

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
"Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники"**

Кафедра защиты информации

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И МЕТОДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ФОТОН»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к лабораторным занятиям по дисциплине:
"Защита объектов связи от несанкционированного доступа"**

**для студентов специальности:
1-98 01 02 "Защита информации в телекоммуникациях"**

Минск 2016

Цель работы. Изучение устройства и принципа работы фотоэлектронного умножителя и получение практических навыков работы с фотоэлектронными умножителями.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Назначение и области применения фотоэлектронных умножителей

Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) представляет собой электровакуумный прибор, который преобразует электромагнитное излучение оптического диапазона в электрический сигнал с последующим его усилением. Обладая высокой чувствительностью, большой площадью чувствительной области, малой инерционностью и относительно небольшим собственным шумом, ФЭУ позволяет строить различные приборы для регистрации и анализа излучений.

Первые ФЭУ применялись в автоматике и звуковом кино. В дальнейшем ФЭУ применялись в фотометрах, предназначенных для регистрации слабых световых потоков в оптических исследованиях и астрономии. С развитием ядерной физики ФЭУ стали применяться в составе сцинтилляционных детекторов для регистрации ионизирующих излучений. ФЭУ нашли применение и на космических аппаратах благодаря своим выдающимся характеристикам и возможности работать в тяжелых условиях. На основе ФЭУ строятся приемники излучения для лазерной техники, такой как дальномеры, лидары, оптические линии передачи данных. ФЭУ применяются также в медицинских установках компьютерной томографии и рентгеновских сканерах.

Устройство ФЭУ

Корпусом ФЭУ является стеклянный баллон, внутри которого обеспечивается вакуум (рис. 1). Баллон имеет входное окно, чаще всего расположенное в верхнем торце баллона. Входное окно изготавливается из материала, который прозрачен для световых лучей рабочего диапазона ФЭУ. Это может быть электровакуумное стекло (для ФЭУ видимого диапазона), кварцевое стекло, сапфир и другие материалы (для ФЭУ, работающих в ультрафиолетовом диапазоне).

За входным окном расположен фотокатод. Чаще всего применяются полупрозрачные фотокатоды, которые формируются прямо на внутренней поверхности входного окна.

В нижней части баллона на изоляторах крепится умножитель электронов, который представляет собой набор электродов специальной формы – динодов. Возле последнего динода расположен еще один электрод – анод.

Пространство между фотокатодом и первым динодом называют катодной камерой. В ней расположены вспомогательные электроды ФЭУ – фокусирующий и ускоряющий.

Сквозь днище колбы проходят штывьки, соединенные проводниками со всеми электродами ФЭУ. Эти штывьки являются выводами ФЭУ.

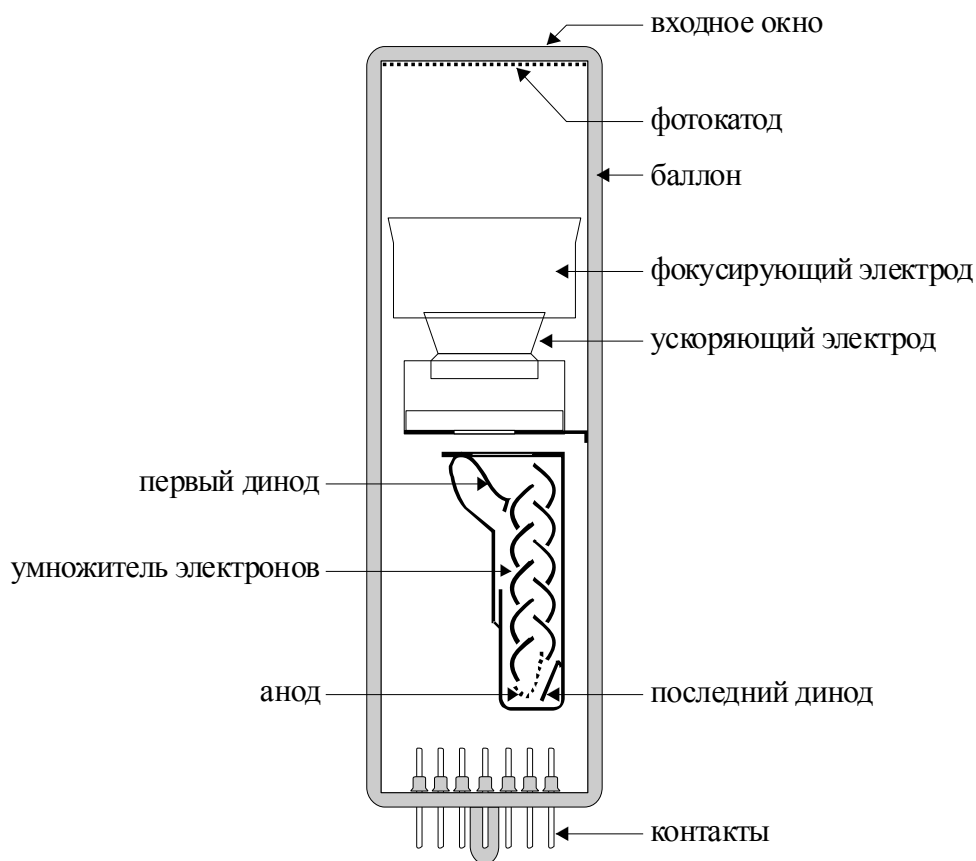


Рис. 1. Устройство ФЭУ

Принцип работы ФЭУ

В основе принципа работы ФЭУ лежат два явления: фотоэлектронная эмиссия и вторичная эмиссия электронов.

