

## МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ И СТАБИЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОРОГА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ

© 2012 г. В. И. Волченко, Г. В. Волченко

*Институт ядерных исследований РАН  
Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а  
E-mail: vvolchenko@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2011 г.

Представлен метод автоматической настройки и стабилизации энергетического порога сцинтилляционных детекторов, основанный на поддержании постоянства средней частоты срабатывания детектора от  $\gamma$ -квантов естественного радиационного фона или от потока космических лучей. Стабилизация осуществляется автоматически управлением напряжения питания фотоприемника, что позволяет стабилизировать порог детектора с погрешностью 0.73–2.4% в зависимости от примененной схемы. Описаны электронные схемы стабилизации для сцинтилляционных детекторов с лавинными многопиксельными фотодиодами и фотоумножителями, а также предлагается схема повышенной точности стабилизации порога.

### ВВЕДЕНИЕ

Создание установок с высоким пространственным разрешением для исследований космических лучей в области высоких энергий приводит к необходимости значительного увеличения числа детекторов, что затрудняет проблему их индивидуальной настройки и обеспечения долговременной стабилизации параметров. Настройка и поддержание параметров детекторов на установках с большим числом ячеек может осуществляться цифровыми методами, позволяющими проводить коррекцию энергетического порога детектора по заданному алгоритму. Однако применение многоканальных цифровых систем в ряде случаев ведет к удорожанию установок, образованию дополнительных линий связи между детекторами и аппаратурой регистрации.

Общие сведения о методе автоматической настройки и стабилизации порога детекторов были кратко изложены в работе [1] в контексте описания функциональных электрических схем сцинтилляционных детекторов, использованных в эксперименте ЕММА (Experiment with Multi-Muon Array) [2, 3]. По плану этого эксперимента ведется строительство установки в подземных условиях на глубине ~240 м водного эквивалента в меднорудной шахте г. Пихасалми (Финляндия) с целью изучения химического состава космических лучей в области излома спектра с энергией  $\geq 3 \cdot 10^{15}$  эВ, пространственной структуры подземных групп мюонов и распределения направления их прихода.

В составе установки использовано около ста сцинтилляционных модулей SC-16 площадью  $500 \times 500$  мм<sup>2</sup> (внешний вид модуля показан на рис. 1а), каждый из которых содержит 16 сцин-

тилляционных детекторов размерами  $120 \times 120 \times 30$  мм [4] (рис. 1б). В детекторе использован фотоприемник на основе многопиксельного лавинного фотодиода MRS APD со структурой: “металл–резистор–полупроводник” российского производителя ЦПТА (Центр перспективных технологий и аппаратуры).

Одним из основных требований, предъявляемых к детекторам установки, является эффективность регистрации мюонов. Учитывая то обстоятельство, что эффективность регистрации мюонов данным детектором при пороге 2.6 МэВ превышает 95% [4], был выбран порог регистрации ~2 МэВ, надежно гарантирующий достижение такой эффективности в условиях методологической погрешности и технологического разброса параметров электронных схем. В результате измерений, полученных в подземных условиях в меднорудной шахте на глубине ~240 м водного эквивалента, было установлено, что при пороге детектора 2 МэВ его средний темп счета от  $\gamma$ -квантов естественного радиоактивного фона составляет  $\sim 5$  с<sup>-1</sup> [5].

Примененный в детекторе многопиксельный лавинный фотодиод СПТА-143-30 имеет температурный коэффициент отклика на световое воздействие  $-(1.5-2)\%/^{\circ}\text{C}$  [5] и разброс рабочих напряжений 29–35 В [4]. Учитывая значительную нестабильность фотоприемника и разброс рабочих напряжений, при проектировании установки возникла необходимость разработки простой системы, способной обеспечить индивидуальную автоматическую настройку порога детекторов на заданный уровень после подачи питающих напряжений и его стабилизацию при изменении

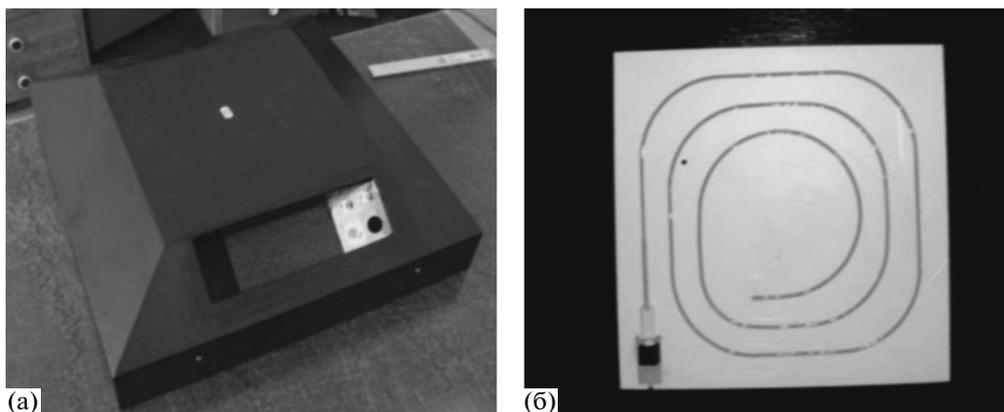


Рис. 1. Внешний вид модуля SC-16 (а) и сцинтилляционного детектора (б).

температуры, а также в процессе старения фотоприемников ~1600 детекторов без использования внешних аппаратных средств.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДА

В основу метода положена идея привязки энергетического порога к среднему потоку  $\gamma$ -квантов естественного радиоактивного фона через эффективную площадь сцинтилляционного детектора при условии, что в ограниченном объеме подземной установки данный поток имеет допустимую стабильность.

