

РЕГУЛИРУЕМЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ,
ИМИТИРУЮЩИХ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ВСПЫШКИ ВОЛЬФРАМАТОВ

В. В. Кобычев

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Описывается простой генератор импульсов с временными параметрами, близкими к параметрам сцинтилляционных вспышек вольфрамов, и регулируемой задержкой и амплитудой. Генератор позволяет создавать до четырех независимых импульсов в отдельных каналах, их сумму (прямую и инвертированную), а также синхронимпульсы, привязанные к переднему фронту каждого из импульсов. Генератор предназначен для настройки сложных систем накопления данных для детекторов, построенных на сцинтилляторах-вольфраматах.

1. Введение

Во многих экспериментах по исследованию редких распадов атомных ядер и поиску низкоэнергетических эффектов, предсказываемых физическими теориями за рамками Стандартной модели, используются сцинтилляционные детекторы на основе монокристаллов вольфрамов. В частности, монокристаллы вольфрамата кадмия (двух типов: с кадмием, обогащенным до 83 % изотопом ^{116}Cd , и с природным содержанием изотопов) использовались соответственно как основной и защитный детекторы в совместном эксперименте ИЯИ НАН Украины и Флорентийского университета (Италия), проводившемся в Солотвинской подземной лаборатории [1] с целью поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{116}Cd [2]. В этом эксперименте было также обнаружено первое указание на альфа-распад ^{180}W [3]; это открытие было затем подтверждено в эксперименте с кристаллом CaWO_4 [4]. В экспериментах коллаборации DAMA с участием ИЯИ НАН Украины, выполненных в подземной лаборатории Гран-Сассо (Италия), были уточнены параметры четырехкратно запрещенного бета-распада ^{113}Cd (сцинтиллятор CdWO_4) [5] и установлены новые ограничения на двойные бета-процессы на ядрах цинка (сцинтиллятор ZnWO_4) [6]. Для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{48}Ca предложен крупномасштабный эксперимент CARVEL [7] с использованием сцинтилляторов $^{48}\text{CaWO}_4$. Коллаборация CRESST выполняет эксперимент по поиску частиц темной материи с использованием сцинтиллирующего криогенного болометра CaWO_4 [8]. Существуют предложения по детектированию низкоэнергетических солнечных нейтрино [9] с использованием вольфрамов. Недавно было предложено использовать вольфрамат свинца в качестве активной защиты для высокочувствительного эксперимента по поиску безнейтринного двойного бета-распада ^{116}Cd [10]. Широкое применение сцинтилляторов-

вольфрамов обусловлено их химической стабильностью и негигроскопичностью, существованием хорошо отработанной методики отделения альфа-частиц от бета-частиц и гамма-квантов по форме импульса [11], относительно высоким световыходом, высокой плотностью и малой радиационной длиной. Все это облегчает проведение долговременного низкофонового эксперимента и дает возможность эффективного подавления фона.

Характерной чертой сцинтилляторов-вольфрамов является их относительно большое время высвечивания (10 - 15 мкс). Это затрудняет применение стандартных спектрометрических амплитудных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), рассчитанных на длительность вспышки ~ 1 мкс. Поэтому в отмеченных выше экспериментах использовались достаточно сложные системы накопления данных, включающие в себя специально разработанные блоки, которые преобразуют сцинтилляционный сигнал с сохранением информации о собранном заряде, отделяют шумовые и другие фоновые сигналы от полезных, а также выделяют фронт сигнала для выработки триггера и т. д. Многие из этих систем регистрации включают в себя оцифровщик импульсов, что позволяет при обработке отделять события, обусловленные альфа-частицами (которые в зависимости от целей эксперимента могут быть как фоновыми, так и полезными сигналами), от бета- и гамма-событий. Системы накопления данных, включающие в себя оцифровщик формы импульса, могут иметь весьма большое мертвое время, обусловленное относительно большой длительностью передачи оцифрованной информации (от единиц до десятков килобайт) в записывающий компьютер. Для многодетекторных установок на основе сцинтилляционных кристаллов-вольфрамов системы накопления данных особенно усложняются. Их настройка с непосредственным использованием выходных сигналов сцинтилляционных детекторов, облучаемых калибровочными источниками,

нередко бывает затруднена в связи со стохастическим характером этих сигналов, не позволяющим многократно воспроизводить ту или иную последовательность импульсов с выбранными амплитудами и задержками. Для отладки такого рода систем и исследования их временных свойств в различных режимах работы в отделе физики лептонов ИЯИ НАН Украины, участвующем в большинстве вышеупомянутых экспериментов, был разработан описанный в данной работе простой четырехканальный генератор импульсов, имитирующих сцинтилляционные сигналы вольфраматов, с регулируемыми задержками и амплитудами.