Фотокатод преобразует оптическое излучение в поток электронов за счет фотоэлектронной эмиссии. Энергия падающего на фотокатод фотона поглощается, что приводит к передаче энергии от фотона электрону материала фотокатода. Возбужденный электрон диффузирует к поверхности фотокатода. Затем он преодолевает поверхностный потенциальный барьер и переходит в вакуум.

Электронно-оптическая входная система, расположенная в катодной камере, фокусирует и ускоряет электронный поток. Задача фокусировки –

сбор электронов с фотокатода, который обычно обладает значительно большей площадью, чем первый динод. Необходимые траектории электронов определяются формой и расположением электродов ФЭУ, а также приложенными к ним напряжениями. Трудность фокусировки связана с тем, что из фотокатода вылетают электроны под разными углами и с разными скоростями.

Далее электроны попадают в электронный умножитель, состоящий из цепочки динодов, на которых происходит вторичная эмиссия электронов. Умноженные на первом диноде вторичные электроны ускоряются под действием междинодного поля и фокусируются на второй динод за счет формы динода. Этот процесс повторяется для всех динодов.

Анод собирает электронный поток с последнего динода на выходе умножителя электронов и формирует выходной сигнал. Форма анода должна обеспечивать сбор максимального количества электронов с последнего динода. Кроме того, должен быть минимизирован эффект объемного заряда для получения линейности в импульсных режимах работы, а импеданс анода должен быть согласован с импедансом выходной цепи ФЭУ. Конструктивно анод представляет собой сетку, расположенную вблизи последнего динода. Электроны, испущенные предпоследним динодом, пролетают сквозь сетку, а вторичные электроны, вылетающие с последнего динода, собираются анодом. Такая конфигурация позволяет создать большую напряженность поля между анодом и последним динодом и уменьшить эффект объемного заряда. Кроме того, последний динод образует электростатический экран для анода.

Основные параметры ФЭУ

Спектральная характеристика. Одним из важнейших параметров ФЭУ является его спектральная характеристика. Относительная спектральная характеристика фотокатода – это нормированная зависимость тока фотокатода от длины волны при постоянной мощности излучения. Обычно с длинноволновой стороны рабочий диапазон ФЭУ ограничивается спектральной чувствительностью фотокатода, а с коротковолновой стороны – границей пропускания входного окна. На рис. 2 приведены графики спектральной чувствительности для разных типов фотокатодов, предназначенных для работы в различных областях спектра. Тип спектральной характеристики и абсолютное значение спектральной чувствительности фотокатода на определенной длине волны указывается в паспорте ФЭУ.

