

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ  
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

УДК 539.1.075:621.375

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ РАЙСА ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ  
ШУМОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ В ЯДЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

© 2012 г. А. П. Кашук

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН

Россия, 188300, Гатчина Ленинградской обл., Орлова Роцца

E-mail: Anatoli.Kachtchouk@cern.ch

Поступила в редакцию 15.09.2011 г.

После доработки 17.10.2011 г.

Частота Райса, рассматриваемая в работе как однозначная характеристика усилителя-фильтра, определяемая граничными частотами, лежит в основе новой методики, предназначенной для реконструкции шумовых распределений. Приведены примеры использования методики для оптимизации режима работы многопроводочных пропорциональных камер и дрейфовых строу-трубок.

ВВЕДЕНИЕ

Математический анализ шумов, выполненный Райсом (S.O. Rice) [1–3], и полученные им формулы нашли применение в различных областях науки и техники, в частности в радиосвязи. В.И. Тихонов, рассматривая в работе [4] несколько специальных задач, объединенных названием “выбросы случайных процессов”, отмечает, что начало этим исследованиям было положено Райсом. В данной статье приведены примеры реконструкции шумовых распределений на входе усилительного тракта и на выходе дискриминатора применительно к задачам оптимизации режима работы многопроводочных пропорциональных камер и дрейфовых строу-трубок. Методика основана на введении характеристики усилительного тракта – частоты Райса, которая определяется как ожидаемое в секунду среднее число пересечений нулевого уровня шумовым сигналом с распределением Гаусса по амплитуде, прошедшим через линейный фильтр-усилитель.

Частота Райса выражается через граничные частоты полосы пропускания усилителя-фильтра и поэтому является однозначной его характеристикой, вместе с тем указывает на положение нулевого порога в измерительном тракте, более того, является параметром одного из указанных выше шумовых распределений. В работе показано, что знание этой частоты позволяет определить эквивалентный шумовой заряд в условиях, когда аналоговый выход с усилителя отсутствует и традиционные методы измерений (например, по уширению “генераторной” линии) невозможны, и выполнить это без подачи тестового сигнала на вход усилителя по результатам сканирования порогом дискриминатора шумовой дорожки на выходе усилительного тракта.

1. ФОРМУЛЫ РАЙСА

Приведем кратко выводы, полученные Райсом при математическом анализе случайного шума [1–3]. Теория Райса базируется на представлении шумового тока  $I_n(t)$  в виде гармонического ряда со случайными амплитудами и фазами гармоник. Предполагается, что случайный процесс стационарный и вероятность того, что значение  $I_n(t)$  лежит между  $I$  и  $I + dI$ , подчиняется распределению Гаусса:

$$\frac{dI}{\sqrt{2\pi R(0)}} \exp \frac{-I^2}{2R(0)}, \quad (1)$$

где  $R(0)$  – дисперсия амплитудного распределения шумового тока  $I_n(t)$ . Предполагается также, что существует отличное от нуля значение автокорреляционной функции шумового тока  $R(\tau) = \int_0^\infty S_n(f) \cos(2\pi f \tau) df$  при  $\tau = 0$ , где  $S_n(f)$  – спектральная плотность шумового тока или мощность, рассеиваемая этим током на сопротивлении 1 Ом в заданном интервале частот. Кроме того, предполагается существование второй производной автокорреляционной функции  $R''(\tau) = -4\pi^2 \int_0^\infty f^2 S_n(f) \cos(2\pi f \tau) df$  и существование при  $\tau = 0$  отличного от нуля и бесконечности значения  $R''(0)$ . Исходя из приведенных предположений, Райс выводит формулу для ожидаемого в среднем числа  $E(N)$  пересечений нулевого уровня шумовым током  $I_n(t)$  в интервале времени  $T$ :

$$E(N) = \frac{T}{\pi} \sqrt{-\frac{R''(0)}{R(0)}} = 2T \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 S_n(f) df}{\int_0^{\infty} S_n(f) df}} \quad (2)$$

Математически строгое доказательство соответствующей теоремы и формулы (2) для ряда спектральных функций получено в работах [5, 6]. В этих работах доказано, что для стационарного случайного процесса с распределением Гаусса в единичном интервале времени  $t \in [0, 1]$ , с нулевым средним и единичной дисперсией  $R(0) = 1$  среднее число пересечений нулевого уровня

$$E(N) = \frac{1}{\pi} \sqrt{-R''(0)}, \quad \text{если } R''(0) \text{ существует,} \quad (3)$$

$$= +\infty, \quad \text{если } R''(0) \text{ не существует.}$$

Для среднего числа пересечений случайным сигналом нулевого уровня в одном направлении, например снизу вверх, в предположении постоянства спектральной плотности этого сигнала в полосе пропускания частот от  $f_a$  до  $f_b$  идеального линейного фильтра Райс упрощает выражение (2) и для интервала времени 1 с приводит формулу

$$f_{n0} = \frac{1}{2} E(N) = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} f^2 S_n(f) df}{\int_0^{\infty} S_n(f) df}} = \sqrt{\frac{1}{3} \frac{(f_b^3 - f_a^3)}{f_b - f_a}} \quad (4)$$