На рис. 2 приведена функциональная схема, обеспечивающая автоматическую настройку детектора на заданный порог и его стабилизацию. Импульсные сигналы лавинного фотодиода ЛФД после предварительного усиления широкополосным усилителем  $У$  поступают в интегральный дискриминатор ИД с фиксированным порогом. Дискриминатор формирует на своем выходе счетные импульсы. Эти импульсы являются основным сигналом детектора, а их интенсивность — показателем чувствительности детектора к  $\gamma$ -из-

лучению и космическим мюонам. При помощи стабильного одновибратора  $ОВ$  импульсы стандартизируются по длительности и амплитуде, а затем интегрируются  $RC$ -цепью для получения напряжения, пропорционального средней частоте срабатывания дискриминатора.

Полученное таким образом напряжение сравнивается с опорным напряжением  $U_{оп}$  на дифференциальных входах усилителя-интегратора УИ. Положительное выходное напряжение усилителя-интегратора  $U_{упр}$  подается на катод фотодиода и в совокупности с базовым отрицательным напряжением, приложенным к аноду фотодиода, определяет его усиление. Временязадающие элементы одновибратора выбраны таким образом, что при заданной средней интенсивности сигналов  $\sim 5 \text{ с}^{-1}$  достигается равенство проинтегрированного напряжения с заданным опорным напряжением  $U_{оп}$ , и усредненное выходное напряжение усилителя-интегратора остается без изменения.

В случае отклонения средней интенсивности срабатывания детектора от заданной на входе усилителя-интегратора возникает разбаланс напряжений, что приводит к изменению его выходного напряжения и цепь отрицательной обратной связи компенсирует отклонение. Стабилизируемым параметром детектора является усредненный темп счета, с которым связано усиление фотоприемника, а следовательно, и порог детектора.

На рис. 3 приведена принципиальная схема единичного канала регистрации сигналов сцинтилляционного детектора, обеспечивающая усиление, дискриминацию сигналов, а также автоматическую настройку усиления фотосенсора на заданный порог регистрации. Схема питания лавинного фотодиода  $D_1$  обеспечивается двумя источниками напряжения: базовым отрицательным напряжением  $-U_6$  со стороны анода и управляющим положительным напряжением  $U_{упр}$  со стороны катода через помехоподавляющие фильтры  $R_1, C_1$  и  $R_2, C_2$ .

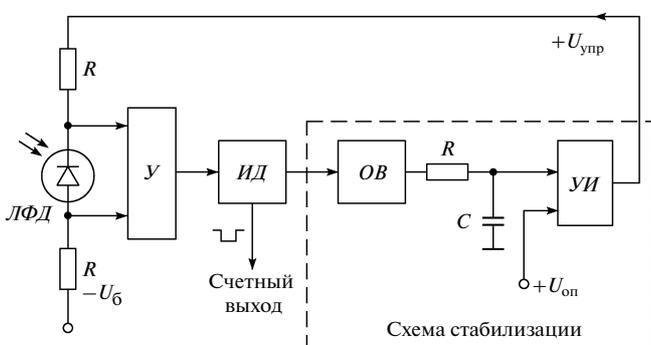


Рис. 2. Функциональная схема стабилизации энергетического порога детектора.  $U_{упр}$  — управляющее напряжение,  $U_6$  — базовое напряжение.