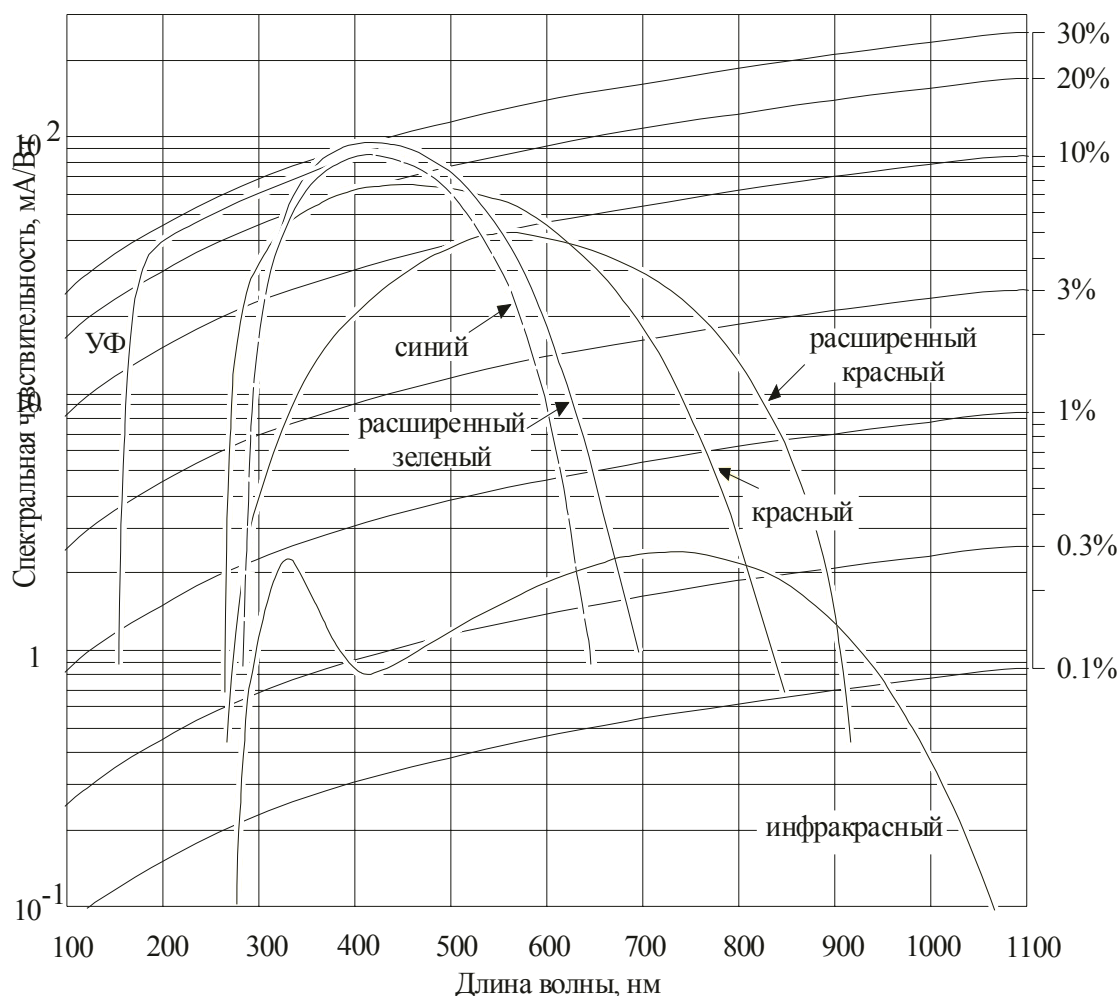


Рис. 2. Спектральная чувствительность фотокатодов для разных типов спектральной характеристики

Квантовый выход фотокатода. Квантовый выход фотокатода – это безразмерная величина, численно равная отношению количества испущенных катодом электронов к количеству поглощенных квантов света. Квантовая эффективность зависит от длины волны падающего света. В длинноволновой области до некоторого порогового значения, которое называется красной границей фотоэффекта, эта величина равна нулю. При уменьшении длины волны падающего света она быстро возрастает, достигая максимума в рабочем диапазоне длин волн. Типичным значением квантового выхода для распространенных фотокатодов в рабочем диапазоне длин волн является величина 10–20%.

Спектральная чувствительность фотокатода. Иногда вместо количества квантов света, поглощенных фотокатодом, используют их энергию. В результате получается спектральная чувствительность фотокатода, которая представляет собой отношение тока фотокатода к мощности падающего монохроматического излучения и выражается в единицах А/Вт.

Интегральная чувствительность фотокатода. Для характеристики чувствительности фотокатода без учета спектральной зависимости используют интегральную чувствительность фотокатода, которая представляет собой отношение тока фотокатода к световому потоку от стандартного источника типа А и выражается в единицах А/лм.

Анодная чувствительность. Анодной чувствительностью называют ток анода ФЭУ при освещении фотокатода известным световым потоком от стандартного источника типа А. Обычно приводятся данные анодной чувствительности для нескольких значений напряжения питания ФЭУ. Измеряется анодная чувствительность в единицах А/лм.

Коэффициент усиления ФЭУ. Коэффициент усиления ФЭУ представляет собой отношение анодной чувствительности к чувствительности фотокатода. Данный параметр характеризует фактически коэффициент умножения электронов диодной системой. Этот параметр зависит от количества диодов, их материала, конструкции, напряжения между диодами.

Темновой ток. Темновой ток – это ток, протекающий в цепи анода затемненного ФЭУ. Причиной темнового тока является термоэлектронная эмиссия фотокатода и первых диодов, автоэлектронная эмиссия электродов и ток утечки. Темновой ток зависит от напряжения питания ФЭУ, причем при низких напряжениях преобладает ток утечки, в области рабочих напряжений – термоэлектронная эмиссия катода, а при повышенных напряжениях – автоэлектронная эмиссия. Постоянный темновой ток нетрудно измерить и учесть. Но кроме постоянной составляющей темновой ток содержит шумовую составляющую, которая ухудшает отношение сигнал/шум на выходе ФЭУ.

Линейность световой характеристики ФЭУ. Световая характеристика ФЭУ – это зависимость анодного тока от светового потока. Предел линейности световой характеристики – это наибольшее значение анодного тока, когда отклонение от прямой пропорциональности зависимости анодного тока от светового потока не превышает заданной величины. Обычно при превышении анодным током какой-то величины его рост замедляется. Вызвано это в основном действием объемного заряда: при большой освещенности количество электронов, находящихся одновременно между последними диодами, так велико, что их электрическое поле препятствует нормальному ускорению последующих электронов. Следовательно, коэффициент усиления ФЭУ уменьшается. Величина эффекта может быть снижена, если увеличить напряжение между последними диодами ФЭУ.

Неравномерность чувствительности по фотокатоду. Освещая отдельные точки фотокатода узким световым пучком, можно получить зависимость чувствительности ФЭУ от координаты фотокатода. Такая зависимость появляется как в результате неравномерности чувствительности фотокатода, так и из-за особенностей сбора электронов диодной системой. Количественно неравномерность характеризуется отношением отклонения сигнала на выходе ФЭУ к среднему значению сигнала.

