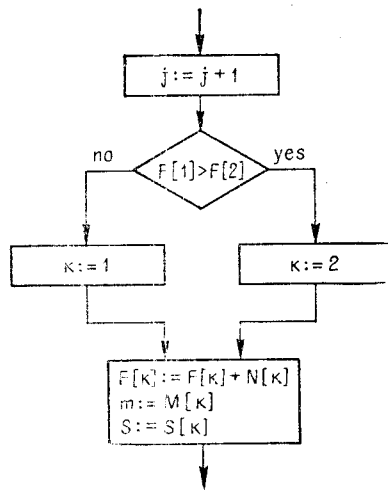


Рис. 5.

(рис. 5), которая выбирает числа из различных нормальных распределений. С помощью этой вспомогательной программы образуются два пика. От отношения интенсивности зависит то, сколько раз нужно подряд выбрать числа из каждого распределения. Данная программа может быть расширена на любое число пиков.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Маталли, С. И. Чубаров, А. А. Иванов. Многоканальные анализаторы ядерной физики. М., Атомиздат, 1967.
2. Я. Бири, Г. Резников, К. Тарнаи. Оценка с помощью ЭВМ спектральных искажений. Препринт 13-4720, Дубна, 1969.
3. B. Soucek. Losses in systems with variable dead time.— Nuclear Instruments and Methods, 1964, 27.

Поступила в редакцию 18 ноября 1971 г.

УДК 517.948.32

Р. Д. БАГЛАЙ  
(Новосибирск)

### ВЫБОР ПАРАМЕТРА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Методы выбора параметра регуляризации рассматривались в [1—3]. Исходя из этих работ, мы пришли к иному, более обоснованному и вполне конструктивному способу, в котором используются свойства функции чувствительности регуляризованного решения к относительному изменению параметра регуляризации. Вначале остановимся на одной из тех физических задач, при решении которой применялся этот способ, а также напомним основные пункты общей схемы регуляризации по А. Н. Тихонову [4].

Рассмотрим одномерный преобразователь (фильтр), математическая модель которого представима в виде интегрального уравнения типа свертки