Для зарядочувствительного усилителя (з.ч.у.)  $S_n(f) \neq \text{const}$  – см., например, [7]. Однако переходом к эквивалентной шумовой полосе частот  $\Delta f$  эту проблему можно обойти, и формула Райса (4) может быть применена также в случае з.ч.у. Эквивалентная шумовая полоса частот  $\Delta f$  математически определяется как

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi H_{\max}} \int_0^{\infty} |H(j\omega)|^2 d\omega, \quad (5)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $H(j\omega)$  – передаточная функция усилителя-фильтра по напряжению,  $H_{\max}$  – ее наибольшее значение. Возведенная в квадрат нормированная функция передачи по напряжению характеризует передачу мощности, в частности мощности шумового сигнала, и может быть использована для нахождения  $\Delta f$ . При определении  $\Delta f$  накладывается условие, чтобы мощность шумового сигнала в полосе  $\Delta f$  равнялась той же, что и в реальной полосе частот  $B = (f_b - f_a)$ , но постоянной внутри этой полосы и равной нулю за ее пределами. При такой модификации  $S_n(f)$  в формуле (4) сокращается. Связь между сигнальной полосой пропускания фильтра  $B$  и эк-

Связь сигнальной и эквивалентной шумовой полосы частот

$k$ одинаковых однополосных каскадов ( $p = 1$ )	$\Delta f/B$	$p$ полюсов однокаскадного усилителя-фильтра ( $k = 1$ )	$f/B$
1	1.571	1	1.571
2	1.222	2	1.111
3	1.155	3	1.05
4	1.13	4	1.025
5	1.11	5	1.02
6	1.1	6	1.01
Бесконечность	1.06	Бесконечность	1.00

вивалентной шумовой полосой частот  $\Delta f$ , отражающей спектральную характеристику фильтра, однозначная (см. таблицу, заимствованную из [8]).

Для полосового фильтра с постоянной спектральной плотностью в области частот, определяемой границами  $f_a = f_0 - \Delta f/2$ ,  $f_b = f_0 + \Delta f/2$ , и нулевой – вне этой области формулу (4) можно записать в виде (см. работу В.И. Бунимовича [9])

$$f_{n0} = \sqrt{\frac{\int_{f_0-\Delta f/2}^{f_0+\Delta f/2} f^2 df}{\int_{f_0-\Delta f/2}^{f_0+\Delta f/2} df}} = f_0 \sqrt{1 + \frac{1}{12} \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)^2}, \quad (6)$$

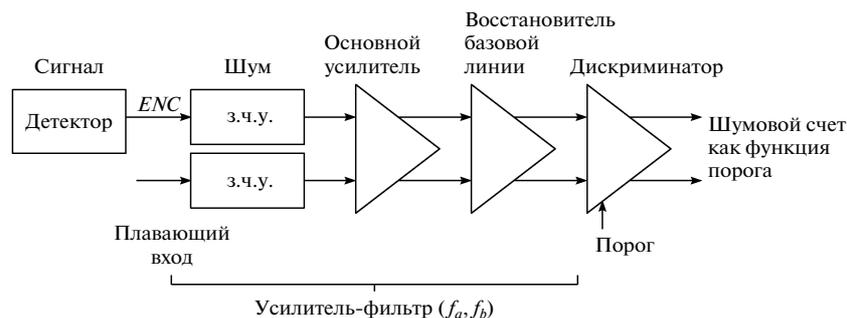
где  $f_0 = (f_a + f_b)/2$  – центральная частота полосового фильтра.

Для идеального фильтра нижних частот ( $f_a = 0$ , для  $p = 1$ ) формула (4) принимает вид

$$f_{n0} = 1.571 f_b / \sqrt{3} \approx \Delta f / \sqrt{3}. \quad (7)$$

Согласно [9] в случае, если спектральная плотность определяется резонансной кривой напряжения на колебательном контуре,  $f_{n0}$  принимает бесконечно большое значение. Как будет показано, при определенных несовершенствах в сборке экспериментальной установки может возникать такое положение, когда  $f_{n0}$  стремится к исключительно большим, явно не физическим, значениям. Однако в большинстве случаев  $f_{n0}$  существует.

Райс в работе [3] обобщил формулу (2) на ненулевой уровень порога  $I_1 \neq 0$ . При этом ожидаемое в среднем число  $f_n$  пересечений случайным сигналом  $I_n(t)$  такого уровня (в литературе по радиосвязи для таких событий используется термин “флуктуационные выбросы”, см. [9]) спадает по экспоненте с увеличением уровня, начиная с мак-



**Рис. 1.** Блок-схема типового усилительного тракта современных трековых детекторов: предусилитель (з.ч.у.)—усилитель—восстановитель базовой линии—дискриминатор; указаны точки на входе и на выходе, где будут реконструироваться шумовые распределения.

симального значения  $f_{n0}$ , и для интервала 1 с равняется

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\frac{R''(0)}{R(0)}} \exp\left(-\frac{I_1^2}{2R(0)}\right). \quad (8)$$

Заметим, что значение дисперсии этого распределения, т.е. значение автокорреляционной функции  $R(0)$  в формуле (8), то же, что и в формуле (1).