Форма одноэлектронного импульса. Каждый первичный фотоэлектрон инициирует процесс умножения электронов, в результате на выходе ФЭУ появляется импульс тока. Длительность этого импульса не может быть бесконечно короткой, так как существует разброс времени пролета электронов и другие факторы. Обычно длительность одноэлектронного импульса составляет порядка 1 – 10 нс. Ожидаемая форма одноэлектронного импульса на выходе ФЭУ показана на рис. 3.

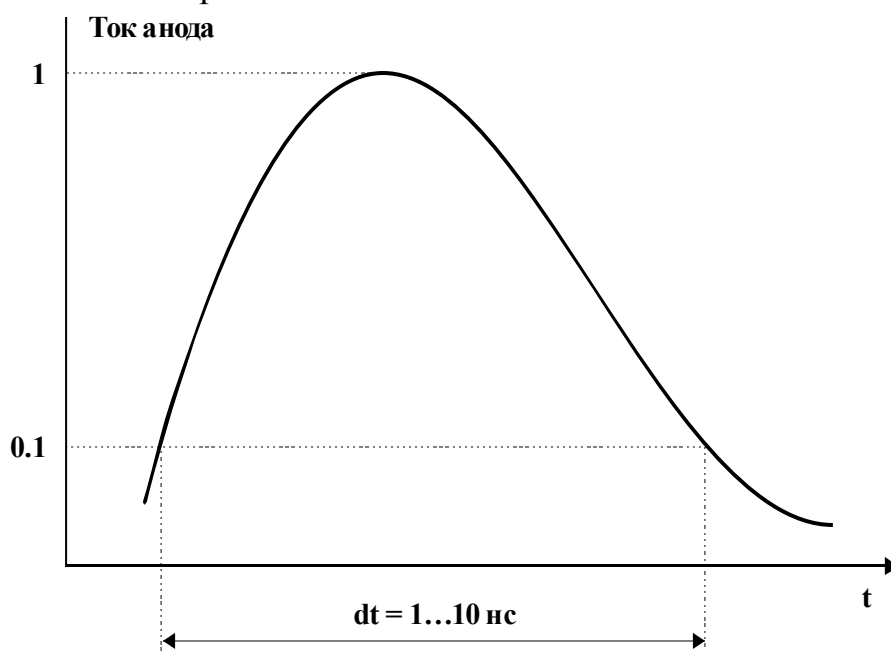


Рис. 3. Ожидаемая форма одноэлектронного импульса

Амплитудное распределение выходных импульсов. На выходе ФЭУ кроме полезных импульсов присутствуют и шумовые, составляющие темновой ток ФЭУ. Причины появления шумовых импульсов могут быть разные: термоэлектронная эмиссия фотокатода, автоэлектронная и термоэлектронная эмиссия диодов, действие космического излучения. Большинство таких первичных электронов появляется в случайной точке тракта, поэтому они проходят неполный процесс умножения, и на выходе ФЭУ появляется импульс малой амплитуды. Исключение составляет термоэмиссия из фотокатода, когда электроны пройдут полный процесс умножения и дадут на выходе

импульсы, неотличимые от полезных. Пример амплитудного распределения импульсов на выходе ФЭУ показан на рис. 4.

