

## Многоstopовый анализатор для времяпролетных измерений с разрешением $\pm 5$ ns

© Ю.В. Тубольцев, Ю.В. Чичагов, Е.М. Хилькевич

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: tuboltsev@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 17 марта 2009 г.)

Описан многоканальный многоstopовый временной анализатор, обеспечивающий измерение интервалов времени между стартовым и stopовыми импульсами и осуществляющий накопление их временного распределения в собственной памяти модуля. Регистрация времени прихода stopового сигнала осуществляется с разрешением  $\pm 5$  ns и мертвым временем 30 ns. Количество stopов на старт может достигать 6000. Число каналов — 131 072 ( $2^{17}$ ). Временной анализатор выполнен в модуле КАМАК и может быть использован при построении измерительно-информационных систем для решения задач времяпролетными методами в нейтронной спектроскопии, масс-спектроскопии, исследования временных характеристик люминесцентного излучения.

PACS: 01.50.Pa

### Введение

При проведении ряда экспериментов в области нейтронной спектроскопии одним из важнейших параметров, характеризующих физические свойства объекта исследования, является время пролета нейтронов или сопутствующих им заряженных частиц [1,2]. Аналогичная задача решается при исследовании веществ с помощью времяпролетных масс-спектрометров [3,4], а также при исследовании временных параметров люминесцентного излучения, возбуждаемого импульсным источником [5–8]. Как правило, подобные исследования сводятся к измерению интервалов между сигналом, вырабатываемым в момент формирования исходного события, например, пучка исследуемых частиц или возбуждающего импульса (стартовый сигнал), и сигналами, вырабатываемыми детектором в момент прихода частиц определенной энергии (stopовыми сигналами). Так как в образовавшемся пучке присутствуют частицы различной энергии, имеющие различное время пролета до детектора, то моменты их регистрации будут распределены во времени. Результатом измерения является сформированное временное распределение stopовых сигналов (времяпролетный спектр).

Измерение распределения сигналов во времени осуществляют с помощью анализаторов. В работе последних можно выделить два основных действия. Это преобразование временных интервалов между стартовым и stopовыми сигналами в цифровой код и формирование временного распределения stopовых сигналов. Первое действие осуществляется сугубо аппаратными средствами с помощью одностоповых или многостоповых время-цифровых преобразователей [9]. Формирование спектров осуществляется как с помощью специальных устройств обработки и накопления информации, так и программными средствами, путем обработки данных с время-цифровых преобразователей.

В настоящее время технические возможности позволяют создавать компактные многоканальные временные анализаторы, основанные на высокоточных высокоскоростных многостоповых время-цифровых преобразователях и устройствах обработки и накопления информации достаточно большой емкости и быстродействия.

При разработке описанного ниже многостопового временного анализатора были учтены следующие факторы.

1. На один стартовый сигнал необходимо, в зависимости от решаемой задачи, регистрировать от единиц до нескольких тысяч stopовых сигналов. Для предотвращения искажений получаемых времяпролетных распределений требуется обеспечить полную или равновероятную регистрацию stopовых сигналов во всем заданном временном диапазоне.

2. В ряде задач наиболее полную картину физического явления дают измерения, проводимые в достаточно широком диапазоне энергий частиц, что выдвигает соответствующие требования к динамическому диапазону измерения времени пролета.

3. После возникновения пучка частиц даже самые быстрые из них достигают детектора только через некоторое время. Таким образом, в некоторых экспериментах начальный участок диапазона не содержит информации и может быть исключен (смещено начало регистрации stopовых событий).

4. В многостоповом временном анализаторе регистрации одного stopового сигнала занимает определенное время, в течение которого невозможна регистрация последующих событий. Это так называемое мертвое время вносит искажения в получаемое временное распределение. Несмотря на то что при последующей обработке эти искажения могут быть учтены, погрешность поправки зависит от величины „мертвого времени“. Совершенно недопустимо иметь переменное „мертвое время“.