Перейдя к заряду интегрированием тока, преобразуем формулу (8) к виду

$$f_n = f_{n0} \exp\left(\frac{-Q_{th}^2}{2ENC^2}\right), \quad (9)$$

где  $Q_{th}$  — уровень порога;  $ENC$  — эквивалентный шумовой заряд, т.е. такой заряд, который создает эквивалентный генератор тока при подключенном детекторе, равный среднеквадратичному значению  $\sigma$  шума.

Приведенная зависимость (9) интенсивности шумового счета от порога, измеренная на выходе дискриминатора, хорошо известна в ядерной электронике, однако такая ее часть, как значение интенсивности шумового счета при нулевом пороге, а именно  $f_{n0}$ , практически не используется. Вместе с тем  $f_{n0}$  — важная характеристика усилительного тракта, определенная в данной работе по имени автора формулы (4) как частота Райса, которая позволяет реконструировать шумовые распределения в измерительном тракте и оптимизировать детектор.

На примере 8-канальной интегральной микросхемы, разработанной для трековых детекторов, содержащей предусилитель, основной усилитель, восстановитель базовой линии и дискриминатор, не имеющей аналогового выхода в каждом канале, покажем, что знание частоты Райса позволяет измерять  $ENC$  без инъекции на вход генераторного сигнала точной амплитуды, причем выполнять это всякий раз, когда потребуется, путем измерения интенсивности шумового счета на выходе дискриминатора как функции порога. Частота Райса позволяет найти также параметры и друго-

го, не менее важного распределения — распределения шумовых срабатываний дискриминатора, центрировать его, поскольку, как правило, это распределение смещенное. Знание частоты Райса исключительно важно для нахождения параметров смещенного распределения, без этого задача реконструкции не решается. Знание параметров шумовых распределений необходимо для определения и установки порогов регистрации сигналов в многоканальной экспериментальной установке, определяющих эффективность регистрации, разрешение и др. характеристики установки. Кроме того, как будет показано ниже, по поведению распределения шумовых срабатываний дискриминатора, представленного в линеаризованной и центрированной форме, можно извлечь дополнительно информацию, необходимую для оптимизации экспериментальной физической установки, судить о правильности работы системы, о наличии или отсутствии в ней паразитных связей, увеличивающих шум и даже приводящих канал к самовозбуждению, контролировать работу системы в ходе длительного физического эксперимента.

## 2. НАХОЖДЕНИЕ ЧАСТОТЫ РАЙСА ПО СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ

Рассмотрим типовой усилительный тракт, применяемый в трековых детекторах, представленный на рис. 1, в частности тракт 8-канальной микросхемы Сагюса [10], разработанной для усиления и регистрации сигналов с проволочных детекторов. Два идентичных з.ч.у. (предусилителя), один из которых “плавающий”, необходимы для сопряжения их по постоянному току с последующими дифференциальными каскадами. Аналоговую часть схемы, состоящую из з.ч.у., основного усилителя и восстановителя базовой линии, будем рассматривать как усилитель-фильтр.

Как уже отмечалось, частота Райса может быть определена по граничным частотам усилителя-фильтра. Пользуясь тем, что один из восьми каналов микросхемы Сагюса имеет аналоговый выход

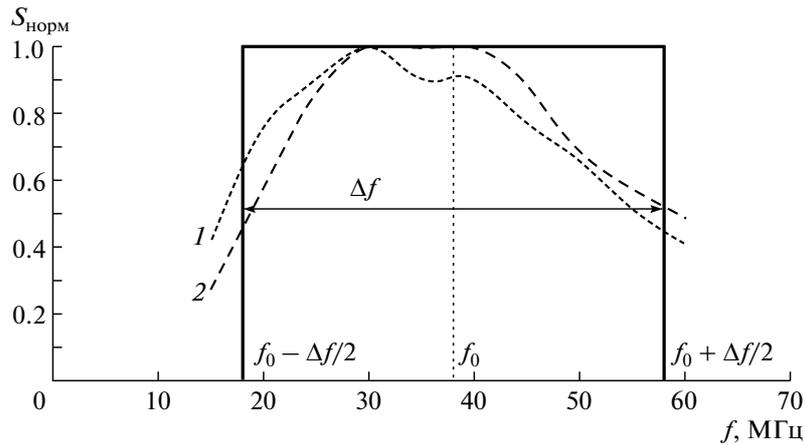


Рис. 2. Нормированные спектральные характеристики интегральных усилителей Сагюса отрицательной (1) и положительной (2) полярности и усредненная эквивалентная шумовая полоса частот (равные площади под кривыми).