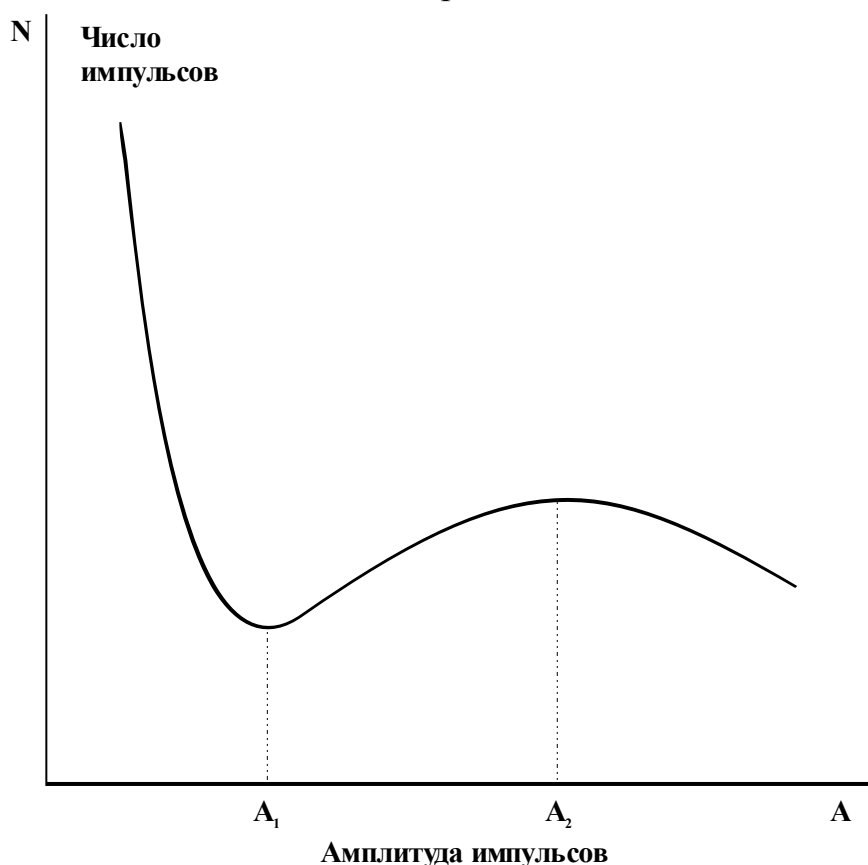


Рис. 4. График амплитудного распределения импульсов на выходе ФЭУ

В области малых амплитуд наблюдается большое количество импульсов. Эти импульсы вызваны темновым током ФЭУ. Затем количество импульсов падает, при амплитуде A_1 наблюдается минимум. Далее видно амплитудное распределение полезных импульсов с максимумом при амплитуде A_2 . Если ФЭУ используется в режиме счета фотонов, то амплитуда полезных импульсов A_2 мало отличается от амплитуды шумовых импульсов. Для реальных ФЭУ в таком случае провал на счетной характеристике между шумовыми и полезными импульсами может отсутствовать или быть не так ярко выраженным. Такие ФЭУ не подходят для работы в режиме счета фотонов.

Счетная характеристика ФЭУ. Зависимость частоты импульсов от напряжения питания называется счетной характеристикой ФЭУ. Счетная характеристика снимается при фиксированном уровне дискриминации, но при изменяющемся напряжении питания ФЭУ. Пример счетной характеристики ФЭУ приведен на рис. 5.

На счетной характеристике видны три характерных области. В области «А» усиление недостаточно для регистрации каждого фотоэлектрона; в области «В» наблюдается плато счетной характеристики, когда регистрируется

каждый электрон, вылетевший с фотокатода; в области «С» наблюдается быстрый рост количества импульсов из-за побочных процессов. Для реальных ФЭУ плато счетной характеристики (области «В») может отсутствовать, так как побочные процессы могут начать развиваться раньше, чем будет достигнуто необходимое усиление для регистрации одноэлектронных импульсов. Такие ФЭУ не подходят для работы в режиме счета фотонов.

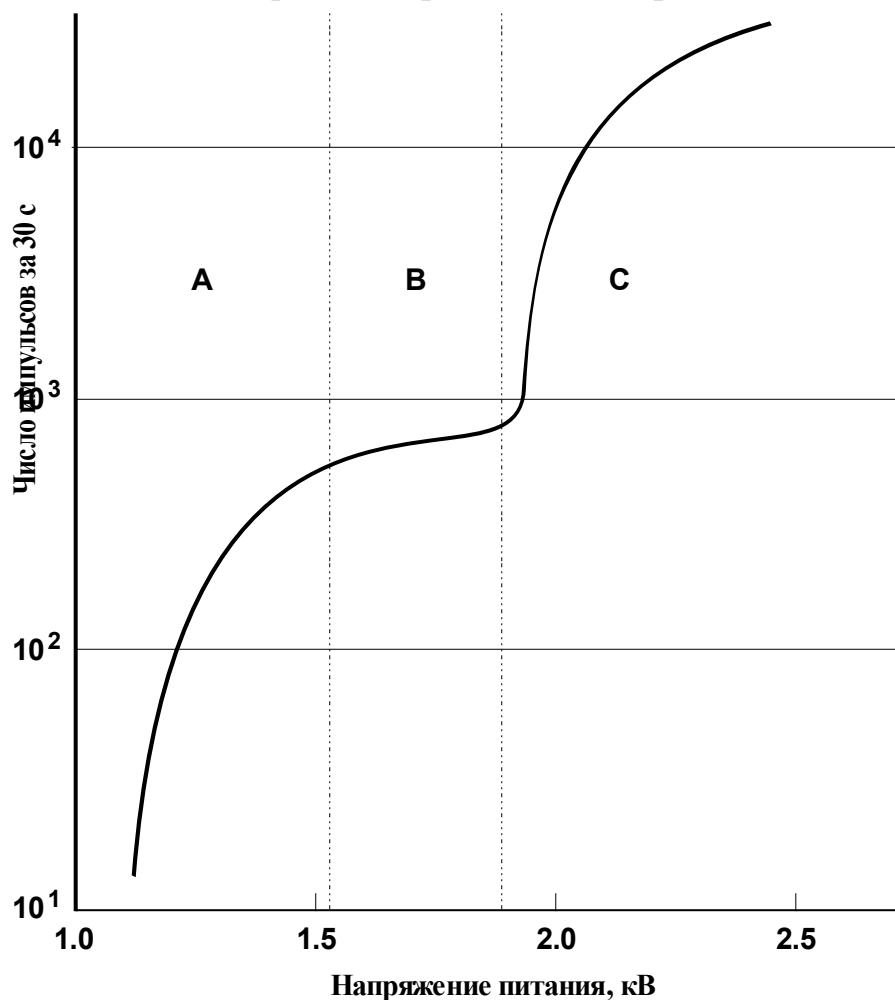


Рис. 5. Счетная характеристика ФЭУ

Основные методы использования ФЭУ

Для нормальной работы ФЭУ на его электроды должны быть поданы необходимые напряжения. Обычно распределение потенциалов между электродами осуществляется с помощью делителя напряжения, состоящего из цепочки постоянных резисторов, подключенного к источнику высокого напряжения. Рекомендуемая для конкретного ФЭУ схема делителя приводится в паспорте на него. Для обеспечения работы ФЭУ в линейном режиме ток через делитель должен быть как минимум в 10 раз больше максимального тока анода. Излишнее увеличение тока делителя нежелательно, так как делитель может вызвать нагрев ФЭУ, что приведет к увеличению темнового тока.