2. Характеристики блока

В конкретной реализации генератор был собран в виде блока стандарта «Вектор» двойной ширины, однако он может быть реализован как блок любого подходящего стандарта (САМАС, NIM и т.д.), обеспечивающего стабилизированные напряжения питания ± 6 и ± 12 В, либо как независимое устройство. Входные и выходные сигналы коммутируются с помощью разъемов CP-50, BNC или LEMO с волновым сопротивлением 50 Ом.

Генератор запускается по нарастающему фронту внешнего синхроимпульса. Синхроимпульс поступает на входы четырех идентичных трактов. Каждый из трактов генерирует задержанный относительно входного синхроимпульса положительный аналоговый сигнал, имитирующий по форме сцинтилляционную вспышку с относительно коротким передним фронтом (около 1 мкс) и длинным экспоненциальным задним фронтом (время затухания около 10 мкс). Задержка относительно входного синхроимпульса регулируется независимо для каждого тракта в интервале от 0,05 мкс до 20 мс. Плавная регулировка задержки осуществляется подстроечным резистором, ступенчатая регулировка – переключателями, позволяющими установить три диапазона регулировки. Плавно регулируется также амплитуда выходного сигнала каждого тракта в диапазоне от 0 до +10 В. Все органы управления каждого тракта (плавная регулировка задержки, переключатели диапазонов задержки, регулировка амплитуды) выведены на переднюю панель блока.

Кроме аналогового сигнала, каждый тракт генерирует короткий (1 мкс) синхроимпульс, одновременно с началом переднего фронта аналогового выходного сигнала. Выходной синхроимпульс генерируется в стандарте NIM (отрицательный токовый сигнал с амплитудой 25 мА). Оба выходных сигнала (аналоговый и временной)

каждого тракта выведены на разъемы передней панели блока (выходы «A1»–«A4», «T1»–«T4»).

Аналоговые сигналы поступают на сумматор, который создает суммарный аналоговый сигнал от всех четырех трактов (выход « ΣA »). Этот сигнал может быть использован для отладки системы накопления данных с целью измерения мертвого времени и исследования чувствительности к цепочкам быстрых последовательных распадов, например цепочек $^{220}\text{Rn} - ^{216}\text{Po}$ ($T_{1/2} = 0,145$ с, радиоактивный ряд ^{232}Th), $^{212}\text{Bi} - ^{212}\text{Po}$ ($T_{1/2} = 0,299$ мкс, ряд ^{232}Th), $^{214}\text{Bi} - ^{214}\text{Po}$ ($T_{1/2} = 164,3$ мкс, ряд ^{238}U), $^{219}\text{Rn} - ^{215}\text{Po}$ ($T_{1/2} = 1,781$ мс, ряд ^{235}U). Любой из трактов может быть независимо отключен от входа сумматора с помощью микропереключателей, выведенных на переднюю панель, так что на выходе « ΣA » может быть от 0 до 4 аналоговых импульсов, каждый из которых имеет свою амплитуду и время задержки. На передней панели блока находится переключатель « $\Sigma A/\rightarrow$ », позволяющий инвертировать выходной сигнал сумматора аналоговых сигналов.