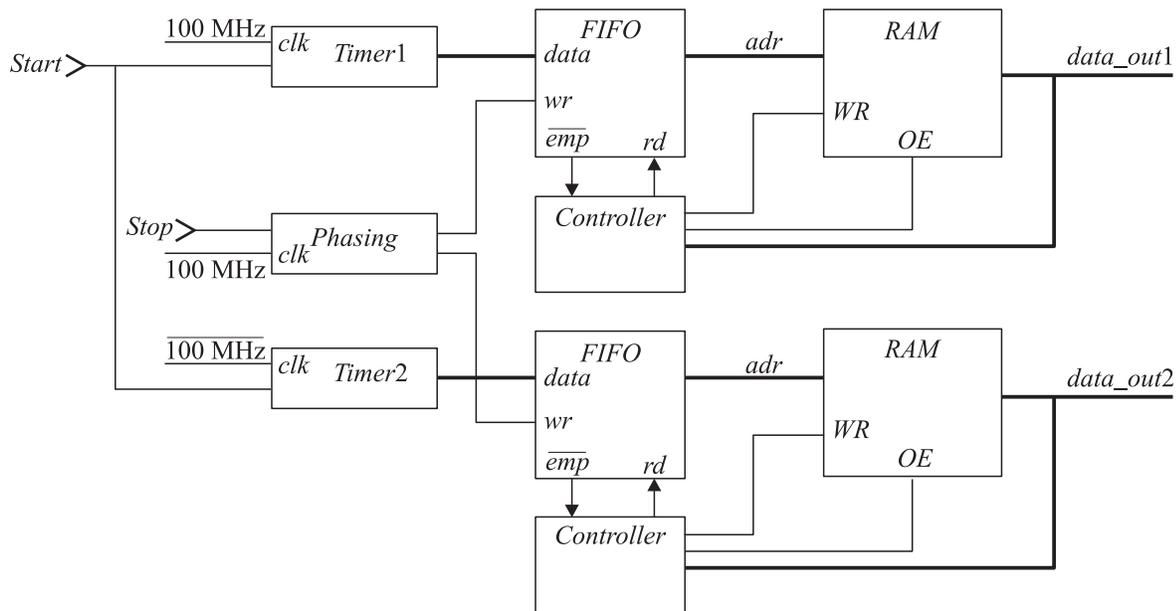


Рис. 1. Структурная схема временного анализатора.

## Принцип действия

Принцип действия многоstopового временного анализатора иллюстрируется рис. 1 и заключается в следующем. По сигналу „Старт“ (Start) два таймера Time1 и Time2 начинают отсчитывать тактовые импульсы. При этом на второй из них подаются тактовые импульсы, сдвинутые на половину периода. Приходящий на схему фазирования Phasing сигнал „Стоп“ (Stop) в зависимости от того, в какой полупериод он попадет, выполняет перезапись текущего кода с одного из таймеров в соответствующую буферную память типа FIFO. После перезаписи кода анализатор готов к регистрации следующего сигнала „Стоп“.

С помощью контроллера Controller в оперативной памяти модуля RAM, по мере заполнения буферной памяти FIFO, осуществляется формирование двух временных распределений. Формирование распределения осуществляется путем добавления единицы к содержанию ячейки оперативной памяти по адресу, определяемому текущим кодом FIFO. Все действия по регистрации сигнала „Стоп“ и формированию распределения выполняются с постоянным минимальным временем.

Таким образом, записанные в RAM массивы данных соответствуют временным распределениям, сдвинутым друг относительно друга на половину периода тактовых импульсов. Если при компьютерной обработке один массив определяет четные каналы, а другой — нечетные, то можно получить общий массив данных, соответствующий распределению stopовых сигналов с разрешением, равным половине периода.

Подход к построению временного анализатора с использованием двух каналов регистрации, работающих на

сдвинутой по фазе частоте, позволяет получить в два раза большую (по сравнению с одноканальной схемой) точность регистрации stopовых сигналов при использовании максимальных возможностей по быстродействию каждого канала.