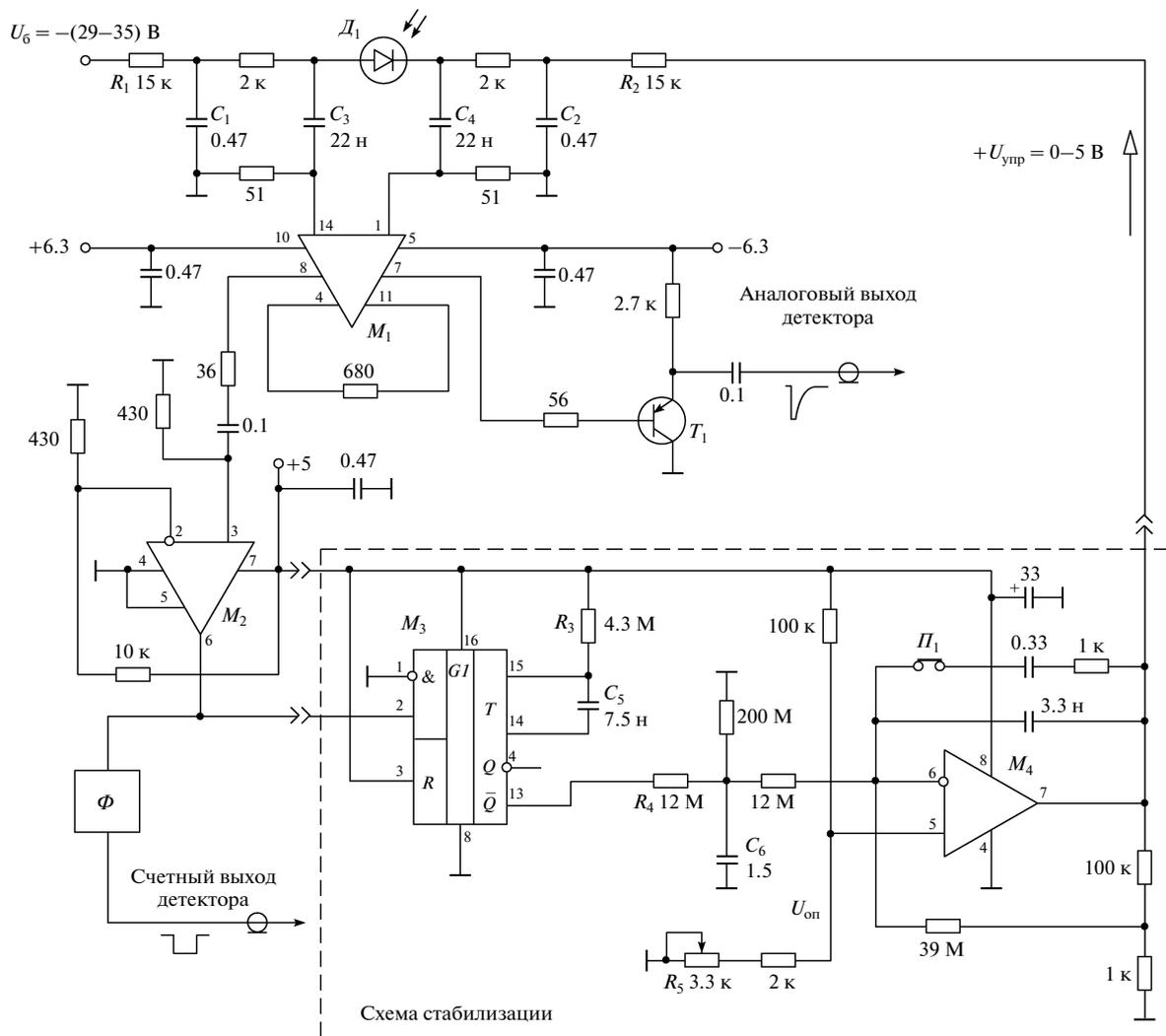


Рис. 3. Принципиальная схема аналогового канала регистрации сцинтилляционного детектора со схемой стабилизации.  $M_1$  – К174УВ5,  $M_2$  – МАХ997Е5А,  $M_3$  – КР1564АГ3,  $M_4$  – КР1446УД2;  $T_1$  – КТ326БМ;  $D_1$  – СПТА-143-30.

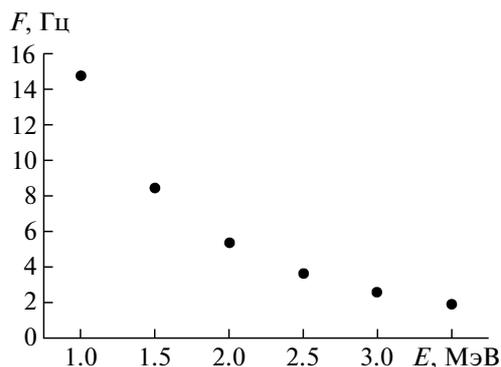
Сумма базового и управляющего напряжений определяет полное рабочее напряжение фотодиода.

Съем сигналов с фотодиода осуществляется дифференциально через разделительные конденсаторы  $C_3$ ,  $C_4$  непосредственно на симметричные входы высокочастотного усилителя  $M_1$  с полосой пропускания 100 МГц и коэффициентом усиления  $\sim 10$  по напряжению, что обеспечивает минимальное воздействие электромагнитных помех со стороны ключевых и цифровых схем и повышает амплитуду сигнала вдвое. Один из выходов усилителя используется для передачи аналогового сигнала через коаксиальную линию для спектрометрических целей. Со второго выхода усилителя сигналы поступают на вход быстродействующего компаратора  $M_2$  для формирования триггера с целью обеспечения временной привязки к фронту импульса и отметки о срабатывании конкретного детектора в пределах одного модуля. Формирова-

тель счетных импульсов  $\Phi$  создает в коаксиальной линии отрицательный импульс тока амплитудой 20 мА и длительностью 100 нс на нагрузке 50 Ом.

Схема автоматической настройки и стабилизации чувствительности детектора выполнена на одновибраторе  $M_3$  и операционном усилителе  $M_4$ , работающем в режиме усилителя-интегратора.

Логические импульсы т.т.л.-уровня произвольной длительности поступают с выхода компаратора  $M_2$  на вход одновибратора  $M_3$ , который формирует импульсы длительностью 10–15 мс и амплитудой 5 В. Статистическая последовательность этих импульсов интегрируется цепью  $R_4$ ,  $C_6$  с постоянной времени  $\sim 15$  с, в результате чего на входе интегратора  $M_4$  образуется напряжение, пропорциональное среднему значению непериодического сигнала. Это напряжение сравнивается с опорным на-

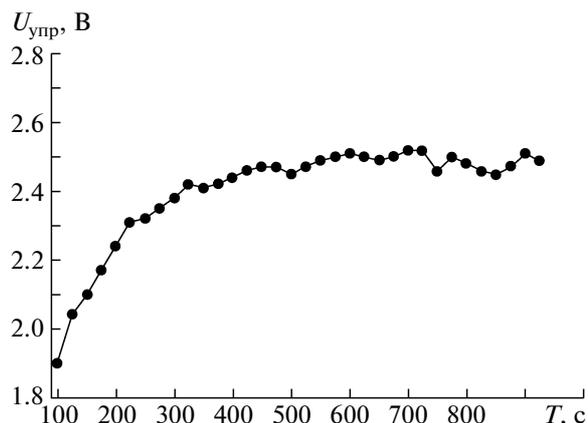


**Рис. 4.** Зависимость средней частоты срабатывания детектора от порога регистрации в подземных условиях на глубине 240 м водного эквивалента в медно-рудной шахте г. Пихасалми.

пряжением  $U_{оп}$ , усиливается и дополнительно интегрируется усилителем-интегратором  $M_4$  с постоянной времени  $\sim 600$  с. Напряжение  $U_{упр}$  с выхода  $M_4$  подается на катод фотодиода  $D_1$  и управляет его усилением так, что любые изменения чувствительности, а значит, и темпа счета детектора приводят к изменению напряжения на катоде фотодиода со знаком, противоположным изменению усиления. В условиях заданных номиналов элементов схемы одновибратора ( $R_3$ ,  $C_5$ ) средняя частота, на которой должен работать детектор, задается величиной  $U_{оп}$  с помощью потенциометра  $R_5$ . Изменение опорного напряжения потенциометром  $R_5$  позволяет выбрать усредненную частоту стабилизации в пределах 2–10 Гц. Это соответствует изменению порога регистрации в пределах 3.5–1.3 МэВ, как видно из графика (рис. 4) зависимости темпа счета детектора от порога, полученного в подземных условиях в месте расположения установки.