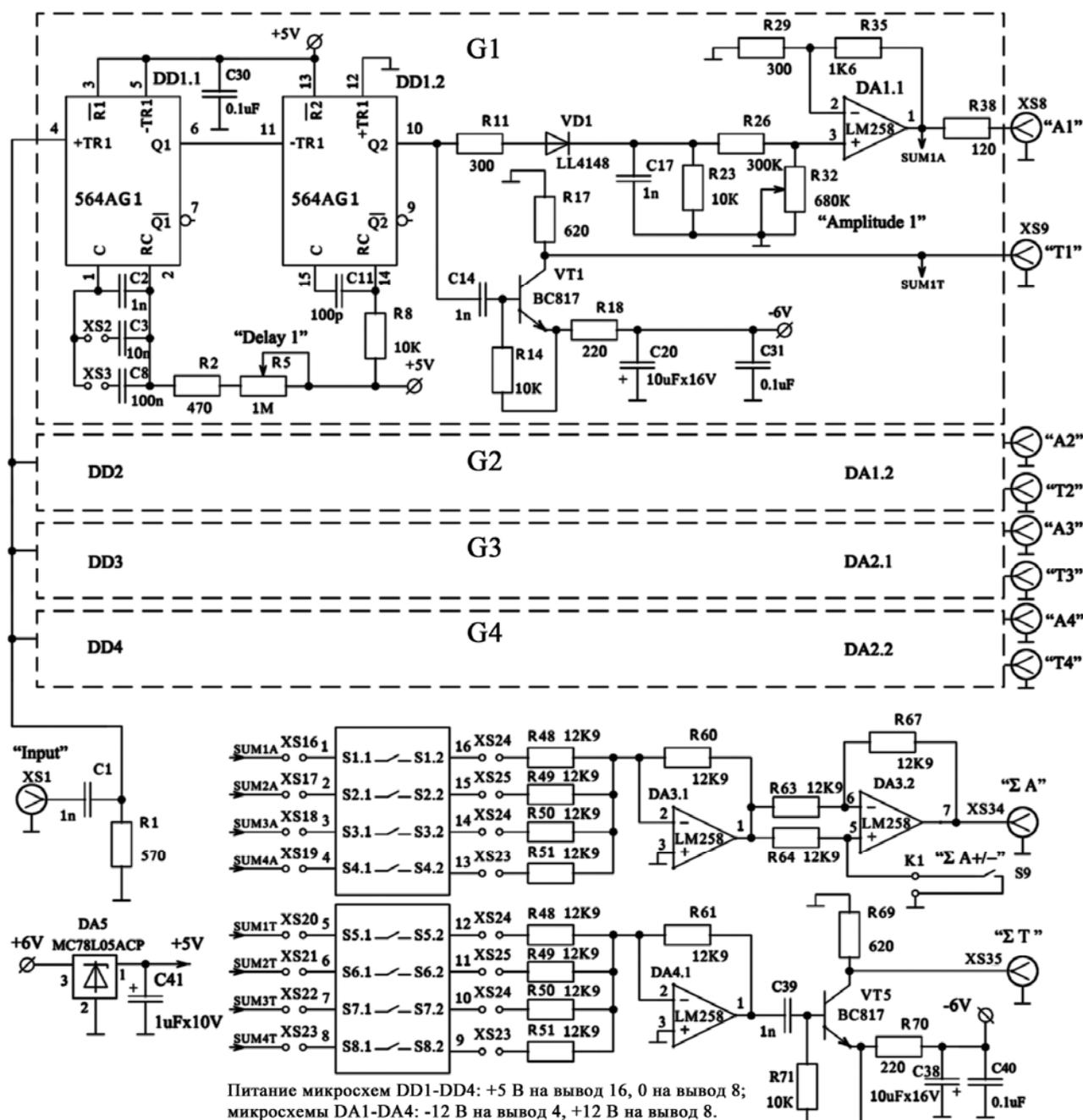
Временные сигналы (синхроимпульсы) всех трактов логически суммируются и подаются на отдельный выход « ΣT ». Временные сигналы также могут быть независимо отключены от входа логического сумматора с помощью микропереключателей на передней панели.

Максимальная частота повторения входных синхроимпульсов, запускающих генераторы, определяется наибольшей задержкой, выставленной на генераторах. Если все задержки выставлены на минимум, частота следования запускающих синхроимпульсов может достигать 500 кГц, хотя использование блока в таком режиме не имеет практического смысла.

Органы управления параметрами выходных сигналов (задержка, амплитуда) не проградуированы, поскольку предусматривается, что эти параметры должен контролировать пользователь с помощью осциллографа.