## Описание структурной схемы и работы временного анализатора

Структурная схема модуля, на котором выполнен многоканальный временной анализатор, представлена на рис. 2. Модуль выполнен в стандарте КАМАК, имеет на лицевой панели 8 входных и 8 выходных разъемов для NIM-сигналов. Для индикации состояния модуля в процессе работы на лицевой панели имеются 4 светодиода. Модуль одинарной ширины содержит две последовательно соединенные платы: интерфейсную (Interface board) и плату преобразователей (Converter board).

Модуль создан на микросхемах гибкой логики FPGA, что позволяет реализовать путем их перепрограммирования различные проекты без изменения его аппаратной части. В качестве FPGA в модуле используются микросхемы EP1K10TC144 и EP1K50QC208 фирмы Altera ([www.altera.com](http://www.altera.com)). Для хранения конфигурационных данных FPGA используются микросхемы AT17LV512A и AT17LV010A — ППЗУ фирмы Atmel. Кроме того, на плате преобразователя находятся две памяти RAM, данные в которые могут записываться и считываться через FPGA. Для задания тактовой частоты 100 MHz в проекте используется микросхема генератора.

Интерфейсная плата предназначена для дешифрации команд КАМАК, передачи и приема данных, а также обработки L-запроса.

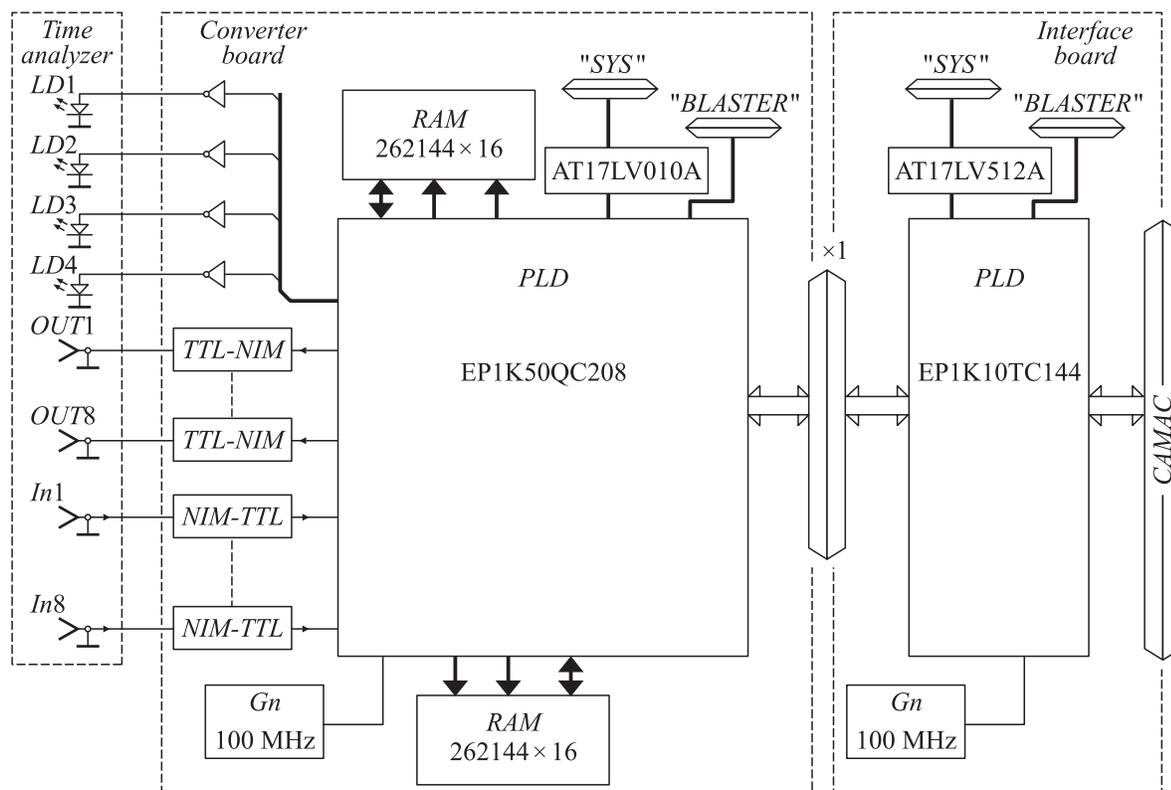


Рис. 2. Структурная схема модуля.

