

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И СЦИНТИЛЛЯТОРОВ

Ю.С. Павлов, Доброхотов В.В., Климашин В.П. Непомнящий О.Н.

На линейном ускорителе электронов УЭЛВ-10-10-Т-1 разработана спектрофотометрическая установка с временным разрешением 6,5 пс. На рис. 1 представлена функциональная схема установки изучения флуоресцирующих веществ и сцинтилляторов.

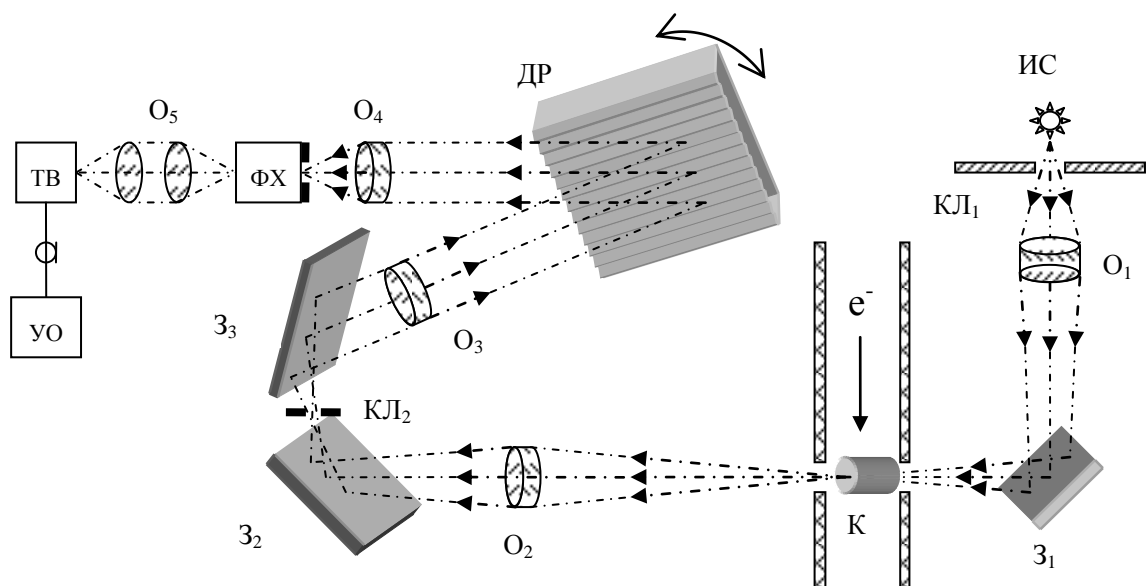


Рис. 1. Функциональная схема спектрофотометрической установки. ФХ – фотохронограф; УО – устройство обработки изображения; КЛ₁ ÷ КЛ₂ – коллиматоры; З₁ ÷ З₃ – юстировочные зеркала; К – исследуемый образец; ДР – дифракционная решетка; ИС – источник света; О₁ ÷ О₅ – объективы; ТВ – телевизионная камера.

Ускоритель генерирует пучок электронов с энергией 9 МэВ и током 150 А в импульсе длительностью менее 50 пс. Пучок электронов пикосекундной длительности направляется на экспериментальный объект, установленный в спектральном блоке СБ. Прошедший через объект зондирующий свет направляется оптической системой на дифракционную решетку, а затем в виде участка спектра " $\Delta\lambda$ " проецируется на фотокатод

ЭОП фотохронографа "Агат-СФ". Изображение развертки ЭОП считывается ТВ-камерой и поступает в устройство обработки изображения УС. УС включает в себя блок канала, монитор и модуль сопряжения с компьютером. Управление измерительной установкой осуществляется дистанционно с помощью пульта управления с блоком автоматики и отдельного пульта телевизионной установки.