после восстановителя базовой линии, была изменена нормированная передаточная характеристика по напряжению и определена сигнальная полоса частот  $B$  на уровне 3 дБ, затем, перейдя к мощности, на уровне 0.5 от максимума определена эквивалентная шумовая полоса частот  $\Delta f$ , см. рис. 2. По полученным характеристикам усилительный тракт используемой здесь интегральной микросхемы Сагюса следует рассматривать как полосовой фильтр с сигнальной полосой частот  $B = 37$  МГц и центральной частотой, близкой к  $f_0 = 38$  МГц. Эквивалентная шумовая полоса частот  $\Delta f$  составляет 38.9 МГц, а частота Райса, определенная по формуле (6), равняется  $f_{n0} = 39.6$  МГц. Найденные значения  $B$  и  $\Delta f$  согла-

суются с данными таблицы при  $p = 3$ . Здесь приводится новое, полученное для микросхемы Сагюса<sup>1</sup>, значение частоты Райса, причем усредненное, так как характеристики этой микросхемы, настроенной для регистрации сигналов положительной и отрицательной полярности, несколько отличаются друг от друга по полосе пропускания, как видно на рис. 2. Измерения и расчеты показывают слабую зависимость значения частоты Райса усилителя Сагюса от величины подключенной ко входу емкости детектора в широком диапазоне емкостей от 0 до 250 пФ.

### 3. МЕТОДИКА РЕКОНСТРУКЦИИ ШУМОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

#### 3.1. Фитирование измеренной зависимости шумового счета от порога

Распределение интенсивности шумовых срабатываний дискриминатора как функции порога, в частности дифференциального дискриминатора микросхемы Сагюса, — смещенное и характеризуется тремя параметрами: высотой, смещением и шириной. Измерения показывают, что с уменьшением порога дискриминатора шумовой счет увеличивается, как и положено. Однако начиная с какого-то значения порога счет начинает уменьшаться — особенность дифференциального дискриминатора, происходит инверсия работы дискриминатора и, как видно из рис. 3, это происходит не при нулевом пороге. Пороги дискриминатора в выбранном канале при сканировании задавались преобразователем цифра—напряжение при установке максимально высоких их зна-

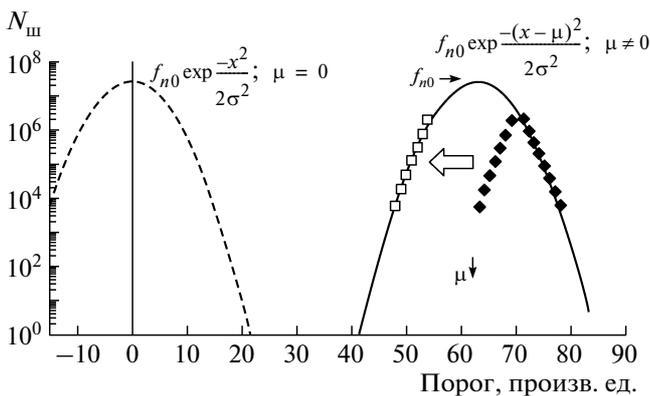


Рис. 3. Реконструкция шумового распределения прямым фитированием измеренной частичной зависимости интенсивности шумового счета  $N_{ш}$  [импульсов/с — здесь и далее] от порога: реальное распределение показано сплошной линией, центрированное — штриховой, точки — данные измерений; значения порога указаны в произвольных единицах (напряжение, заряд и др., соответственно в этих единицах находятся значения параметров распределения  $\mu$  и  $\sigma$ ).

<sup>1</sup> В работе [10] приводится оценка частоты Райса интегрального усилителя Сагюса, найденная по положению довольно пологой вершины распределений шумовых срабатываний дискриминатора, что дало заниженный результат и с большим разбросом — от 19 до 34 МГц.

чений в остальных каналах для исключения взаимовлияния канал–канал (8-канальная микросхема Сагюса позволяет это сделать, так как имеет независимые входы для задания порогов в каналах). Искомые параметры шумового распределения (смещение  $\mu$  и ширина  $\sigma$ ) находились фитированием данных функцией (9) при добавлении к измеренным еще одной точки – частоты Райса, характеризующей интенсивность шумового счета при нулевом пороге. Без добавления этой точки задача реконструкции шумового распределения не решается. Спадающая ветвь, показанная на рис. 3, также характеризует шум в канале и может быть использована для увеличения числа измеренных точек и улучшения качества фитирования.

### 3.2. Линеаризация и центрирование

Метод фитирования легко реализуется, но не всегда удобен. Рассмотрим другой метод, который позволяет реконструировать шумовое распределение, а также извлечь дополнительную информацию. Логарифмированием выражения (9) с заменой переменных  $x = Q_{th}^2$  и  $y = \lg f_n$  перейдем к выражению (10), и тогда  $ENC$  можно найти по тангенсу угла наклона прямой линии, что справедливо только для центрированного распределения:

$$y = \lg f_{n0} - \frac{\lg e}{2ENC^2} x \Rightarrow \Rightarrow ENC = \frac{0.466}{\sqrt{|\text{tg}(\text{угла наклона})|}} \quad (10)$$

Распределение центрировано, если  $y(0)$  соответствует частоте Райса, в противном случае имеется смещение и его необходимо убрать. Будем сдвигать “сырые” данные, представленные на рис. 4, прибавляя некоторое число до тех пор, пока смещение не будет скомпенсировано – так находится параметр  $\mu$ . Критерием окончания процесса сдвига будет получение ожидаемого с заданной точностью значения  $y(0) = \lg f_{n0}$  для априори известной частоты Райса  $f_{n0}$ . В данном примере  $y(0) = 7.6$  с достаточной для практики точностью соответствует частоте Райса усилителя Сагюса. Из рис. 4 видно, что если  $\mu$  скомпенсировано, то получена наилучшая линейность графика и соответствие формуле (10), и далее можно вычислить  $ENC$ .