При работе ФЭУ в импульсном режиме токи последних динодов могут достигать значительных величин. Чтобы избежать нарушения линейности, последние звенья делителя шунтируют емкостями.

Возможны два способа питания ФЭУ: в одном случае заземляется катод, в другом – анод. На практике чаще применяют питание с заземленным анодом, а на катод подают отрицательное напряжение. При таком включении упрощается съем выходного сигнала, так как анод находится на потенциале земли.

Поскольку выходной сигнал ФЭУ очень сильно зависит от напряжения питания, к источнику питания ФЭУ предъявляются очень жесткие требования. Чтобы обеспечить постоянство сигнала на выходе ФЭУ с точностью 1%, колебания напряжения питания не должны превышать 0,05...0,1%. Коэффициент пульсаций не должен превышать 0,001%.

Выходной сигнал обычно снимается с нагрузки, включенной в цепь анода ФЭУ, и имеет отрицательную полярность. Постоянная времени анодной цепи выбирается исходя из характера выходного сигнала ФЭУ. Если длительность импульса намного меньше постоянной времени этой цепи, то амплитуда будет пропорциональна заряду, собираемому на аноде. Преобразование тока в напряжение может производиться с помощью нагрузочного резистора ФЭУ. Напряжение, снимаемое с этого резистора, дальше может быть усилено с помощью ОУ. Довольно часто применяются также активные преобразователи тока в напряжение, построенные на ОУ.

Методы регистрации слабых оптических сигналов

Регистрация электрических импульсов на аноде ФЭУ может осуществляться либо путем их усреднения по времени (метод токового измерения), либо путем счета отдельных импульсов (метод счета фотонов).

Метод счета фотонов используется в области предельно слабых световых потоков. Порог дискриминатора можно установить так, чтобы отсеять большинство шумовых импульсов, практически не потеряв полезных. У лучших ФЭУ, предназначенных для работы в счетном режиме, скорость счета темновых импульсов составляет единицы в секунду. Следовательно, минимальный регистрируемый поток излучения составляет около 10 фотонов в секунду.

Основной недостаток метода счета фотонов – малый динамический диапазон измеряемых сигналов. Измерительный тракт имеет мертвое время, поэтому при повышении частоты случайных по времени импульсов возрастает вероятность того, что два импульса будут обработаны, как один. Напри-

мер, если мертвое время составляет 10 нс, то при средней частоте поступления импульсов 10 МГц вероятность совпадения пары импульсов составляет примерно 0.03. Это является причиной нелинейности счета в области больших загрузок. В результате динамический диапазон для счетного режима составляет примерно 6 порядков.

Токовый режим используется наиболее часто. В этом режиме все поступающие импульсы интегрируются, том числе и темновые. Измеряется суммарный заряд, перенесенный с динодов на анод. Ограничения сверху на частоту поступающих импульсов здесь не возникает. Как и в случае счета фотонов, темновой ток здесь тоже вносит погрешность. Среднюю величину темнового тока можно учесть, но его шум остается. Он и ограничивает снизу динамический диапазон в этом режиме. Динамический диапазон сверху ограничен нелинейностью световой характеристики ФЭУ, связанной с влиянием объемного заряда в пространстве между динодами. Тем не менее, динамический диапазон измеряемых сигналов в токовом режиме может составлять 9–12 порядков.

При любом методе регистрации расширение динамического диапазона возможно путем охлаждения фотокатода ФЭУ. Это уменьшает количество темновых импульсов большой амплитуды и в результате уменьшает темновой ток в несколько раз.

Описание аппаратно-программного комплекса «Фотон»

Аппаратно-программный комплекс (АПК) «Фотон» состоит из измерительной части, которая конструктивно расположена в корпусе панели ФЭУ, высоковольтного источника питания и управляющего программного обеспечения. Блок-схема измерительной части комплекса «Фотон» показана на рис. 6.

С анода ФЭУ сигнал поступает на преобразователь ток-напряжение, выполненный на ОУ 1. С выхода этого ОУ сигнал поступает на драйвер АЦП 2, который преобразует сигнал в дифференциальный. Далее сигнал поступает на АЦП 3, где он преобразуется в цифровую форму. Цифровой поток с выхода АЦП поступает на ПЛИС 4, где производится обработка сигнала в цифровом виде и его запоминание.

С выхода ОУ 1 сигнал дополнительно поступает на вход компаратора 5, который используется в счетном режиме. Счет выходных импульсов компаратора осуществляется внутри ПЛИС. Порог компаратора задается с помощью ЦАП 6, который загружается с помощью ПЛИС.