Проект, разработанный для FPGA платы преобразователя, представлен на структурной схеме (рис. 3). Схема содержит два преобразователя время-код: TDC1 и TDC2, на которые подаются тактовые импульсы, сдвинутые друг относительно друга на половину периода.

Запуск на измерение осуществляется от внешнего импульса „Старт“. При необходимости он может быть задержан с помощью узла задержки Delay. В любом случае времени включается таймер, который задает время измерения (экспозиции). В течение этого времени производится регистрация времени прихода стоповых сигналов и происходит формирование временных распределений во внешней памяти RAM нижеследующим образом.

На схеме фазирования Phasing осуществляется синхронизация старта с тактовыми импульсами. После этого схема фазирования разрешает работу таймерам Timer1 и Timer2 (выход esnt) и открывает вход стоповым сигналам. Приходящий на один из входов Stop1–Stop4 сигнал также фазировается с тактовыми импульсами. В зависимости от того, в какой полупериод тактовых импульсов он попадает, на одном из выходов (wra или wrb) вырабатывается сигнал перезаписи кода времени, т.е. осуществляется фиксация времени прихода стопового сигнала на TDC1 или TDC2. Такой подход позволяет измерять время прихода стоповых сигналов с разрешением до полупериода тактовой частоты, т.е.  $\pm 5$  ns.

По сигналам wra или wrb осуществляется перезапись кодов таймера в соответствующую быструю буферную память FIFO, построенную по принципу „первый вошел—первый вышел“. Считывание памяти происходит с частотой, в восемь раз меньшей тактовой — 12.5 MHz. С такой же частотой происходит перезапись содержимого FIFO буферной регистра REG.

Формирование временного распределения во внешней по отношению к FPGA памяти RAM занимается контроллер. Число в буферном регистре REG определяет адрес ячейки памяти, содержимое которой должно увеличиться на единицу. Как только Controller получит сигнал о наличии в FIFO хотя бы одного слова данных (сигнал epm), он осуществит перезапись содержимого (на данный момент) ячейки памяти RAM, выбранном регистром REG, в счетчик числа Counter, увеличит содержимое этого счетчика на единицу и перезапишет число со счетчика в выбранную ячейку памяти.

Считывание полученных данных после каждого цикла измерения в компьютер нецелесообразно, так как в памяти еще не может накопиться временное распределение с необходимой статистикой. Поэтому в модуле предусмотрен режим выработки  $L$ -запроса на считывание после нескольких циклов измерения. Подсчетом циклов измерения занимается  $L$  counter. Величина задержки Td1, время измерения Timer и количество циклов измерения Nlam устанавливаются программно.