На рис. 5 показан процесс выбега управляющего напряжения во время установления схемы в стационарный режим после включения детектора. Как видно из этого рисунка, время установления, в течение которого детектор автоматически настраивается на заданный порог, составляет 600–700 с и зависит как от постоянной интегрирования, так и от выбранного усиления интегратора. Величина базового напряжения  $-U_6$  выбирается такой, чтобы в установившемся режиме управляющее напряжение имело среднее значение  $\sim 2.5$  В, что соответствует середине диапазона управления 0–5 В, определяемого усилителем-интегратором  $M_4$ . Это позволяет стабилизировать усиление фотодиода при его отклонении как в большую, так и в меньшую сторону.

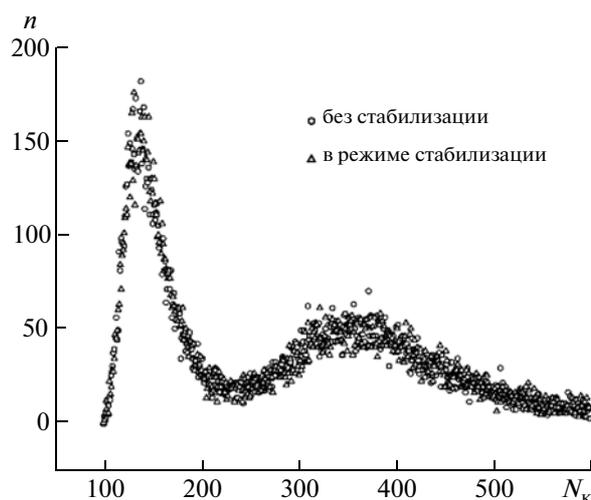
На рис. 6 показаны два спектра энерговыделений в детекторе, наложенные один на другой. Видно, что спектр, полученный в режиме стаби-



**Рис. 5.** Зависимость от времени управляющего напряжения схемы стабилизации через 100 с после включения детектора. Измерения напряжения проводились через каждые 25 с.

лизации, не размыт относительно спектра с фиксированным усилением фотодиода, что позволяет использовать этот режим для контроля и калибровочных работ в режиме привязки по энерговыделению в скintилляторе от вторичных космических лучей и  $\gamma$ -квантов.

Однако параметры данных спектров не позволяют судить об эффективности стабилизации, так как энергетическое разрешение детектора составляет 25–30%, что значительно превышает погрешность стабилизации. Поскольку непосредственное измерение отклика фотодиода на световое воздействие в процессе стабилизации усиления относительно усредненной частоты следования импульсов



**Рис. 6.** Спектры энерговыделений в детекторе в режиме стабилизации и без стабилизации усиления фотодиода ( $n$  — число событий в каналах,  $N_k$  — номер канала). Время измерения 4000 с, порог регистрации  $\sim 2$  МэВ, средний темп счета  $4.95$  с $^{-1}$ .

невозможно, необходимы наблюдения случайных флуктуаций управляющего напряжения, оказывающего непосредственное влияние на мгновенные значения усиления фотодиода. На рис. 7 (диаграмма 1) приведен характерный фрагмент временных флуктуаций управляющего напряжения стабилизатора, выделенный из графика часового наблюдения. Такие флуктуации управляющего напряжения характерны для любого фотоприемника и принципиально неустраняемы, так как, с одной стороны, система стабилизации усиления фотодиода должна иметь инерционность, достаточную для качественного интегрирования случайной последовательности импульсов, а с другой — достаточно быстро реагировать на кратковременные изменения темпа счета. Очевидно, что эти качества находятся в противоречии, поэтому флуктуации, связанные с откликом инерционной системы стабилизации на нерегулярный характер сигнала, являются неадекватными по отношению к временным флуктуациям входных импульсов. Таким образом, реакция схемы всегда запаздывает по отношению к изменениям на входе, и отработка входной флуктуации происходит уже тогда, когда она изменила свой характер.

Неадекватность реакции схемы на мгновенные изменения входного случайного процесса приводит к ошибкам стабилизации, которые не позволяют использовать схему для решения вариационных задач, требующих высокой точности поддержания чувствительности детектора, но в тех случаях, когда основным параметром детектора является эффективность регистрации мюонов, она имеет преимущество перед иными способами стабилизации благодаря простоте исполнения.

Из приведенной на рис. 7 диаграммы 1 следует, что при среднем значении управляющего напряжения  $U_{упр} = 2.5$  В стандартное отклонение составляет 0.067 В. По отношению к общему напряжению питания  $\sim 30$  В фотодиода данного типа эта величина составляет 0.22%. С учетом изменения величины сигнала фотодиода от напряжения питания  $\sim 3.6\%$  на каждые 0.1 В питающего напряжения стандартное отклонение порога данного детектора составит 2.4%. Мгновенные изменения управляющего напряжения относительно среднего могут достигать и больших величин, но поскольку порог регистрации выбран значительно ниже критического, при котором достигается необходимая эффективность регистрации  $\sim 95\%$ , эти отклонения можно не принимать в расчет.

### УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ

Очевидно, что погрешность стабилизации порога по темпу счета детектора определяется дисперсией распределения случайной последовательности импульсов в заданном интервале времени,

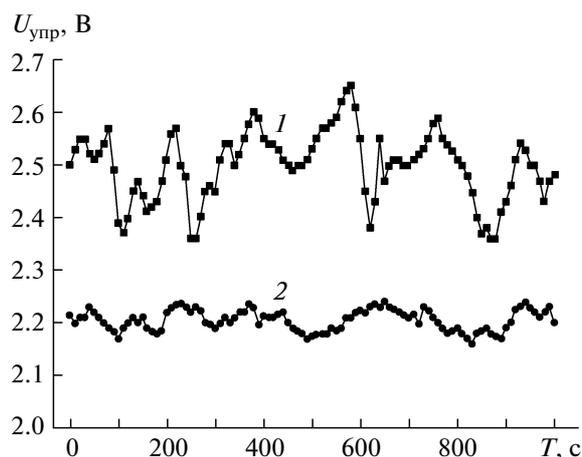


Рис. 7. Временные диаграммы управляющего напряжения схемы стабилизации. Измерения напряжения проводились через каждые 10 с. 1 — флуктуации управляющего напряжения схемы стабилизации (рис. 3); 2 — флуктуации управляющего напряжения для схемы стабилизации с временной селекцией.

причем наибольшее отклонение управляющего напряжения, а значит, и коэффициента усиления фотодиода происходит в моменты максимальных флуктуаций случайной последовательности импульсов детектора. Появление больших пауз или пакетов, характерных для пуассоновского распределения, выводит систему из равновесия, вызывая значительные неадекватные отклонения от заданного усиления.

Уменьшение погрешности данного метода может быть достигнуто посредством такого искусственного воздействия на случайную последовательность импульсов заданной частоты, которое уменьшит дисперсию и, что особенно важно, уменьшит долю хвостов относительно начального пуассоновского распределения. Добиться этого можно селекцией временных интервалов между импульсами без потери среднего числа импульсов за единицу времени. Для этого была разработана схема, в которой исходная случайная последовательность импульсов сначала задерживается на время, равное среднему интервалу между импульсами, и далее задержанная последовательность суммируется с исходной последовательностью, что приводит к удвоению числа событий и образованию коррелированных парных импульсов с временными интервалами, близкими к среднему значению начального процесса. Затем инерционной схемой из полученной суммарной последовательности вычлняются группы импульсов, интервалы между которыми короче некоторого заданного значения, определяющего верхнюю частотную границу диапазона работы системы стабилизации.

На рис. 8 представлена схема стабилизации энергетического порога детектора с временной

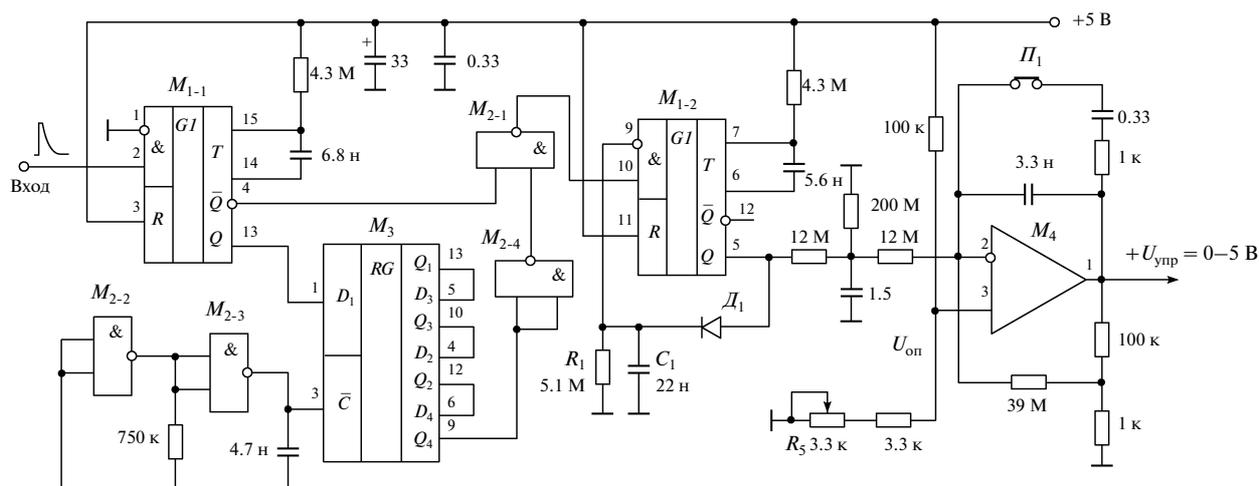


Рис. 8. Принципиальная схема стабилизации энергетического порога детектора с временной селекцией сигналов.  $M_1$  – КР1564АГ4,  $M_2$  – КР561ЛА7,  $M_3$  – КР1561ИР10,  $M_4$  – КР1446УД2;  $D_1$  – КД521А.

селекцией интервалов времени между импульсами случайной последовательности. Параметры схемы рассчитаны на описанный выше детектор.

Как и в предыдущей схеме на рис. 3, с дискриминатора на вход одновибратора  $M_{1-1}$  поступает случайная последовательность импульсов с частотой  $\sim 5$  Гц, что соответствует среднему периоду  $\sim 200$  мс. Одновибратор формирует на своем инверсном выходе импульсы отрицательной полярности длительностью  $\sim 13$  мс, которые поступают на вход вентиля  $M_{2-1}$ . С неинверсного выхода того же одновибратора импульсы положительной полярности поступают на вход 18-разрядного сдвигового регистра  $M_3$ , тактируемого последовательностью импульсов с периодом  $200/18 = 11.1$  мс. Регистр используется как безынерционная за-

держка импульсов на время  $\sim 200$  мс с максимальной случайной погрешностью 11.1 мс, обусловленной периодом тактового генератора, выполненного на элементах  $M_{2-2}$  и  $M_{2-3}$ . На выходе регистра появляется вся последовательность входных импульсов с задержкой  $\sim 200$  мс относительно исходной, как показано на осциллограммах рис. 9.

