

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ»

С.В. Исаков

**Ядерно-физические
контрольно-измерительные приборы**

*Рекомендовано
УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений*

Москва 2012

УДК 539.1.074(075)

ББК 22.38я7

И 85

Исаков С.В. **Ядерно-физические контрольно-измерительные приборы:**
Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 60 с.

Рассмотрены физические основы, принципы действия, устройство, области применения и методы расчета основных параметров ядерно-физических контрольно-измерительных приборов.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям «Физика кинетических явлений» и «Методы и аппаратура прикладной ядерной физики».

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент канд. техн. наук Д.А. Лукьянов

ISBN 978-5-7262-1738-3

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2012

Оглавление

Глава 1. Радиоизотопные приборы.....	4
Глава 2. Блок источника излучения.....	8
Глава 3. Блок детектирования ядерно-физических контрольно-измерительных приборов.....	10
Глава 4. Основные характеристики радиоизотопных приборов.....	14
Глава 5. Регистрирующие устройства радиоизотопных приборов.....	20
Глава 6. Погрешности регистрирующих устройств ЯФКИП...	29
Глава 7. Интегральные функции распределения погрешности ядерно-физических контрольно-измерительных приборов.....	34
Глава 8. Ядерно-физические приборы с релейными схемами..	39
Глава 9. Радиоизотопные приборы для контроля уровня.....	46
Список использованной литературы.....	50
Приложение 1. Пример расчета РИП для определения степени сгорания теплозащитного слоя обшивки космического аппарата.....	51
Приложение 2. Примеры современных радиоизотопных приборов.....	55

Глава 1. Радиоизотопные приборы

Определение радиоизотопного прибора

Радиоизотопный прибор – радиационно-информационное устройство, принцип действия которого основан на использовании результатов взаимодействия ионизирующего излучения с объектом контроля, имеющее в своем составе закрытый радионуклидный источник излучения (ГОСТ 14336-87).

Радиоизотопные приборы (РИП), предназначенные для автоматизации технологических процессов в промышленности, дают возможность измерять и автоматически контролировать такие технологические параметры, как толщина, плотность, концентрация, давление и т.д., а также – могут работать автономно в производственных или лабораторных условиях.

Отличие радиоизотопных от других приборов состоит в том, что информация об измеряемом параметре заключена в потоке излучения, а также в наличии источника ионизирующего излучения в составе прибора.

Физические принципы действия радиоизотопных приборов

В основе физических принципов действия РИП лежат процессы взаимодействия излучения с веществом (поглощение, рассеяние, отражение, ионизация и т.д.).

Любой радиоизотопный прибор состоит из:

- 1) источника (И) излучения;
- 2) детектора излучения (Д), предназначенного для преобразования потока излучения в электрический сигнал;
- 3) регистрирующего устройства (РУ), преобразующего электрические сигналы в удобную для измерения форму.

Структурные схемы радиоизотопных приборов

Схема прибора, основанного на прохождении излучения, представлена на рис. 1.1, где $A\gamma$ – активность источника гамма-излучения, h – уровень жидкости или сыпучего вещества в сосуде.

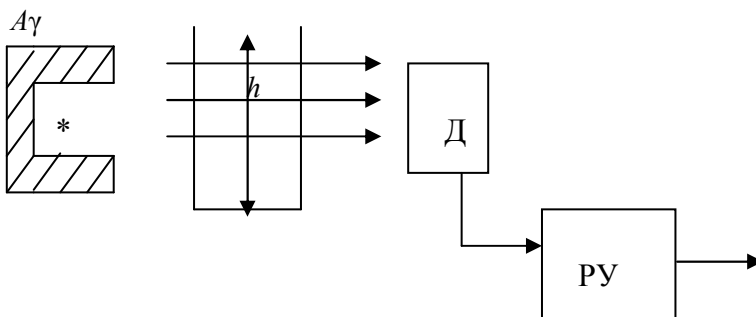


Рис.1.1. Схема прибора, основанного на прохождении излучения

На рис. 1.2 изображена схема прибора, основанного на отражение излучения (h – толщина покрытия).