Установка выполнена по одноканальной схеме. Коррекция искажений в измерительном тракте осуществляется при предварительном холостом запуске установки перед началом работы. Направления разверток в ЭОП и ТВ-камере коллинеарны, что дает возможность в пределах развертки непрерывно фиксировать кинетику каждой спектральной компоненты зондирующего излучения с разрешением ~ 7 пс. Спектральный блок установки с механизмом привода дифракционной решетки конструктивно объединен с камерой "Агат-СФ" и обеспечивает работу в диапазоне длин волн 300-1200 нм посредством двух сменных решеток с $N = 600$ штрихов/мм. Привод поворота дифракционной решетки выполнен на базе редуктора РД-09. Источником света является ксеноновая лампа с длиной разрядного канала 35 мм и диаметром ~ 3 мм. Основные характеристики узлов спектрофотометрической установки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики узлов спектрофотометрической установки.

Оптический спектральный блок

- спектральное разрешение прибора – не хуже 5 нм;
- одновременно регистрируемый участок спектра – 100 нм.
- увеличение $\beta = 1^x$; относительное отверстие $\sim 1 : 6$;
- ширина входной спектральной щели $0,2 \pm 0,03$ мм;
- диспергирующий элемент – дифракционная решетка $N = 600$ штр / мм, $\gamma = 7^0$ для области 300-840 нм и $\gamma = 14^0$ для области 840-1200 нм;
- оптика – двухкомпонентная кварцевая;
- диаметр конденсора: 1-ый компонент – 22 мм, 2-й компонент – 20 мм;
- диаметр объективов 18 мм;
- ширина щели 4 мм, высота $0,8 \pm 0,9$ мм;
- обратная линейная дисперсия - 30 нм/мм

Электроннооптический фотохронограф

- диапазон временных разверток - $(0,25-0,50-1,0) \pm 30\%$ нс/мм;
- временное разрешение по диапазонам развертки – (3,4-6,7-12) пс;
- неравномерность хода развертки – 25%;
- пространственное разрешение – 5 лин/мм;
- электроннооптическое увеличение - $2 \pm 0,2$ %;
- размер рабочего поля фотокатода – 4 x 4 мм;
- размер экрана – $\varnothing 34$ мм;
- неравномерность коэффициента преобразования – 60%;
- чувствительность пластин: затвор – 0,04 мм/В, развертка – 0,03 мм/В;
- напряжение полного запираания электронного луча – 0,3 кВ;
- задержка запуска для диапазонов 0,25 и 0,5 нс/мм – 30 нс; для 1,0 нс/мм – 20 нс;
- импульс запуска: длительность фронта менее 1 нс, амплитуда 30 ± 50 В.

ТВ-регистратор

- минимальная освещенность фотокатода – $5 \cdot 10^{-4}$ лк;
- разрешающая способность в центре поля – 200 линий;
- размер изображения 24 x 32 мм;
- отношение сигнал/шум – 20;
- неравномерность тока сигнала – не более 23 %;
- полоса видеусилителя – 7,3 %;
- стандарт разложения – 50 полукадров в сек (625 строк).

Спектральный блок установки выполнен по схеме для работы в первом порядке дифракции. Изображение источника света строится в середине исследуемого объекта. Диаметр каустики (перетяжки пучка) составляет 7 мм. Эффективное сечение электронного пучка в месте установки кюветы 20 мм. Пролетная часть спектрального блока представляет собой коридор со свинцовыми экранами толщиной 6 мм для исключения затемнения кварцевой оптики.

Электронные импульсы пикосекундной длительности, попадая в объект, вызывают изменение поглощения зондирующего света. Регистрирующая часть установки выполнена на основе скоростного фотохронографа "Агат-СФ", содержащего электроннооптический преобразователь с широкополосной системой отклонения проходного типа. Временная схема работы спектрофотометрической установки на рис 2.