Задержанная последовательность импульсов после инвертирования в  $M_{2-4}$  (рис. 8) суммируется с исходной последовательностью на  $M_{2-1}$ , после чего импульсы стандартизируются одновибратором  $M_{1-2}$  по длительности до 10 мс. Время восстановления одновибратора  $M_{1-2}$  увеличено обратной связью с элементами  $D_1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$  до  $\sim 100$  мс, что вдвое меньше среднего исходного периода следования импульсов. Инерционность этого одновибратора обеспечивает временную селекцию импульсов посредством удаления избыточных импульсов в пакетах, интервал между которыми менее 100 мс.

Результат сложения импульсов и их селекции иллюстрируется характерными осциллограммами на рис. 10, из которых видно как в случайной последовательности импульсов после селекции возникает большое число стандартных временных интервалов, близких исходному среднему периоду входных импульсов  $\sim 200$  мс. Таким образом, вначале схема увеличивает число импульсов в исходной последовательности почти в 1.9 раза с учетом случайных наложений, заполняя паузы между импульсами и формируя пары коррелированных импульсов с временными интервалами, близкими к среднему значению начального процесса, затем благодаря инерционности одновибратора  $M_{1-2}$  вырезает из суммарной последовательности избыточные пакеты, выделяя сочетания импульсов с интервалами, близкими к среднему значению исходного периода следования  $\sim 200$  мс.

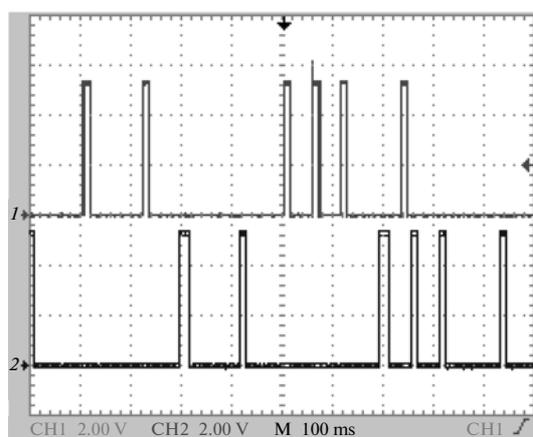


Рис. 9. Характерные осциллограммы импульсов схемы стабилизации с селекцией временных интервалов: 1 – исходная последовательность импульсов детектора, 2 – последовательность импульсов детектора, задержанная на 200 мс.

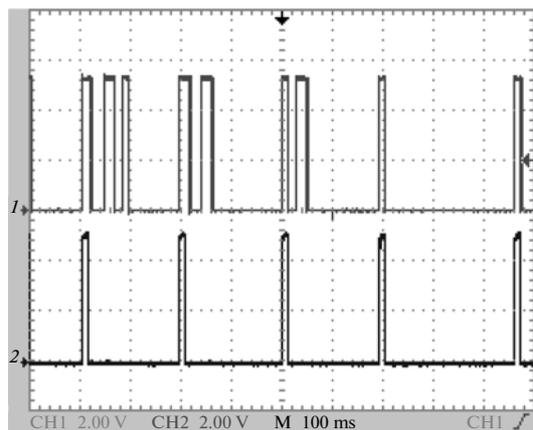


Рис. 10. Характерные осциллограммы импульсов схемы стабилизации с селекцией временных интервалов: 1 – сумма исходных и задержанных импульсов, 2 – последовательность импульсов после селекции.

На рис. 11 показаны распределения исходной последовательности импульсов с детектора (1) и последовательности импульсов детектора после временной селекции (2), построенные в интервале 1.0 с по 4000 отсчетов для каждого варианта. После аппроксимации обоих распределений функцией Гаусса для исходного пуассоновского распределения получено стандартное отклонение  $2.27 \pm 0.06$  Гц при среднем  $5.37 \pm 0.05$  Гц и  $0.97 \pm 0.06$  Гц при среднем  $4.88 \pm 0.05$  Гц – для распределения с селекцией временных интервалов. Отношение среднеквадратических отклонений в 2.34 раза является хорошей предпосылкой для снижения флуктуаций порога детектора, хотя и не может быть полной характеристикой реакции схемы с временной селекцией на случайный процесс, так как не отражает степень влияния хвостов распределений.

На рис. 7 (диаграмма 2) был приведен фрагмент временных флуктуаций управляющего напряжения стабилизатора, выделенный из графика часового наблюдения, наиболее полно отражающий величину флуктуаций усиления фотоприемника, откуда следует, что среднеквадратическое значение флуктуаций для схемы с временной селекцией случайной последовательности импульсов составляет 0.02 В, что в  $\sim 3.3$  раза меньше, чем в исходной схеме (рис. 3), и стандартное отклонение порога детектора соответственно составит 0.73%. На краях диапазона перестройки погрешность возрастает и составляет 0.97% при средней частоте 2 Гц и 0.92% при частоте 7 Гц.

При несомненных преимуществах схемы с временной селекцией по точности стабилизации ее недостатком является сужение границ диапазона перестройки в области верхних частот до 7 Гц, обусловленное инерционностью схемы селекции относительно описываемого детектора, в то время

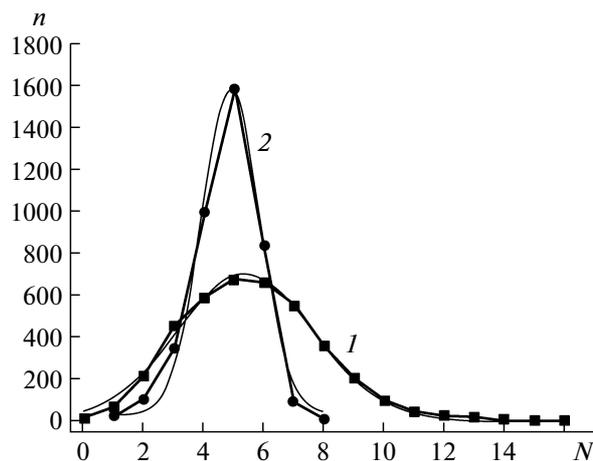


Рис. 11. Распределения последовательности импульсов с детектора в интервале 1.0 с ( $N$  – число импульсов в интервале,  $n$  – число событий для каждого  $N$ ): 1 – исходное пуассоновское распределение; 2 – распределение импульсов после временной селекции.