Для перехода к единицам заряда, что важно для определения  $ENC$  в электронах, необходимо выполнить градуировку шкалы порога путем инъекции известного заряда на вход предусилителя. Градуировку порога дискриминатора для данного детектора, т.е. с известной емкостью детектора  $C_{дет}$ , достаточно сделать один раз, в то время как определение шумовых параметров распределения –

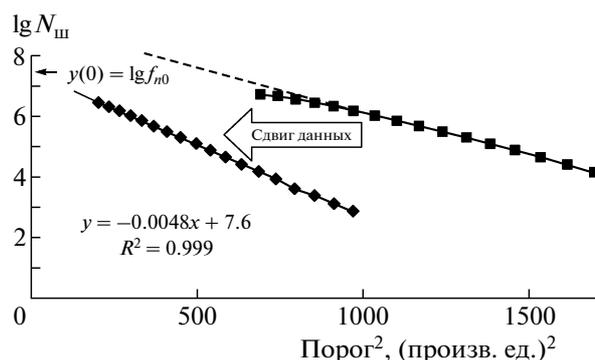


Рис. 4. Иллюстрация к методу линеаризации и центрирования: сдвигом данных измеряется смещение (параметр  $\mu$ ), а по наклону центрированной линии – дисперсия шумового распределения (параметр  $\sigma$ ).

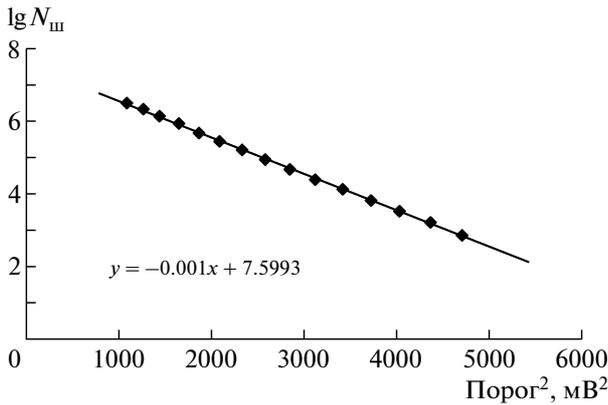
далеко не однократный акт (на практике шумы могут измениться по многим причинам).

## 4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

### 4.1. Оптимизация режима работы пропорциональных камер

Покажем, как в работе [11] оптимизировался рабочий режим мюонного детектора ЛНСб-установки. Подчеркнем, что оптимизация осуществлялась на этапе инсталляции и запуска в работу большой системы. Необходимо было проверить достижение проектных характеристик перед запуском установки на набор статистики. Мюонный детектор выполнен на двух- и четырехслойных многопроволочных пропорциональных камерах с различной гранулярностью электродов с емкостями детектора, изменяющимися в широких пределах от 50 до 250 пФ. Усилители интегральной микросхемы Сагюса, разработанные для этих камер, с пиковым временем  $T_n = 10$  нс (при  $C_{дет} = 0$ ) обеспечивали регистрацию сигналов как с анодных проволочных пэдов (pads) – “двухкоординатных площадок” (Сагюса отрицательной полярности), так и с печатных катодных пэдов (Сагюса положительной полярности).

Известно, что характеристики камер зависят от выбора газового усиления и порога регистрации сигналов, т.е. зависят от отношения сигнал/шум (усиление/порог). Газовое усиление влияет на эффективность регистрации сигнала, но также и на время жизни детектора, так как приходится считаться с таким нежелательным явлением, как радиационное старение детектора при длительном облучении. Как планируется, ЛНСб-эксперимент будет работать не менее 10 лет. Поэтому газовое усиление должно быть насколько возможно минимальным и вместе с тем обеспечивать необходимую эффективность регистрации частиц.



**Рис. 5.** Центрированное шумовое распределение для одного канала пропорциональной камеры с емкостью детектора  $C_{дет} = 245$  пФ.

На примере одного канала одной камеры поясним методику реконструкции шумовых распределений и использования извлеченных оттуда важных для оптимизации детектора характеристик. Аналогичные измерения выполнялись для 122 тысяч каналов, что позволило оптимизировать режимы 1368 камер мюонного детектора. В результате сканирования порогом шумовой дорожки, причем выполненного в реальных условиях экспериментальной установки, собранной в шахте, получено центрированное распределение шумовых срабатываний дискриминатора для канала пропорциональной камеры с емкостью  $C_{дет} = 245$  пФ, представленное на рис. 5. В этом примере процесс центрирования “сырых” данных (точки) был остановлен при пересечении фитирующей прямой оси  $y$  в точке  $y(0) = \lg f_{n0} = 7.5993$ , соответствующей частоте Райса. При сдвиге данных был найден параметр смещения распределения  $\mu = 177.8$  мВ, а по наклону прямой по формуле (10) определен соответствующий тангенсу угла наклона второй параметр шумового распределения  $\sigma = 14.7$  мВ. Зная чувствительность канала 7.3 мВ/фКл для указанной емкости детектора, найденную ранее выполненной градуировкой шкалы порогов, вычислим эквивалентный шумовой заряд в единицах заряда  $ENC = 2.01$  фКл (или 12616 электронов). Пользуясь другой априори известной характеристикой микросхемы Сагюса, полученной в лабораторных условиях,  $ENC = 2240$  электронов + 42 электрона/пФ, и вычитая из найденного значения  $ENC$  параллельный шум 2240 электронов, можно определить отношение приращений  $\Delta ENC/\Delta C$ , характеризующее компоненту последовательного шума. Найденное приращение  $\Delta ENC$  делением на  $C_{дет} = 245$  пФ дает отношение  $\Delta ENC/\Delta C = 42.3$  электрона/пФ, хорошо согласующееся с лабораторными измерениями и поз-