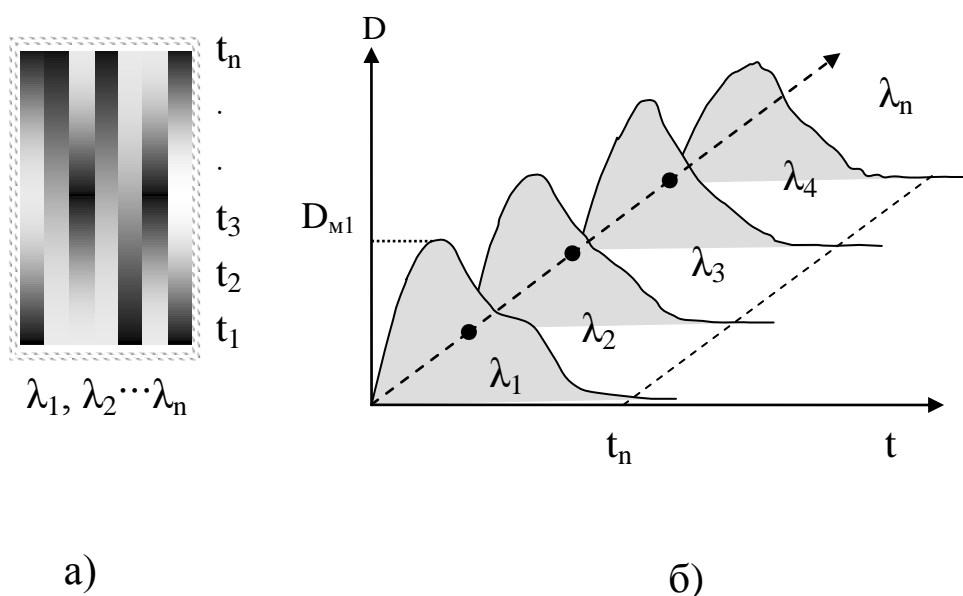


Рис. 2. Временная схема работы спектрофотометрической установки. а – фотохронограммы световых сигналов из исследуемого объекта; б – денситограммы обработанных исследуемых сигналов.

Регистрограмма, полученная на экране времяанализирующего ЭОП, обрабатывается посредством телевизионной камеры на базе ТВ-трубки с высокой разрешающей способностью - изокон типа ЛИ-801.

Спектральный диапазон работы установки 300-1200 нм при одновременно регистрируемом участке спектра 120 нм и спектральном разрешении 6 нм. Временное разрешение установки не более 7 пс.

Габариты блока (380x215x160) мм. Относительное отверстие 1:3,5. Для измерения спектрального разрешения установки (в пределах возможностей ЭОП "Агат-СФ") в спектральном блоке предусмотрены сменные камерные объективы, позволяющие повысить спектральное разрешение до 3-4 нм.

Источник света. Для определения пороговых значений плотности мощности входного излучения и оценки динамики при пикосекундном временном разрешении использовался источник излучения - светодиод типа АЛ, управляемый простыми средствами, как по мощности, так и по длительности вспышки. Этот источник излучает световой поток в относительно узком интервале длин волн, что упрощает энергетические расчеты, и легко управляется по питанию от генератора электрических сигналов.

Исследования светодиода показали, что если использовать ударный режим накачки р-п перехода указанного светодиода, то при определенных напряжениях на переходе передний фронт светового импульса почти не отличается от переднего фронта электрического сигнала. Например, при прямоугольном импульсе с генератора Г5-56 длительностью 100 нс и передним фронтом 2-5 нс, фронт светового импульса затянута не более чем на 30-40%. Такой режим работы светодиода вполне может быть применен в некоторых случаях (при больших временах развертки ЭОП) для экспериментов с фотохронографом "АГАТ-СФ". Блок импульсного питания предназначен для формирования световой вспышки с плоской вершиной длительностью ~ 2-3 мкс.