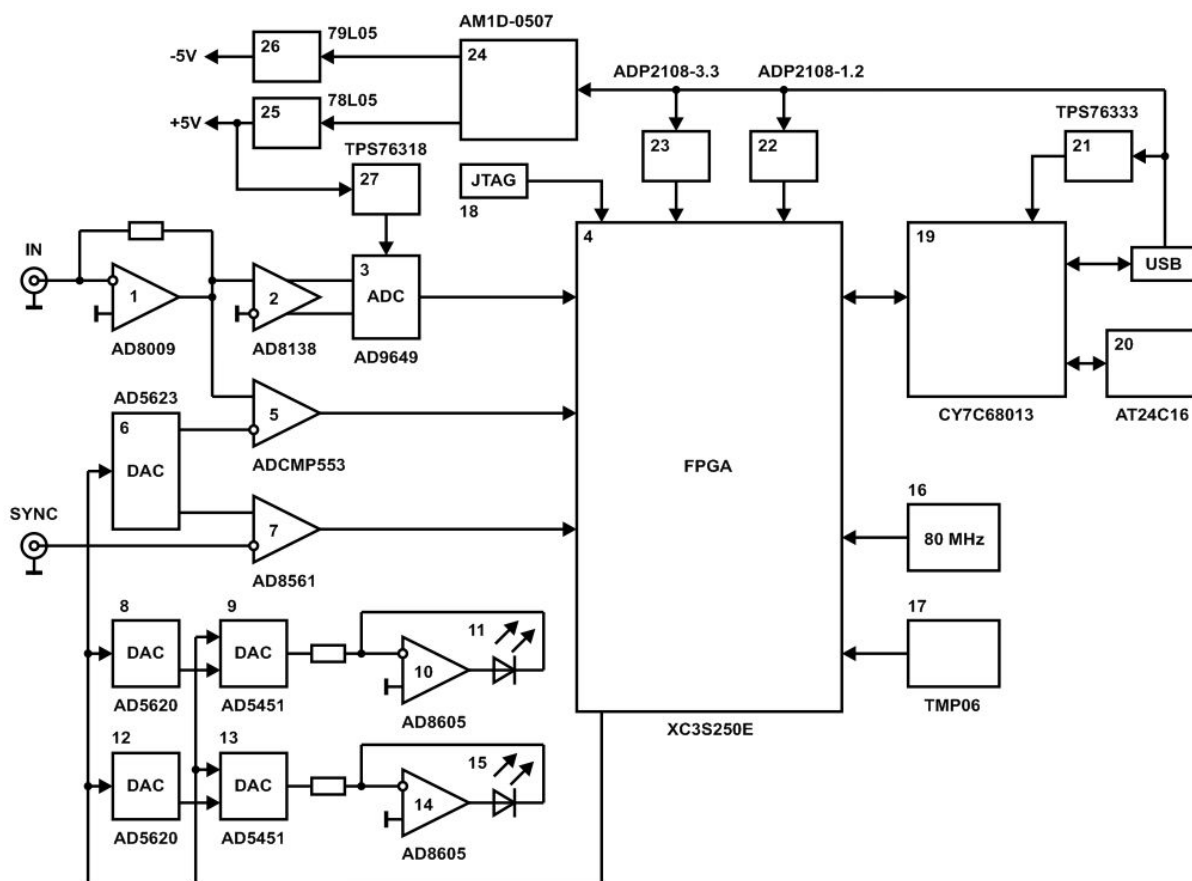


Рис. 6. Блок-схема измерительной части комплекса «Фотон»

Разъем синхронизации «SYNC» служит для подключения внешнего сигнала запуска измерения и обеспечит временную привязку интервала измерения счетчика фотонов или АЦП к внешнему стартовому импульсу. Запуск может осуществляться как по фронту, так и по спаду импульса запуска, обрабатываемого компаратором 7. Порог компаратора 7 задается с помощью второго канала ЦАП 6. При программном запуске измерения на разъеме «SYNC» можно разрешить формирование выходного импульса синхронизации программируемой полярности, вырабатываемого с помощью ПЛИС. В этом случае блок регистрации является источником сигнала запуска измерения, который может быть использован для синхронизации ведомых приборов или процессов.

АПК «Фотон» содержит два эталонных источника света в виде светодиодов 11 и 15. Для питания светодиодов служат усилители 10 и 14, рабочий ток светодиодов задается с помощью ЦАП. Для получения большого динамического диапазона регулировки тока используется каскадирование двух ЦАП: 8 и 9 для светодиода 11, а также 12 и 13 для светодиода 15. Загрузка ЦАП производится с помощью ПЛИС.

Для измерения температуры окружающей среды к ПЛИС подключена микросхема цифрового термометра 17. Имеется возможность подключения второй микросхемы термометра для измерения температуры ФЭУ.

Для связи с компьютером используется интерфейс USB. Обработку данных, поступающих по этому интерфейсу, производит специализированный контроллер 19, программное обеспечение которого хранится в микросхеме памяти 20. Для дальнейшей обработки данные поступают в ПЛИС.

Питание всех узлов измерительной части АПК «Фотон» осуществляется от порта USB компьютера. Микросхема контроллера USB питается через линейный стабилизатор 21 и всегда находится в активном режиме. Остальные узлы могут отключаться для снижения энергопотребления. Питание ПЛИС осуществляется с помощью двух ключевых стабилизаторов напряжения 22 и 23. Для питания аналоговой части используется изолированный преобразователь 24, который обеспечивает двухполярное напряжение ± 7 В. С помощью линейных стабилизаторов 25 и 26 из этого напряжения формируется напряжение питания аналоговой части ± 5 В. Для питания микросхемы АЦП используется отдельный стабилизатор 27.