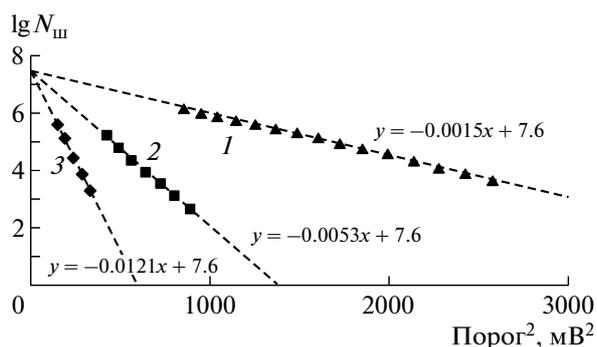
воляющее сделать важный вывод, что шум в канале тепловой, а не иной.

Следующий шаг – определение и установка в данном канале рабочего порога как суммы  $\mu + n\sigma$ . Заметим, что параметр смещения шумового распределения  $\mu$  нужен только для этого и в дальнейших вычислениях не учитывается. Найденное по формуле (9) значение порога в единицах заряда составило  $Q_{th} = 12.1$  фКл (или 75699 электронов) при  $n = Q_{th}/ENC = 6$ . Значение  $n$  выбиралось равным 5–6, чтобы с учетом возможного разброса  $C_{дет}$  от канала к каналу интенсивность шумового счета в канале не превышала 100 импульсов/с. При  $n = 4$  интенсивность шумового счета составила бы  $1.3 \cdot 10^4$  импульсов/с для частоты Райса 39.6 МГц, что недопустимо много, так как привело бы к потере эффективности регистрации сигнала из-за занятости канала шумом, хотя порог ниже.

Зная рабочее значение порога в электронах, можно оценить необходимое газовое усиление камеры, отнеся порог к первичным электронам ионизации, по формуле  $G = Q_{th} [\text{электронов}]/\delta Q_{th} [\text{первичных электронов}]$ , где  $\delta$  – фракция входного тока, интегрируемого з.ч.у. за пиковое время усилителя-формирователя  $T_{п} = 10$  нс. Полагая  $\delta = 10\%$ , для порога 5 первичных электронов получим  $G = 75700$  для двухслойной камеры (в двухслойной камере два соответствующих пэда из двух зазоров камеры объединены на входе общего з.ч.у.).

Аналогичные вычисления проводились для всех каналов камеры, и усредненное значение бралось как окончательное для данной камеры. Для найденного в среднем газового усиления по априори известной зависимости газового усиления от напряжения устанавливалось рабочее напряжение на камере.

Переход к первичным электронам позволяет оценить эффективность регистрации сигнала. Если в рабочем зазоре камеры образовалось 100 первичных электронов, то для значения порога 5 первичных электронов эффективность регистрации частицы должна составить не менее 95% (нижняя оценка). Такой упрощенный расчет эффективности, предполагающий равномерное распределение электронов первичной ионизации в зазоре, дает заниженную эффективность камеры. Реально эффективность регистрации будет выше. Можно показать [11], что определенная таким образом рабочая точка на плато эффективности находится на достаточном расстоянии от “колена” эффективности, чтобы гарантировать постоянство эффективности при изменениях атмосферного давления и температуры. Очевидно, теоретический минимум газового усиления достигается на “колене” эффективности, но в этом случае необходимо обязательно ввести стабилизацию газового усиления автоматическим регулированием.



**Рис. 6.** Измерение дисперсии шумового распределения по наклону прямых линий при различных схемах согласования импедансов строу-трубки и усилителя: 1 – прямое подключение трубки к микросхеме, 2 – горячее согласование, 3 – холодное согласование.

ем напряжения на камере для компенсации возможного изменения газового усиления при изменениях атмосферного давления или окружающей температуры, чем собственно и может быть достигнуто постоянство отношения сигнал/шум.

Итак, знание частоты Райса позволило в реальных условиях при инсталляции камер в шахте, при ограниченном доступе к элементам большой установки найти все параметры шумовых распределений в каждом физическом канале, после чего найти и установить минимальные значения порогов, соответствующие допустимой вероятности занятости канала, установить рабочее напряжение на каждой камере, соответствующее минимальному газовому усилению, оценив при этом эффективность. Последующие измерения на пучке подтвердили правильность подхода и дали при минимальном газовом усилении и рабочем напряжении близкую к 100% эффективность регистрации частиц четырехслойными камерами, состоящими из независимых двухслойных камер.