3. Описание схемы

Внешний синхроимпульс (подается на разъем «Input») через дифференцирующую цепочку C1R1, отсекающую постоянную компоненту сигнала и позволяющую запускать генератор сигналами любой полярности, поступает на входы четырех идентичных независимых трактов G1–G4 (см. схему). В каждом из трактов входной сигнал, соответствующий нарастающему фронту входного синхроимпульса, запускает генератор регулируемой задержки, собранный на одном из двух элементов микросхемы 564AG3 (DD1.1; ввиду идентичности трактов далее рассматрива-



Принципиальная схема блока. Тракты G2, G3 и G4 полностью аналогичны тракту G1, за исключением нумерации элементов и цоколевки выходного операционного усилителя: элементы DA1.2 и DA2.2 в трактах G2 и G4 имеют цоколевку, аналогичную показанному на схеме элементу DA3.2.

ется только тракт G1). Время задержки определяется параметрами подключенной к элементу регулируемой RC-цепочки (R2+R5, C2+C3+C8). Плавная регулировка задержки выполняется подстроечным резистором R5, ступенчатая регулировка – параллельным подключением к конденсатору C2 одного из двух дополнительных конденсаторов (C3 и C8) посредством выведенных на переднюю панель микропереключателей. С указанными на схеме номиналами конденсаторов и резисторов минимальная задержка близка к нулю (менее 0,05 мкс), максимальная составляет около 20 мс.

Задержанный импульс запускает одновибратор, собранный на втором элементе микросхемы 564AG3 (DD1.2). Длительность выходного сигнала одновибратора жестко задана цепочкой C11R8 (около 1 мкс). Выходной импульс одновибратора через резистор R11 и импульсный диод VD1 заряжает конденсатор C17, который после окончания импульса начинает разряжаться через резистор R23. Профиль напряжения на конденсаторе C17 (быстрое нарастание, экспоненциальный задний фронт с временем спада $\tau = C17 \times R23 = 10 \text{ мкс}$) имитирует параметры вспышки, характерные для сцинтилляторов-

вольфрамов. Напряжение на конденсаторе С17 через регулируемый делитель R26R32, определяющий амплитуду выходного сигнала, поступает на неинвертирующий вход операционного усилителя LM258 (DA1.1; микросхема содержит по два операционных усилителя в корпусе). Коэффициент усиления каскада выбран таким образом, чтобы амплитуда импульса на выходе не превышала +10 В. Выходной сигнал операционного усилителя (импульс положительной полярности) поступает на выход «А1» блока.

Выходной импульс одновибратора DD1.2 используется также для создания синхроимпульса, одновременного с передним фронтом аналогового сигнала. Для этого используется транзистор VT1 в ключевом режиме, открывающийся при высоком логическом уровне на выходе одновибратора. На коллекторе транзистора формируется токовый импульс отрицательной полярности с длительностью 1 мкс и амплитудой 25 мА (в режиме короткого замыкания на выходе «Т1»), т. е. синхроимпульс в стандарте NIM.

С аналоговых выходов четырех трактов G1–G4 сигналы (обозначены на схеме как SUM1A–SUM4A) через микропереключатели S1–S4, позволяющие выбрать любой набор сигналов для суммирования, поступают на входы аналогового сумматора на операционном усилителе DA3.1. Если задержки некоторых из суммируемых импульсов близки и амплитуды достаточно велики (т.е. их суммарная амплитуда достигает 10–12 В), сумматор входит в режим насыщения, и суммированный сигнал искажается, поэтому пользователь должен предотвращать подобное наложение импульсов с большой амплитудой. Сумматор одновременно инвертирует сигналы. Суммированный и инвертированный сигнал идет на вход повторителя-инвертора DA3.2, режим работы которого выбирается переключателем S9 « $\Sigma A+/-$ ». В положении «+» неинвертирующий вход DA3.2 замкнут на корпус, и операционный усилитель инвертирует сигналы, в результате сигнал на выходе « ΣA » оказывается в положительной полярности. В положении «-» операционный усилитель работает в режиме повторителя, и сигналы на выходе « ΣA » имеют отрицательную полярность.