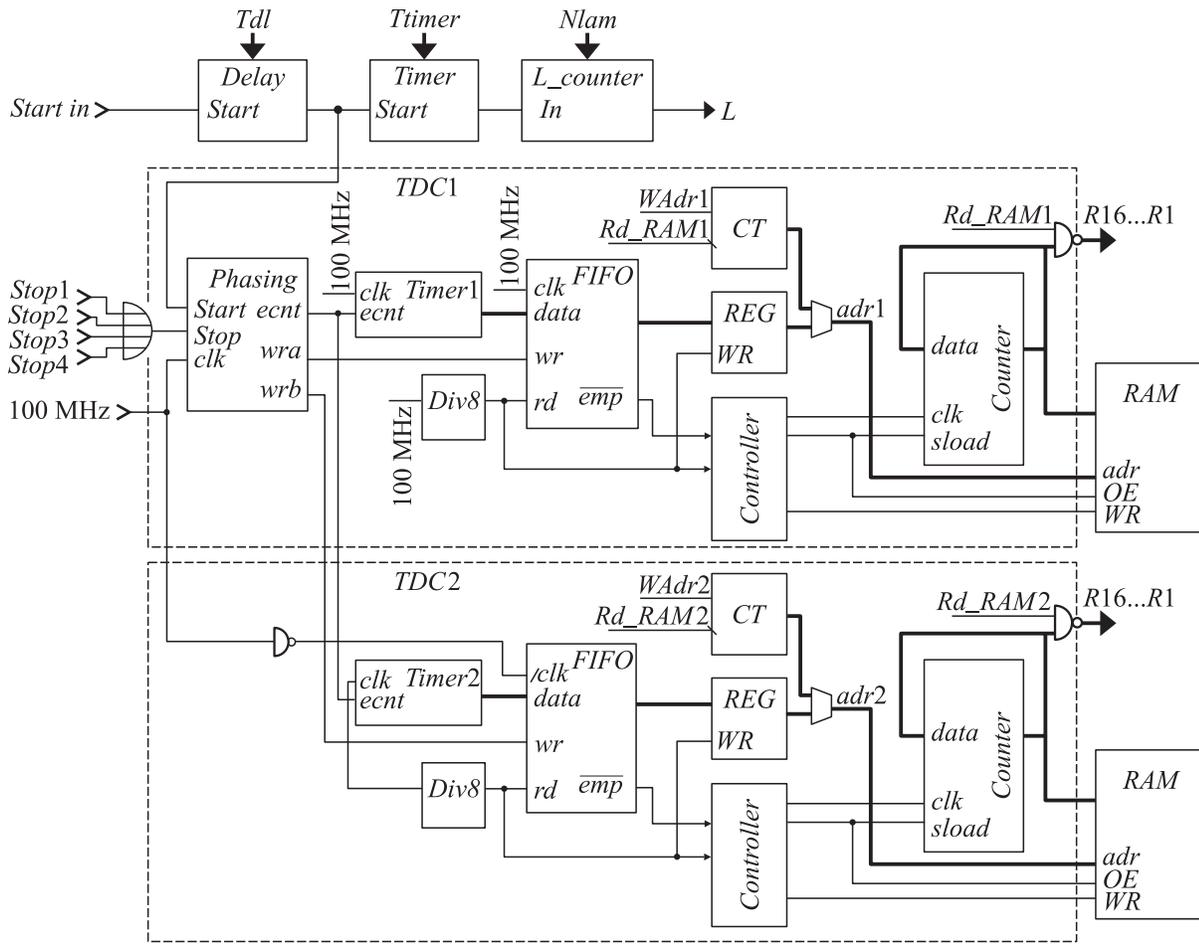


Рис. 3. Структурная схема проекта.

Чтение данных из памяти модуля может осуществляться после получения сигнала  $L$  или, например, по истечении времени экспозиции, заданного в программе компьютера. Чтение осуществляется по соответствующим командам КАМАК на шины  $R1-R16$ . Адрес ячейки памяти, из которой осуществляется чтение, устанавливается с помощью счетчика адреса СТ. Он может быть предустановлен внешней командой. После каждой команды чтения адрес инкрементируется.

### Оценка погрешности измеряемых временных распределений

Ряд факторов, таких как конечное мертвое время на регистрацию стопового сигнала, дифференциальная нелинейность типа „чет/нечет“ и конечная емкость FIFO, приводит к искажению получаемого временного распределения. Спектр, искаженный первыми двумя факторами, может быть восстановлен.

Для вероятности регистрации сигнала в канале  $i$  за один цикл измерений можно записать следующее

соотношение:

$$P_i^R = P_i^S \rho_i(i), \quad (1)$$

где  $P_i^R$  — вероятность регистрации сигнала в канале  $i$  за один цикл измерений,  $P_i^S$  — вероятность попадания сигнала в канал  $i$  за один цикл измерений,  $\rho_i(k)$  — функция, определяющая вероятность регистрации сигнала в канале  $i$  в зависимости от предыстории попадания сигналов в предыдущие  $k$  каналов. Рассмотрим эту функцию подробнее.