#### 4.2. Выбор схемы согласования импедансов строу-трубки и усилителя

Этот пример заимствован из работы [12]. Дрейфовая строу-трубка как координатный детектор при диаметре трубки (катода) 10 мм и диаметре сигнальной проволоки (анода) 30 мкм имеет сложный частотно-зависимый импеданс из-за большого омического сопротивления анодной проволоки ~120 Ом/м. Характеристическое сопротивление строу-трубки как линии с потерями принимает значение  $\sqrt{L/C} = 350$  Ом, где  $L$  и  $C$  – погонные индуктивность и емкость строу-трубки, на частотах выше 100 МГц.

В данном примере ставилась следующая задача: необходимо выбрать схему согласования импедансов строу-трубки и усилителя, которая обеспечивает наименьший эквивалентный шумовой заряд

$ENC$  при длине строу-трубки 2.5 м. В этой работе использовался интегральный усилитель Сагиоса отрицательной полярности с входным сопротивлением 50 Ом. Измерения проводились при подключенных на дальнем конце строу-трубок резисторах 350 Ом, равных расчетному характеристическому сопротивлению линии, для трех схем, собранных на ближнем конце линии – со стороны усилителя:

1) прямое подключение трубки к усилителю Сагиоса;

2) горячее согласование: дополнительный резистор 300 Ом, включенный последовательно с входом усилителя Сагиоса;

3) холодное согласование: транзисторная схема с общей базой с входным сопротивлением 350 Ом, включенная на входе усилителя Сагиоса.

Для известной частоты Райса<sup>2</sup> были построены центрированные шумовые распределения, полученные из результатов измерений интенсивности шумового счета за время 1 с при различных порогах дискриминатора. Экспериментальные точки, приведенные на рис. 6, получены в одинаковых условиях измерения и одновременно для трех исследуемых схем, поэтому являются надежными. Как видно из этого рисунка, прямое подключение трубки к усилителю дало наихудший результат, а наименьший шум вносится схемой с холодным согласованием импедансов: чем больше угол наклона линии, тем меньше  $ENC$ , численное значение которого определялось по формуле (10). Очевидно, что сделанный вывод справедлив как для ближнего, так и для дальнего конца линии. В ряде случаев прибегают к согласованию строу-трубки только с одной стороны – усилителя, допуская отражение несогласованным дальним концом не только сигнала от регистрируемой частицы, но и электрического шума. Однако и в этом случае не меняется сущность изложенного здесь подхода к нахождению эквивалентного шумового заряда путем сравнения углов наклонов линий для различных схем согласования импедансов.

В результате этой работы по реконструированному распределению шумовых срабатываний, полученному методом линеаризации и центрирования с применением частоты Райса, выбрана схема согласования импедансов с наименьшим эквивалентным шумовым зарядом, удовлетворяющим требованиям физического эксперимента.

<sup>2</sup> Значение частоты Райса было взято из работы [10] – сильно заниженное. Однако это мало сказалось на величине  $\lg f_{n0}$  и привело к небольшой ошибке в определении значения  $ENC$  по углу наклона линий, не превышающей 4%.

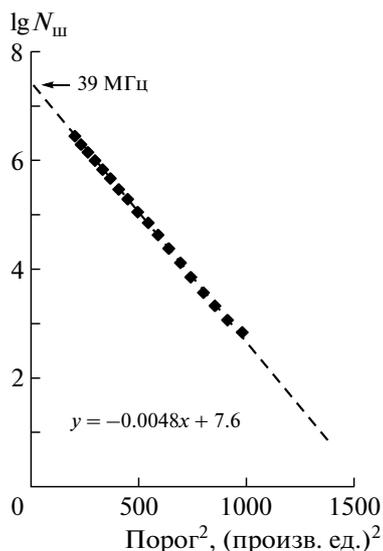


Рис. 7. Правильное шумовое распределение. 39 МГц – частота Райса.

4.3. Устранение несовершенств экспериментальной установки

Центрированное распределение шумовых срабатываний дискриминатора, представленное графически прямой линией, позволяет судить о правильности работы усилительного тракта, соединенного с детектором. Очевидно, что измерением дисперсии шума по углу наклона прямой и сравнением полученного результата с расчетом или номинальным значением легко обнаруживаются такие простые случаи, как плохой контакт между детектором и усилителем, обрыв соединения, “мертвый” канал (шум уменьшается), а также несовершенства экранирования усилителя или детектора, увеличивающие шум.

Ниже показано, что по характеру шумовых распределений обнаруживается предрасположенность канала к самовозбуждению. Правильное шумовое распределение, с одной прямой линией, вершина которой соответствует частоте Райса, показано на рис. 7, а на рис. 8 – распределения с двумя прямыми, где одна вершина соответствует частоте Райса, а другая, явно не физическая, существенно превышающая частоту Райса. На возможность такого решения, даже бесконечности, указывает теорема Райса, если не существует вторая производная автокорреляционной функции шумового сигнала.