Выходные синхроимпульсы трактов G1–G4 через микропереключатели S5–S8, позволяющие отключить любой из трактов, подаются на аналоговый сумматор, собранный на операционном усилителе DA4.1. Эти сигналы обозначены на схеме как SUM1T–SUM4T. Инвертированная сумма синхроимпульсов управляет ключом на транзисторе VT5, идентичным рассмотренному выше, и формирует на выходе « ΣT » токовый си-

гнал в стандарте NIM, являющийся логической суммой всех поступающих на вход сумматора синхроимпульсов.

Схема использует поступающие с шины крейта стабилизированные напряжения ± 12 В (для питания операционных усилителей), -6 В (для питания ключевых каскадов, создающих выходные синхроимпульсы) и $+6$ В, которые с помощью стабилизатора DA5 преобразуются в $+5$ В и используются для питания TTL-микросхем. Для предотвращения распространения импульсных помех по цепям питания в схему входят фильтрующие электролитические и керамические конденсаторы C20, C30, C31 (и аналогичные в трактах G2–G4), C38, C40, C41.

4. Пример использования

Блок был использован для налаживания экспериментальной системы набора данных, которая разрабатывается для низкофоновой сцинтилляционной многодетекторной установки, предназначенной для исследования редких процессов. Основной детектор и часть защитных детекторов установки представляют собой вольфраматы. Система, помимо регистрации амплитудных спектров четырех детекторов, записывает форму импульса основного детектора (с помощью 12-разрядного оцифровщика со скоростью 20 Мсмплов/с), момент события в каждом детекторе и набор однобитных признаков, сопровождающих каждое такое событие (например, наличие/отсутствие сигнала электромагнитной помехи или мюонного вето). Решение о переносе в управляющий компьютер зарегистрированной формы импульса принимается системой в зависимости от амплитуды сигнала. Часть системы, записывающая амплитудные спектры, включает в себя специально сконструированные блоки для предварительной аналоговой обработки сцинтилляционных импульсов вольфрамов. Эти блоки, в частности, определяют тип импульса (сцинтилляционный, шумовой, импульс от активного пластикового световода) по его форме; в зависимости от результата выдают на стандартный амплитудный АЦП короткий импульс, амплитуда которого пропорциональна собранному в течение 40 мкс заряду; вырабатывают синхроимпульсы, одновременные переднему фронту входного сигнала, для запуска таймера и выработки основного триггера. Ясно, что отклик системы регистрации сложным образом зависит от формы и последовательности входных импульсов, а также от временного промежутка между ними. С помощью описываемого устройства выполнялась отладка аппаратной части системы регистрации и ее управляющей программы, ра-

ботающей на комплексе из двух компьютеров. Одним из основных источников фона в детекторах такого рода являются нуклиды уранового и ториевого рядов, присутствующие в составе сцинтиллятора, поэтому при отладке была также исследована эффективность регистрации (а также селективность офф-лайнной обработки записанной последовательности событий) по отношению к быстрым цепочкам распадов, присутствующим в этих рядах. Следует отметить, что отладка с помощью стандартных промышленных устройств потребовала бы использования значительно более дорогих решений: либо многоканального функционального генератора, либо набора блоков, включающего генератор импульсов с экспоненциальным задним фронтом, несколько регулируемых усилителей и регулируемых аналоговых линий задержки, обеспечивающих задержку до 20 мс.

5. Заключение

В данной работе описано устройство, генерирующее импульсы с профилем, характерным для сцинтилляторов-вольфраматов, и предназначенное для отладки и проверки систем набора данных для детекторов, включающих в себя такие

сцинтилляторы. Блок позволяет генерировать до четырех сигналов, запускаемых общим синхронимпульсом и независимо регулируемых по задержке и амплитуде, а также аналоговую сумму любой комбинации этих сигналов (при необходимости инвертированную); синхронимпульсы в стандарте NIM, привязанные к переднему фронту каждого из четырех сигналов; логическую сумму любой комбинации этих синхронимпульсов. Блок был собран в конструктиве «Вектор» на печатной плате с использованием SMD-элементов, отлажен и испытан (в том числе в условиях Солотвинской подземной лаборатории). С использованием блока выполнена отладка программной и аппаратной части системы регистрации, которая разрабатывается для низкофоновой сцинтилляционной многодетекторной установки.