Расчет спектрального блока. Разрешающая способность фотохронографа "Агат-СФ 3" составляет ~ 5 лин/нм и размер рабочего поля фотокатода (4 x 4) мм². Таким образом "информационная емкость" прибора по входу составляет $M = 20$ линий. Принимая за разрешенный интервал длин волн величину $\Delta\lambda = 5\div 6$ нм, получаем величину одновременно регистрируемого участка спектра $100\div 120$ нм. Учитывая невысокие требования к спектральному разрешению прибора, применяем дифракционные решетки $N = 600$ штр / мм с углами блеска $\sim 7^\circ$ и $\sim 14^\circ$ для областей спектра $300\div 840$ нм и $840\div 1200$ нм соответственно. Дифракционные решетки используются в 1-ом порядке дифракции при угловой дисперсии $d\varphi / d\lambda = 6,4 \cdot 10^{-4}$ рад/нм. Одновременно с этим возможно использование относительно короткофокусной оптики, что позволяет повысить светосилу прибора и сократить габариты спектрального блока. Фокусное расстояние камерного объектива спектрального блока определяется из формулы связи линейной и угловой дисперсии:

$$f_1 = \frac{dl}{d\lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\varphi} = 52 \text{ мм.} \quad (\text{Ошибка! Текст}$$

указанного стиля в документе отсутствует..1)

Для сохранения светосилы спектрального блока диаметры камерного и коллиматорного объективов должны быть не менее $f_l / 3\div 5$, что составляет $18\div 10$ мм. При этом разрешающая способность объективов оценивалась величиной $25\div 28$ лин/нм. Конденсор спектрального блока выполнен из двух частей, с фокусировкой изображения светящегося тела источника в месте установки кюветы с исследуемым раствором. Первая часть конденсора, обращенная к источнику света, имеет диаметр 22 мм. Запуск всех систем установки осуществляется от компьютера, соединенного с блоком синхронизации. Внешний вид спектрофотометрической установки показан на рис. 3.

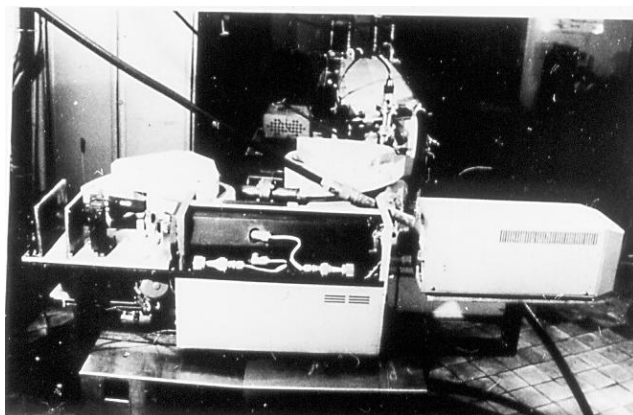


Рис. 3. Внешний вид спектрофотометрической установки.

Фотохронограф. Создание спектрофотометрической установки с пикосекундным разрешением изначально базировалось на использовании высокоскоростной электроннооптической камеры типа "АГАТ-СФ", разработанной для целей исследования быстропротекающих самосветящихся оптических процессов. Конструктивные особенности камеры таковы, что она не осуществляет спектральное преобразование входного излучения, а регистрирует только амплитудные вариации интегрального светового потока, поступающего на временную щель прибора. В результате временной развертки электронного пучка на люминесцентном экране электроннооптического преобразователя возникает регистрограмма исследуемого процесса. Регистрограмма фиксируется на фотопленку типа РФ-3 контактными способами через волоконно-оптический диск.

Фотохронограф "АГАТ-СФ" по скоростным характеристикам (минимальная развертка составляет 0,25 нс/см) при оптимизации его параметров и доработки может обеспечить временное разрешение $\sim 7 - 8$ пс и позволить исследовать одновременно спектральный диапазон длин волн до 100 нм с разрешением порядка 6 - 8 нм, что вполне удовлетворительно в нашем случае.