как предыдущая схема (рис. 3) имеет верхнюю границу диапазона перестройки  $\geq 10$  Гц и ограничивается только длительностью импульса одновибратора  $M_3$ . При необходимости перестройки в схеме рис. 8 средней рабочей частоты более 7 Гц потребуется пропорциональное изменение времени задержки сдвигового регистра  $M_3$  изменением тактовой частоты задающего генератора, времени восстановления одновибратора  $M_{1-2}$  и длительностей импульсов одновибраторов  $M_{1-1}$  и  $M_{1-2}$ , т.е. четырех временных параметров схемы.

## ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Как следует из описания метода, он применим в любом детекторе непрерывных излучений, где допустим принцип поддержания порога или усиления на заданном уровне через стабилизацию средней частоты срабатывания, при условии приемлемости вышеуказанных погрешностей для любой из предложенных схем. Исключение составляют детекторы, использующие гейгеровский режим регистрации ввиду отсутствия необходимого диапазона регулировки усиления.

Одним из возможных вариантов использования метода может быть стабилизация порога сцинтилляционных детекторов по темпу счета космических мюонов на уровне энерговыделений  $\geq 5$  МэВ, когда регистрируемый поток мюонов через детектор является относительно стабильной величиной, изменяющейся, главным образом, под действием атмосферных явлений менее чем на 1%. Метод проверялся на детекторе с размерами пластического сцинтиллятора  $1000 \times 1000 \times 50$  мм с фотоприемником на основе фотоумножителей ФЭУ-49Б и ФЭУ-173 (детектор подробно описан

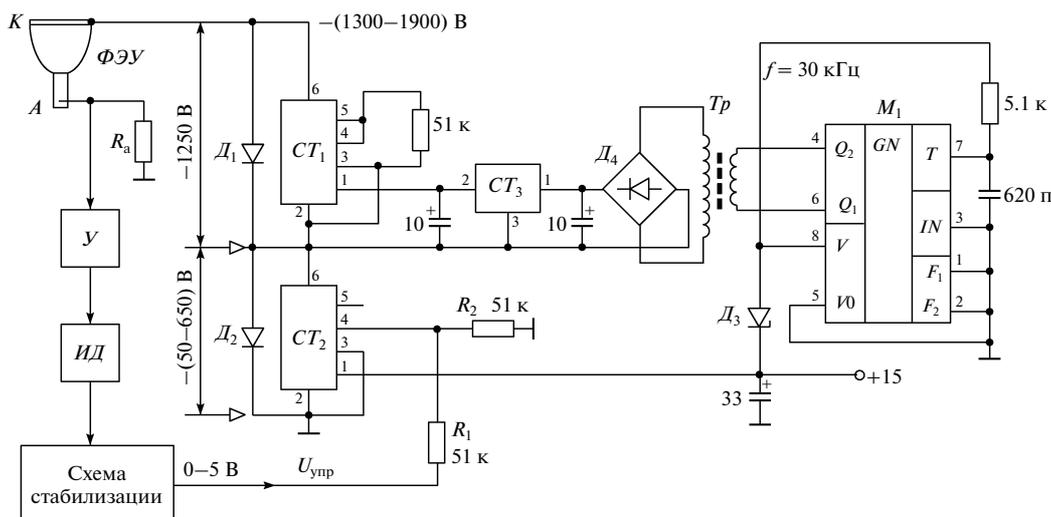


Рис. 12. Принципиальная схема стабилизации энергетического порога сцинтиляционного детектора на основе фотоэлектронного умножителя.  $M_1$  – КР1211ЕУ1;  $CT_1, CT_2$  – С4900 (Hamamatsu),  $CT_3$  – КР1157ЕН15;  $D_1, D_2$  – Е193Г,  $D_3$  – КС468А,  $D_4$  – КЦ-407А.

в [6]). На рис. 12 представлен вариант принципиальной схемы стабилизации порога сцинтиляционного детектора с управлением усиления фотоумножителя по цепи питания.

Как и в схеме на рис. 3, анодные импульсы после усилителя  $У$  формируются интегральным дискриминатором  $ИД$  и поступают в схему стабилизации порога.

Питание фотоумножителя  $ФЭУ$ , включенного по схеме с общим анодом, осуществляется двумя последовательно соединенными прецизионными регулируемые высоковольтными преобразователями ( $CT_1, CT_2$ ) С4900 (Hamamatsu). Питание стабилизатора  $CT_1$ , настроенного на максимальное фиксированное напряжение  $-1250$  В, осуществляется от интегрального стабилизатора  $CT_3$ , обеспечивающего стабилизированное напряжение  $15$  В. Напряжение стабилизатора  $CT_2$  является управляющим и регулируется от схемы стабилизации через делитель  $R_1, R_2$  в пределах  $-(50-650)$  В. Гальваническая развязка цепи питания стабилизаторов по высокому напряжению осуществляется через высокочастотный импульсный трансформатор  $Тр$  на частоте периодических колебаний  $\sim 30$  кГц, генерируемых двухтактным импульсным преобразователем  $M_1$ . Диоды  $D_1$  и  $D_2$  являются элементами защиты стабилизаторов при коротком замыкании в цепи нагрузки.