Автор признателен В. В. Коваленко, Ю. Н. Черченко, В. И. Корнаге за полезные обсуждения и помощь в сборке и настройке блока. Разработка была частично поддержана целевой комплексной программой научных исследований НАН Украины и НКА Украины «Исследования структуры и состава Вселенной, скрытой массы и темной энергии» (шифр «Космомикрофизика»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zdesenko Yu. G., Kropivnyansky B. N., Kuts V. N., Nikolaiko A. S. The study of the background of the detectors in the Solotvina underground Laboratory // *Underground Physics-87: Proc. of the 2 Int. Symp., Baksan Valley, USSR, August 17 - 19, 1987.* - М.: Наука, 1988. - P. 291 - 295.
2. Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychhev V. V. et al. Search for 2β decay of cadmium and tungsten isotopes: Final results of the Solotvina experiment // *Phys. Rev. C.* - 2003. - Vol. 68. - 035501 (12 pages).
3. Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychhev V. V. et al. α activity of natural tungsten isotopes // *Phys. Rev. C.* - 2003. - Vol. 67. - 014310 (8 pages).
4. Zdesenko Yu. G., Avignone III F. T., Brudanin V. B. et al. Scintillation properties and radioactive contamination of CaWO_4 crystal scintillators // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2005. - Vol. 538. - P. 657 - 667.
5. Belli P., Bernabei R., Cappella F. et al. To be published in *Phys. Rev. C.*
6. Danevich F. A., Kobychhev V. V., Nagorny S. S. et al. ZnWO_4 crystals as detectors for 2β decay and dark matter experiments // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2005. - Vol. 544. - P. 553 - 564.
7. Zdesenko Yu. G., Avignone III F. T., Brudanin V. B. et al. CARVEL experiment with $^{48}\text{CaWO}_4$ crystal scintillators for the double β decay study of ^{48}Ca // *Astropart. Phys.* - 2005. - Vol. 23. - P. 249 - 263.
8. Angloher G., Bucci C., Christ P. et al. Limits on WIMP dark matter using scintillating CaWO_4 cryogenic detectors with active background suppression // *Astropart. Phys.* - 2005. - Vol. 23. - P. 325 - 339.
9. Георгадзе А. Ш., Кобычев В. В., Понкратенко О. А. О возможности детектирования солнечных нейтрино с помощью сцинтилляторов CdWO_4 // *Ядерна фізика та енергетика.* - 2007. - № 1 (17). - С. 151 - 158.
10. Danevich F. A., Georgadze A. Sh., Kobychhev V. V. et al. Application of PbWO_4 crystal scintillators in experiment to search for 2β decay of ^{116}Cd // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2006. - Vol. 556. - P. 259 - 265.
11. Bardelli L., Bini M., Bizzeti P. G. et al. Further study of CdWO_4 crystal scintillators as detectors for high sensitivity 2β experiments: Scintillation properties and pulse-shape discrimination // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* - 2006. - Vol. 569. - P. 743 - 753.

**РЕГУЛЬОВАНИЙ БАГАТОКАНАЛЬНИЙ ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ,
ІМІТУЮЧИХ СЦИНТИЛЯЦІЙНІ СПАЛАХИ ВОЛЬФРАМАТІВ**

В. В. Кобычев

Описується простий генератор імпульсів із часовими параметрами, близькими до параметрів сцинтиляційних спалахів вольфраматів, і з регульованими затримкою та амплітудою. Генератор дозволяє створювати до чотирьох незалежних імпульсів у роздільних каналах, їхню суму (пряму та інвертовану), а також синхроімпульси, прив'язані до переднього фронту кожного з імпульсів. Генератор призначений для налаштування складних систем накопичення даних для детекторів, побудованих на сцинтиляторах-вольфраматах.

**REGULABLE MULTICHANNEL GENERATOR OF PULSES
IMITATING SCINTILLATION FLASHES OF TUNGSTATES**

V. V. Kobychев

Simple unit for generation of pulses with time parameters similar to those of scintillation flashes of tungstates is described. Amplitudes and delay time of the pulses are regulable. The generator allows creating up to four independent pulses in the separate channels, their sum (direct or inverted) as well as trigger pulses synchronized to the leading edge of every pulse. The generator is intended for adjustment of complicate data acquisition systems for detectors based on the tungstate scintillators.

Поступила в редакцію 03.10.07,
после доработки – 29.10.07.