Для одностопового анализатора эту функцию можно определить следующим образом:

$$\rho_i(k) = \begin{cases} 1 & k = 0, \\ \prod_{j=0}^{i-1} (1 - P_j^S) & k > 0, \end{cases}$$

т. е. сигнал в канале  $i$  может быть зарегистрирован, только если сигнал не поступил ни в один из предыдущих каналов. Это выражение справедливо в предположении о малой вероятности появления двух и более импульсов в одном временном канале.

Рассмотрим в тех же предположениях случай многоstopового анализатора с постоянным мертвым време-

нем, что соответствует описываемому TDC. Для него ситуация аналогична для первых  $T$  каналов (где  $T$  — мертвое время, выраженное в числе каналов). Для последующих каналов существенно влияние наличия сигнала в канале  $m < i - T$  на возможность регистрации сигнала в канале. Это влияние описывается функцией  $\rho_i(i - m)$ . Если в канал  $m$  поступил сигнал, то наличие сигналов в последующих  $T$  каналах не влияет на значение функции  $\rho_i(i - m)$ , так как они не регистрируются и не продлевают мертвое время. Однако на возможность регистрации влияет наличие сигнала в канале  $m + T + 1$ . Совместная вероятность такого события равна  $P_m^S \rho_i(i - m - T - 1)$ . Если в канал  $k$  сигнал не поступил, то на возможность регистрации влияет наличие сигнала в следующем канале. Совместная вероятность такого события равна  $(1 - P_m^S) \rho_i(i - m - 1)$ . Сложив две вероятности, можно получить значение функции  $\rho_i(i - m) = P_m^S \rho_i(i - m - T - 1) + (1 - P_m^S) \rho_i(i - m - 1)$ .

На основании этих рассуждений и учитывая, что регистрация в канале  $i$  не зависит от состояния каналов с номерами  $k > i$ , можно записать итоговый вид функции  $\rho_i(k)$ :

$$\rho_i(k) = \begin{cases} 1 & k = 0, \\ \prod_{j=\max(0, i-k)}^{i-1} (1 - P_j^S) & k \leq k \leq T, \\ P_{i-k}^S \rho_i(k - T - 1) + (1 - P_{i-k}^S) \rho_i(k - 1) & k > T. \end{cases} \quad (2)$$

Можно так же выразить функцию  $\rho(k)$  не через предысторию попадания сигналов, а через предысторию регистрации сигналов. Тогда можно показать, что

$$\rho_i(k) = \begin{cases} 1 & i = 0, \\ 1 - \sum_{j=\max(0, i-T)}^{i-1} P_j^R & i > 0. \end{cases}$$

Это соответствует записанному в дискретном виде соотношению из [1]. Заметим, что значения функции  $\rho_i(k)$  не зависят от того, считать ее по предыстории попадания сигналов или через предысторию регистрации сигналов.

Вероятность попадания сигнала в канал и вероятность регистрации можно связать с числом событий следующими соотношениями:

$$P_i^S = \frac{n_i^S}{M}, \quad P_i^R = \frac{n_i}{M}, \quad (3)$$

где  $M$  — количество циклов измерений,  $n_i$  — число зарегистрированных отсчетов в  $i$ -м канале,  $n_i^S$  — число сигналов, попавших в канал  $i$ . Погрешность выражений (3) можно оценить как  $\varepsilon \sim 1/\sqrt{n_i}$ . Учитывая выражения (3), можно восстановить неискаженные данные по формуле

$$n_i^S = \frac{n_i}{\rho_i(i)}. \quad (4)$$

Было проведено численное моделирование работы TDC с мертвым временем  $T = 6$  каналов для

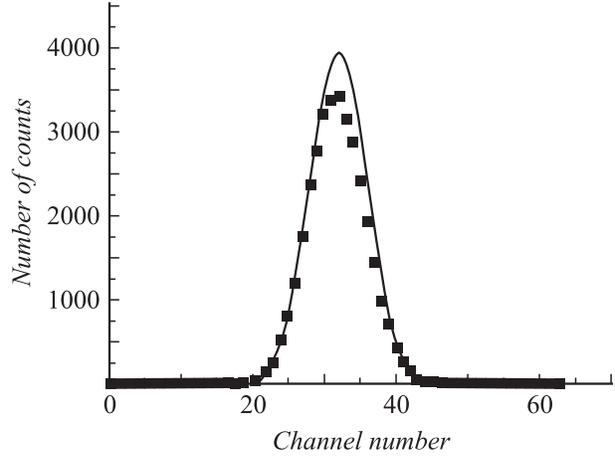


Рис. 4. Сравнение исходного (квадраты) и восстановленного (сплошная линия) тестового спектра.