Однако с увеличением скоростей разверток процесса падает энергетическая характеристика прибора. На элемент разрешения приходится меньшее число электронов, бомбардирующих люминофор экрана ЭОП. Стремление поднять усиление регистрирующей камеры приводит к увеличению фоновых сигналов, к снижению отношения сигнал/шум и к уменьшению динамического диапазона аппаратуры, что накладывает серьезные ограничения на точностные характеристики установки импульсного радиолиза. Так, например, у ЭОП с многокамерными усилителями яркости типа УМИ-92 при достижении временного разрешения порядка 300-500 пс динамический диапазон падает до 200÷250.

Переход же в область времен единиц пикосекунд влечет еще больший спад указанного динамического диапазона и требует поиска очень чувствительных детекторов для снятия и обработки сигналов с экрана ЭОП.

Противоречивость требований, подлежащих удовлетворению в той или иной степени при разработке скоростных систем регистрации, вызывает необходимость детальных проверок характеристик всех функциональных звеньев измерительного тракта системы с целью оптимизации параметров и нахождения допустимых границ компромисса между быстротой и возможностью зафиксировать быстропротекающий процесс как таковой.

Исследование динамического диапазона электроннооптической камеры в пикосекундном режиме. Динамический диапазон камеры "Агат СФЗ" зависит от числа каскадов усиления, их конструкции и технологии изготовления, что прямо или косвенно влияет на уровень фоновых помех (темновой шум). Усилитель яркости в камере выполнен на микроканальной пластине, запитываемой в момент развертки импульсом напряжения. Микроканальная пластина обладает повышенными шумовыми характеристиками и является основным ограничителем динамического диапазона не только в режиме развертки процесса, но и при статическом переносе изображения с фотокатода на экран ЭОП. Собственный шум ЭОП

составляет $\sim 0,05$ В при отсутствии сигнала на входе. Динамический диапазон фотохронографа определялся как отношение:

$$D = U_{\text{мин.}} / U_{\text{макс.}}$$

где $U_{\text{мин.}}$ – минимальный сигнал с фотоэлектронного умножителя, находящийся в заданном отношении к шуму, например, сигнал/шум = 4÷5; $U_{\text{макс.}}$ – максимальный сигнал с фотоэлектронного умножителя, расположенный на линейном участке световой характеристики ЭОП.

В свою очередь линейность световой характеристики ЭОП постоянно на всем диапазоне контролировалась на входе и выходе по отношениям величин последующих сигналов к предыдущим:

$$\Delta d_i = \frac{U_{i+1}}{U_i}.$$

Мерой линейности световой характеристики служит равенство этих отношений $\Delta d_i \text{ возд} \approx \Delta d_i \text{ отклик}$. Исходя из полученных экспериментальных данных, при соотношении сигнал/шум = 4÷5, динамический диапазон в статическом режиме составляет 45-50 единиц. При исследовании камеры в режиме развертки динамический диапазон определяется в 10 единиц. Эти данные позволяют использовать ТВ-камеры в качестве устройства автоматической обработки изображения с экрана ЭОП.

Исследование основных параметров и динамического диапазона регистратора в импульсных режимах засветки. Телевизионная камера КТП-62 используется для регистрации оптических процессов при низких уровнях освещенности порядка $5 \cdot 10^{-4}$ лк при разрешающей способности в центре раstra 150÷200 линий.

Методика измерений неравномерности сигнала по полю телевизионного раstra состояла в последовательности выделения строк одного из полукадров с помощью осциллографа и измерения величин сигналов, полученных от черно-белых перепадов изображений штрихов миры. Результаты измерений заносились в таблицу, на основании которой строились графики амплитуд сигналов и их распределение по мишени в виде линий равной чувствительности – изолиний. Измеренная неравномерность сигнала по полю не превышает 20÷25 % .

Изучение полученных осциллограмм показало, что нарастание сигнала из-за инерционности фотоэффекта для изокона составляет $22 \div 25$ мс, т.е. потенциальный рельеф образуется и стабилизируется примерно за время одного полукадра в течение 20 мс. Второй полукадр используется для считывания потенциального рельефа полного профиля.