Тактирование ПЛИС осуществляется от кварцевого генератора 16. Загрузка конфигурации ПЛИС осуществляется по интерфейсу USB, но при отладке устройства может производиться и через разъем JTAG 18. В лабораторной работе для тактирования используется генератор импульсов PG-872.

Высоковольтный источник питания представляет собой отдельный блок. Его питание осуществляется от сети 220 В. Управление источником производит компьютер через гальванически развязанный интерфейс RS-232. В лабораторной работе используется высоковольтный блок питания LH254.





Для управления измерительной частью и высоковольтным источником питания служит специализированное ПО, работающее на компьютере. Оно позволяет устанавливать режимы работы всех узлов комплекса, получать измеренные значения и визуализировать полученные данные на экране монитора.



2. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

1. Собрать схему для проведения измерений (рисунок 7).
2. Согласовать правильность сбора схемы с преподавателем.
3. Запустить приложение Foton.exe.
4. Создать новый файл с помощью запущенного приложения.

5. В окнах «Усреднение» Δt : и «Строб» dT, mks : задать значение «1».

6. Запустить генератор импульсов PG-872 и блок питания высоковольтный LH254.

7. Запустить измерения, нажав на пиктограмму , убедившись перед этим в том, что опции «Цикл», «Внешний запуск» и «Запуск по фронту» являются активными   .

8. Выполнить масштабирование полученного графика, нажав на пиктограммы , .

9. Увеличивая значения усреднения и длительности строба, подобрать оптимальное их соотношение, при котором возможно выполнить счет фотонов на полученном графике.

10. Закрывать приложение Foton.exe.

11. Отключить вход А фотоэлектронного умножителя от генератора импульсов PG-872.

12. Повторить шаги 3–8.

8. Увеличивая значения усреднения и длительности строба, подобрать оптимальное их соотношение, при котором возможно выполнить счет фотонов в темновом режиме.

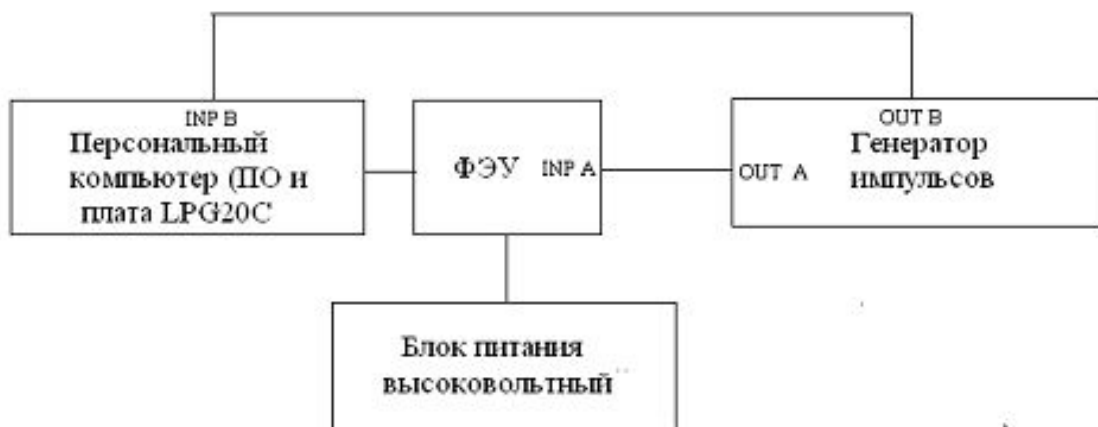


Рисунок 7 – Схема проведения измерений

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Схема для проведения измерений.
3. Установленные оптимальные значения усреднения и длительности стробов, необходимые для выполнения измерений.
4. Полученные значения количества фотонов, полученные в счетном и темновом режимах.

5. Выводы по работе.
6. Ответы на контрольные вопросы.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие явления лежат в основе принципа работы ФЭУ? Пояснить суть явлений.
2. Что представляют собой ФЭУ?
3. Какими основными параметрами характеризуются ФЭУ?
4. Какие компоненты включает в себя АПК «Фотон»?
5. Какое максимальное выходное напряжение может быть установлено на высоковольтном блоке питания АПК «Фотон»?
6. Какие существуют методы регистрации слабых оптических сигналов?
7. Каковы возможные способы питания ФЭУ?

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Детектирование световых импульсов в режиме счета фотонов. Ученые записки Казанского государственного университета. 2006. Том 148, кн. 1. С. 135–141.
2. Toshikazu Nakamata. Photomultiplier tubes. Basics and Applications. Third Edition. Hamamatsu Photonics K.K., Japan, 2006.
3. Hamamatsu technical information. PHOTON COUNTING. Using Photomultiplier Tubes. Hamamatsu Photonics K.K., Japan, 2001.
4. Understanding photomultipliers. ET Enterprises Limited. United Kingdom. 2008.