$M = 10^5$  проходов для заданного тестового сигнала. Сравнение исходного и восстановленного по формуле (4) спектра показано на рис. 4. Погрешность восстановления спектра составила 0.8%.

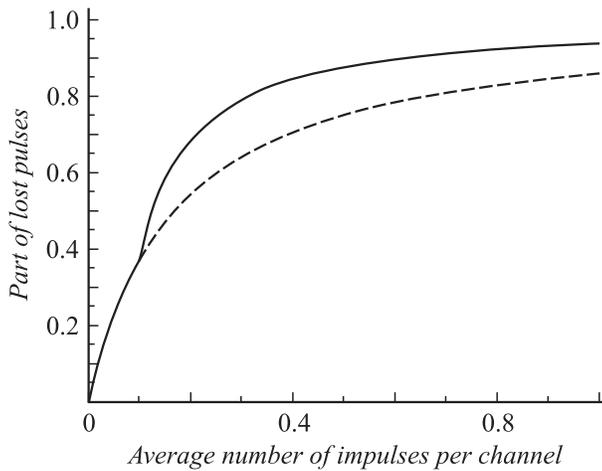
Как было отмечено выше, для получения большей точности временного разрешения на основе двух сдвинутых на полпериода спектров с TDC1 и TDC2 может быть построен общий спектр. Однако этот спектр с большой вероятностью будет иметь дифференциальную нелинейность, превышающую допустимую для данного эксперимента. Характер дифференциальной нелинейности выражен в том, что набор в четных каналах может существенно отличаться от нечетных, а величина нелинейности может значительно превосходить допустимую статистическую ошибку измерения. Это обусловлено тем, что четные каналы по ширине могут отличаться от нечетных из-за аппаратной погрешности, вызванной неточностью сдвига тактовых импульсов. Для коррекции дифференциальной нелинейности подобного типа необходимо произвести калибровку анализатора, подав на вход случайный поток импульсов слабой интенсивности, т.е. такой, чтобы наложения и потери из-за мертвого времени были значительно меньше статистической ошибки измерения, и набрать в сумме по всем каналам  $N$  импульсов исходя из желаемой погрешности  $\varepsilon$ :

$$N \geq \frac{1}{\varepsilon^2}. \quad (5)$$

На основании полученного временного распределения можно вычислить отношение ширины канала одного спектра к другому  $\xi$  как

$$\xi = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{\sum n_{2i}}{\sum n_{2i+1}}, \quad (6)$$

где  $\Delta T_1, \Delta T_2$  — средняя ширина канала в 1-ом и 2-ом спектре соответственно.  $n_i$  — число отсчетов в  $i$ -канале.



**Рис. 5.** Зависимость числа просчетов от входной интенсивности stopовых сигналов при разравнивающей памяти FIFO с неограниченной емкостью (пунктир) и емкостью 32 слова (сплошная линия).

Коррекция проводится следующим образом:

$$n_{2i}^C = n_{2i} \frac{1 + \xi}{2\xi},$$

$$n_{2i+1}^C = n_{2i+1} \frac{1 + \xi^*}{2},$$

где  $n_i^C$  — скорректированное число отсчетов в канале  $i$ . При высоких нагрузках на результаты измерений начинает оказывать влияние емкость разравнивающей памяти FIFO. Необходимо, чтобы при ожидаемых в эксперименте нагрузках не происходило ее переполнения. В противном случае это будет вызывать переменное мертвое время, так что коррекция результатов с помощью (4) станет невозможной. Для расчета числа потерь было проведено численное моделирование работы TDC, на вход которого подавался случайный поток импульсов заданной интенсивности. При расчетах учитывалось мертвое время (30 ns).