Исследование динамического диапазона проводилось с помощью светофильтра ПС-5 путем изменения действующего отверстия апертурной диафрагмы объектива. Процесс измерения заключался в попеременном снятии отсчетов сигналов при наличии фильтра перед камерой и без фильтра. Из сопоставления серии экспериментальных графиков стало очевидным, что только при строго определенной заданной комбинации потенциалов на электродах трубки возможно получение линейности световой характеристики. В этом заданном режиме и оценивался динамический диапазон камеры как отношение амплитуды максимального сигнала к шуму. Причем под шумом понимается разброс амплитуды выходного сигнала при неизменных режимах импульсной засветки на одной из выбранных строк.

Как показали осциллографические измерения вероятность появления шумовых сигналов большой амплитуды $35 \div 45$ мВ мала и не превышает $5 \div 6$ %. Наибольший вклад (с вероятностью более 50 %) вносят шумовые сигналы с амплитудой до 30 мВ. При этом динамический диапазон видеотракта составляет $25 \div 28$ единиц.

Таким образом, изучено и обосновано использование ТВ-трубки типа "Изокон" ЛИ-801 в системе регистрации пикосекундного радиолиза. При экспериментально полученных и заданных настройках ТВ-камера КТП-62 имеет более широкий динамический диапазон, чем фоторегистратор "Агат СФ3" и не ограничивает дополнительно точности измерений.

Анализ погрешностей регистрации спектрофотометрической установки. Составляющие погрешности измерения яркости спектральных

линий в спектрофотометрической установке на базе ЭОП-камеры "Агат-СФ3" и ТВ-трубки "Изокон" представлены на рис. 4.