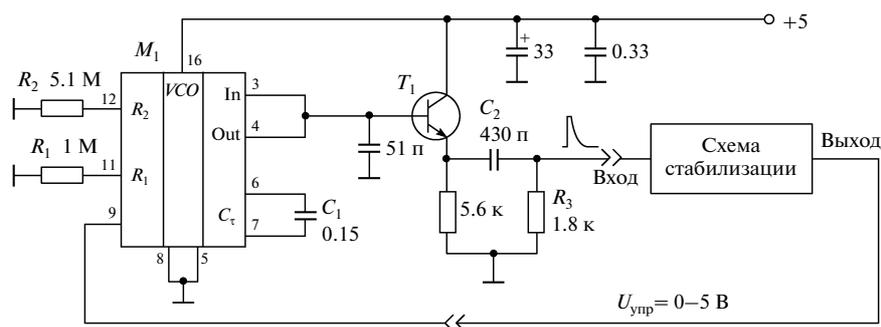
Погрешность стабилизации усиления фотоумножителя не отличается от аналогичных схем, приведенных выше для малогабаритных детекторов на основе лавинных фотодиодов. Испытания детектора проводились на высоте  $\sim 1700$  м над уровнем моря, где средний темп счета данного детектора с порогом  $\sim 5$  МэВ составил  $\sim 230$  с $^{-1}$ . Соот-

ветственно при данной частоте все времязадающие элементы схем стабилизации были уменьшены в  $\sim 40$  раз, а время выхода на режим стабилизации составило  $\sim 20$  с.

## НАСТРОЙКА СХЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ

Принципиально начальную настройку схем стабилизации на заданную частоту можно производить непосредственно на работающем детекторе изменением величины опорного напряжения на входе усилителя-интегратора. Однако флуктуации сигнала, низкий темп счета детекторов и инерционность схем в большинстве случаев создают значительные неудобства и не позволяют получить требуемую точность настройки. Конструктивно предложенные схемы стабилизации желательно выполнять в виде отдельных устройств (печатных плат), подключаемых к аналоговой схеме детектора, содержащей усилитель и дискриминатор, через разъемы. Это позволяет заранее настраивать схемы стабилизации независимо от детектора в лабораторных условиях с использованием имитаторов сигналов. На рис. 13 приведена схема подключения имитатора сигналов детектора к схеме стабилизации порога детектора. Имитатором является генератор импульсов, управляемый напряжением.

Генератор импульсов  $M_1$  вместе с эмиттерным повторителем  $T_1$  и дифференцирующей цепью  $C_2, R_3$  формируют положительные импульсы т.т.л.-уровня, аналогичные импульсам интегрального дискриминатора детектора. Времязадающие элементы схемы рассчитаны для малогабаритного детектора (рис. 16). Конденсатор  $C_1$  определяет среднюю частоту  $\sim 5$  Гц, а резисторы  $R_1$  и  $R_2$  — грани-



**Рис 13.** Принципиальная схема подключения узла стабилизации к имитатору сигналов детектора.  $M_1$  – KP1561ГГ1;  $T_1$  – КТ3102А.

цы диапазона генерации, соответственно 2 и 11 Гц. Отношение  $R_2/R_1$  определяет крутизну изменения частоты от величины управляющего напряжения. Поскольку настраиваемая схема стабилизации своим управляющим напряжением изменяет частоту генератора периодических колебаний, в которой отсутствуют какие-либо существенные флуктуации, постоянная времени усилителя интегратора может быть уменьшена в  $\sim 100$  раз отключением переключки  $\Pi_1$  в усилителе-интеграторе (см. схемы на рис. 3 и рис. 8). При этом время выхода на режим стабилизации схемы уменьшается до  $\sim 20$  с, что позволяет быстро настроить узел стабилизации на нужную частоту изменением величины опорного напряжения  $U_{оп}$  потенциометром  $R_5$ .

В заключение представим основные параметры приведенных схем стабилизации энергетического порога детекторов:

1) при использовании в качестве основных времязадающих компонентов одновибраторов  $M_3$  (рис. 3) и  $M_{1-2}$  (рис. 8) конденсаторов с температурным коэффициентом емкости не более  $0.75 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$  и резисторов с температурным коэффициентом сопротивления  $\leq 10^{-3}/^\circ\text{C}$  собственный температурный дрейф частоты схем стабилизации не превышает  $0.1\%/^\circ\text{C}$ ;

2) благодаря использованию в качестве опорного напряжения цепи питания одновибраторов нестабильность питающего напряжения 5 В приводит к одновременному изменению как стандар-

тизуемых амплитуд импульсов, так и опорного напряжения; в результате линейной компенсации этих двух величин отклонение частоты удержания при изменении напряжения питания на  $\pm 15\%$  не выходит за рамки  $\pm 0.03\%$ ;

3) вследствие применения в схемах стабилизации микромощных к.м.о.п.-микросхем их энергопотребление не превышает 1 мВт.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 09-02-00434), а также была поддержана Программой фундаментальных исследований Президиума РАН “Физика нейтрино и нейтринная астрофизика” и Федеральной целевой программой “Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы” (контракт № 16.518.11.7072).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volchenko V., Volchenko G., Akhrameev E. et al. // *Astrophys. Space Sci. Trans.* 2011. V. 7. P. 171.
2. Enqvist T., Joutsenvaara J., Jamsen T. et al. // *Nucl. Phys. B.* 2007. V. 165. P. 349.
3. Enqvist T., Joutsenvaara J., Jamsen T. et al. // *Nucl. Phys. B.* 2008. V. 175–176. P. 307.
4. Bezrukov L., Butin K., Davitashvili I. et al. // *Proc. Science.* 2010. PD09:026.
5. Akhrameev E.V., Bezrukov L.B., Dzaparova I.M. et al. // *Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A.* 2009. V. 610. P. 419.
6. Петков В.Б., Волченко В.И., Волченко Г.В. и др. // ПТЭ. 2006. № 6. С. 50.