Результаты моделирования представлены на рис. 5. Потери для случая FIFO бесконечной емкости вызваны только мертвым временем. Очевидно, что для нагрузок меньше, чем 0.07 событий на канал, потери для FIFO глубиной 32 слова и FIFO бесконечной глубины совпадают. При больших нагрузках начинает сказываться переполнение FIFO, что приводит к существенным потерям. При этом восстановление сигнала по формуле (4) становится невозможным.

### Заключение

Описанный временной анализатор создан в лаборатории масс-спектрометрии ФТИ им. А.Ф. Иоффе и имеет следующие технические характеристики.

1. Максимальное число временных каналов ..... 131 071 ( $2^{17}$ )

2. Временное разрешение .....  $\pm 5$  ns
3. Максимальное время измерения ..... 655  $\mu$ s
4. Количество stopов на старт ..... до 6000
5. Максимальное количество событий в одном временном канале, не более ..... 65 535
6. Мертвое время на регистрацию одного stop-сигнала ..... 30 ns
7. Максимальная частота поступления stopовых сигналов, не более ..... 10 MHz
8. Задержка запуска по стартовому сигналу ... до 650  $\mu$ s
9. Напряжения питания ..... +6 V, -6 V
10. Конструктивно модуль выполнен в стандарте КАМАК одинарной ширины 17.2 mm.

Многоstopовый временной анализатор используется при построении информационно-измерительных систем на базе модулей КАМАК для решения ряда физических задач в Радиовом институте им. Хлопина и в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. С его помощью проводятся измерения масс биомолекул времяпролетным методом [4], исследование спектров люминесценции наноструктур GaAs/AlGaAs со связанными квантовыми ямами [5], исследование время-разрешенных спектров и кинетики люминесценции наноструктур InGaN/GaN с квантовыми ямами [6], исследования оптических свойств трехмерных фотонных кристаллов [7], исследовании свойств самоорганизованных квантовых точек методами поляризации спектроскопии [8].

### Список литературы

- [1] *Потапов А.В., Чернявский А.Ф.* Статистические методы измерений в экспериментальной ядерной физике. М.: Атомиздат, 1980. С. 1–54.
- [2] *Laptev A.B., Shcherbakov O.A., Vorobyev A.S., Donets A.Yu., Fomichev A.V., Soloviev S.M., Fomichev A.A., Haight R.C., Tuboltsev Yu.V.* // Nuclear Physics A. 2004. Vol. 734S. P. E45–E48.
- [3] *Баранов И.А., Бульченко В.П., Вин К., Козлов Б.Н., Мамырин Б.А., Новиков А.К., Обнорский В.В., Пилюгин И.И., Цепелевич С.О.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 4. С. 107–112.
- [4] *Baranov I., Korobkin A., Novikov A., Obnorsky V., Hakansson P.* // Proc. of the Second Saint Petersburg Int. Conf. on NanoBiotechnologies (Nanobio'08). St. Petersburg, Russia, 2008. P. 19.
- [5] *Криволапчук В.В., Жмодиков А.Л., Москаленко Е.С.* // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 1. С. 139.
- [6] *Криволапчук В.В., Мездрогина М.М., Кузьмин Р.В., Даниловский Э.Ю.* // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 2. С. 365.
- [7] *Medvedev A.V., Pevtsov A.B., Grudinkin S.A., Feoktistov N.A., Sakharov V.A., Serenko I.T., Golubev V.G.* // Nanotechnology. 2008. Vol 19. P. 315 201.
- [8] *Klochikhin A., Reznitsky A., Permogorov S., Tsitsishvili E., Baltz R., Kalt H., Klingshin C.* // Semicond. Sci. Technol. 2008. Vol. 23. P. 114 010.
- [9] *Spencer D.F., Cole J., Drigert M., Aryarinejad R.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2006. Vol. 556. N 1. P. 291–295.