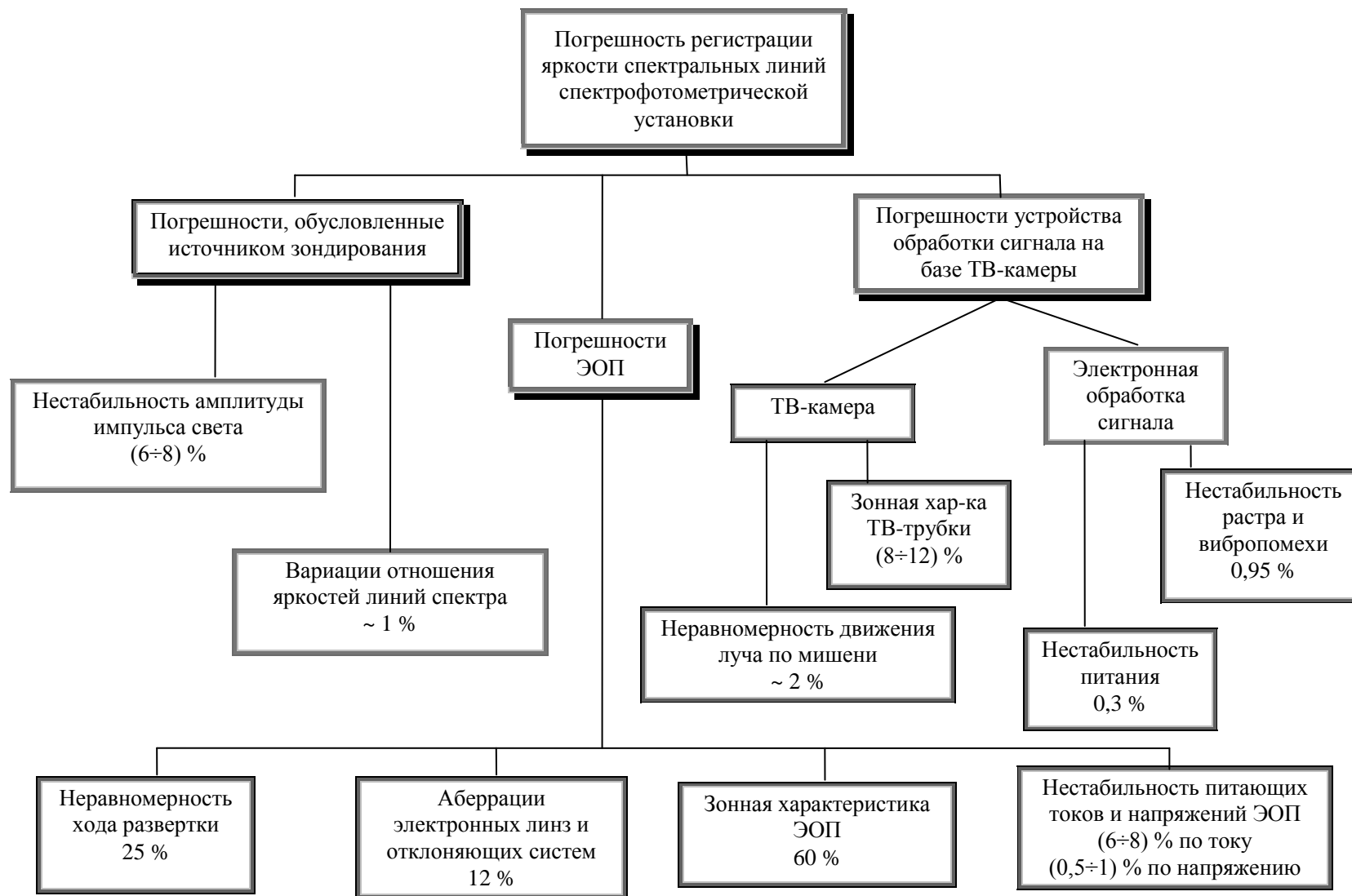


Рис. 4. Структурная схема составляющих погрешности измерения оптического пропускания спектрофотометрической установки.

Погрешности регистрации возникают в основном по следующим причинам:

- изменение интенсивности спектральных компонентов во время импульса излучения и отсутствие пропорциональности их отношений в процессе развития и угасания вспышки света;
- невозможность получить на практике идеальный зондирующий оптический импульс с гладкой вершиной и полной повторяемостью параметров от импульса к импульсу.

При использовании в одноканальной схеме режима калибровки тракта до исследуемого явления и запоминании результатов в памяти электронного устройства случайная погрешность регистрации яркости спектральной линии (или оптического пропускания кюветы с веществом) определяется выражением:

$$\frac{\Delta \tau}{\tau} = 1,41 \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \Phi}{\Phi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{ТВ}^2 + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{ТВ}^2 + \delta_{АЦП}^2 + \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda}\right)^2},$$

(Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует..2)

где: $\frac{\Delta \Phi}{\Phi}$ - нестабильность потока зондирующего излучения; $\frac{\Delta I}{I}$; $\frac{\Delta U}{U}$ - нестабильность источников питания электроннооптического преобразователя (1÷1,5) %; $\left(\frac{\Delta l}{l}\right)_{ТВ}$ - нестабильность раstra ТВ-трубки изокона и наличие вибропомех (0,95 %); $\left(\frac{\Delta U}{U}\right)_{ТВ}$ - нестабильность источников питания телевизионной передающей трубки (0,3 %); $\delta_{АЦП}^2$ - погрешность дискретизации аналого-цифрового преобразователя электронного вычислителя (0,6%); $\frac{\Delta \lambda}{\lambda}$ - изменение отношений интенсивностей линий спектра (1 %).

Таким образом, максимальная погрешность регистрации сигналов на пикосекундной спектрофотометрической установке не превышает 13,5 %.

1. Климашин В.П., Павлов Ю.С. Кинетический спектрофотометр.
Патент РФ № 2100785, 1997.

2. Павлов Ю.С., Климашин В.П., Непомнящий О.Н., Пикаев А.К.
Создание установки импульсного радиолиза с пикосекундным разрешением.
Труды 15 Всес. науч.-техн. конф. "Высокоскоростная фотография, фотоника
и метрология быстропротекающих процессов".
М., НПО "ВНИИОФИ", 1991, с. 50.