Опыт показывает, что распределение с двумя линиями приводит к неустойчивости в системе, когда канал возбуждается, осциллирует при любых значениях порога и становится бесполезным для физических измерений (на практике такой канал маскируется). Случаи с генерацией показаны на рис. 8, где прямые устремлены к нереальному, определенному по наклону линий, частотам.

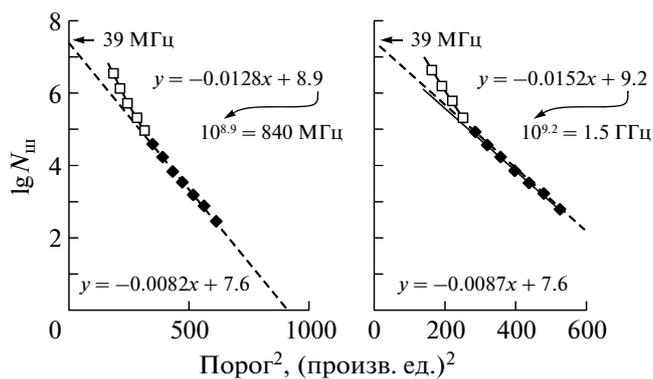


Рис. 8. Примеры аномальных шумовых распределений – каналы являются бесполезными для измерений из-за генерации, возбуждаются при любых значениях порога.

Еще раз отметим, что для исключения взаимовлияния каналов друг на друга при выполнении операции сканирования шумовой дорожки в тестируемом канале значения порогов во всех других каналах устанавливались максимальными. При установке в регистрах рабочих значений порогов возникало взаимовлияние между каналами, и предрасположенные к самовозбуждению каналы срывались в генерацию, остановить которую, как правило, не удавалось. Возможным объяснением аномальности приведенных на рис. 8 шумовых распределений может быть проявление резонансных эффектов в системе и положительной обратной связи с выхода на вход, что более заметно при малых значениях порогов. Для устранения этого негативного явления и подобных несовершенств в сборке экспериментальной установки необходимо правильно заземлять различные части установки, не допуская образования паразитных контуров и взаимных индуктивностей в схеме заземления, в частности, через экраны кабелей.

Как видно, знание частоты Райса позволяет дифференцированно судить о тех или иных несовершенствах физической установки как на этапе подготовки к измерениям, так и в ходе физического эксперимента, длящегося иногда значительное время – годами, помогает устранить появляющиеся несовершенства.

Отметим дополнительно, что приведенная методика позволяет выполнять мониторингирование ENC в течение времени жизни детектора. Целью такого мониторинга является обнаружение на ранней стадии развития таких нежелательных явлений, как ослабление натяжения сигнальных нитей из-за дефектов производства или “усталости” конструкции детектора с натянутыми проводочками, а также радиационного старения детектора из-за отложений радикалов на электродах, вследствие чего появляются микроразряды, уве-

личивающие шум. Параметр  $ENC$  наиболее чувствителен к явлениям такого рода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана эффективность применения новой методики реконструкции шумовых распределений с применением теории Райса на примерах ряда задач из области ядерной электроники, в частности трековых систем. Автор определяет частоту Райса как характеристику усилительного тракта, которая физически обозначает максимальный шумовой счет при нулевом пороге дискриминатора и рассматривается в теории Райса как ожидаемое в среднем число пересечений в секунду нулевого уровня случайным сигналом, распределенным по амплитуде по Гауссу и прошедшим через линейный фильтр-усилитель. Частота Райса не наблюдается и определяется экстраполяцией шумового счета в нулевой порог. Частота Райса является одним из параметров шумового распределения, указывающим положение нулевого порога дискриминатора в реальном усилительном тракте. Показано, что частота Райса определяется граничными частотами усилителя-фильтра и является однозначной характеристикой усилительного тракта, такой же фундаментальной, как и граничные частоты. Желательно, чтобы такая характеристика указывалась разработ-

чиком усилителя-фильтра, предназначенного для любого детектора, необязательно трекового, как в данной работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rice S.O.* // Amer. J. Math. 1939. V. 61. P. 409.
2. *Rice S.O.* // Bell System Tech. J. 1944. V. 23. P. 282.
3. *Rice S.O.* // Bell System Tech. J. 1945. V. 24. P. 46.
4. *Тихонов В.И.* // Успехи физ. наук. 1962. Т. 77. Вып. 3. С. 449.
5. *Ivanov I.A.* // Teor. Veroyatnost. i Primen. 1960. V. 5. P. 319.
6. *Bulinskaya E.V.* // Teor. Veroyatnost. i Primen. 1961. V. 6. P. 435.
7. *Hall G.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A371. P. 580.
8. *Vasilescu G.* Electronic Noise and Interfering Signals: Principles and Applications. Berlin, 2005.
9. *Бунимович В.И.* // Журн. техн. физики. 1951. Т. 21. С. 625.
10. *Kashchuk A., Sarti A., Nobrega R.* Note CERN-LHCб-2008-052. Geneva, 2008.
11. *Kashchuk A., Levitskaya O.* Note CERN-LHCб-2009-018. Geneva, 2010.
12. *Kashchuk A.P., Kuchinskii N.A., Levitskaya O.V., Movchan S.A.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2011. V. 8. P. 40.