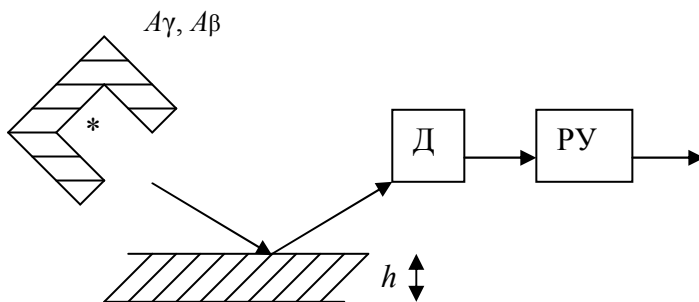


Рис.1.2. Схема прибора, основанного на отражении излучения

Классификация радиоизотопных приборов

Радиоизотопные приборы можно классифицировать тремя способами:

- 1) по типу измеряемого параметра (уровнемеры, толщиномеры, плотномеры, концентратомеры);
- 2) по физическому принципу действия (на поглощение излучения, на отражение излучения и т.д.);
- 3) по типу построения регистрирующих устройств или измерительных схем (с релейными схемами, со схемами прямого измерения, с дифференциальными схемами, с компенсационными схемами).

Области применения радиоизотопных приборов

1. На производстве в тяжелых условиях эксплуатации (агрессивные и взрывоопасные среды) в атомной, металлургической, химической и горнодобывающей промышленности.
2. В тех случаях, где обычные приборы не работают или быстро выходят из строя.
3. Для посадки и стыковки летательных аппаратов, слежения за низколетящими объектами и т.п.

Достоинства РИП

1. Бесконтактное получение информации о контролируемом объекте, т.е. отсутствие механического, электрического или другого контакта между измерительной аппаратурой и контролируемым материалом, информация о котором заключена в потоке излучения. Например, РИП позволяет бесконтактно измерять и регулировать уровень в сосудах при высоких температурах и давлениях.
2. Внешние условия не влияют на результат измерения, особенно для приборов с релейными схемами, которые способны функционировать в агрессивной и взрывоопасной среде.
3. Некоторые производственные процессы можно автоматизировать только с помощью радиоизотопных приборов. Например, бесконтактное измерение толщины покрытия (лак, краска), нанесенного на неметаллическую основу.
4. Радиоизотопные приборы обладают достаточной точностью измерения и высокой надежностью.

Недостатки РИП

1. Наличие статистической погрешности измерения, связанной с вероятностным характером процессов взаимодействия излучения с веществом и регистрации излучения. Уменьшение статистической погрешности возможно за счет увеличения активности источника излучения, а также за счет увеличения времени измерения.
2. Наличие источника ионизационного излучения приводит к возможной радиационной опасности, хотя она сведена к минимуму.

Контрольные вопросы

1. Что такое радиоизотопный прибор?
2. Перечислите физические принципы действия и структурные схемы радиоизотопных приборов.
3. Назовите области применения радиоизотопных приборов.
4. Каковы достоинства и недостатки РИП?
5. Каким образом классифицируются радиоизотопные приборы?

Глава 2. Блок источника излучения

Основной блок радиоизотопного прибора – блок источника излучения, который состоит из источника излучения и защитного контейнера. Блок источника излучения предназначен для получения пучка ионизирующего излучения, а также защиты персонала и окружающей среды от вредного воздействия излучения.

В ядерно-физических контрольно-измерительных приборах (ЯФКИП) применяются источники α -, β -, γ -, n -излучений. Источником излучения могут служить радиоактивные изотопы (радионуклиды), рентгеновские трубки, генераторы излучения. В ЯФКИП используют источники только закрытого типа.

Источником закрытого типа называется экологически чистый, герметично упакованный и удовлетворяющий требованиям радиационной безопасности по вибро-, влаго-, температуроустойчивости и устойчивости к высокому давлению.

Характеристики источников ионизационного излучения, используемых в радиоизотопных приборах

Основные характеристики источника излучения – тип излучения, активность, энергия излучения, к дополнительным характеристикам относятся период полураспада, геометрическая форма, стоимость.

Следует выбирать источники с периодом полураспада не менее одного года. Минимально необходимая активность источника излучения может быть рассчитана по заданным характеристикам проектируемого прибора – быстродействию и надежности.

Источник должен функционировать в условиях агрессивной среды, повышенной влажности, высокой температуры и выдерживать ускорения до 10 g.

Источники альфа-излучения обычно применяются в ионизационных манометрах и газоанализаторах (например, ^{239}Pu , $E\alpha = 5,18 \div 5,33$ МэВ, $T_{1/2} = 2 \cdot 10^4$ лет).

Бета-источники применяются в РИП, предназначенных для измерения толщины покрытия, малых толщин и анализа состава ве-

щества. Например, бета-источники используют в радиоизотопном методе измерения концентрации пыли в воздухе.

Гамма-источники (например, ^{137}Cs , $E_\gamma = 0,662$ МэВ, $T_{1/2} = 30,5$ лет) применяют в РИП для измерения уровня, толщины, плотности.

Нейтронные источники (например, ^{252}Cf) используют в РИП для измерения влажности материала, уровня вещества в сосуде.

Защитные контейнеры

Защитный контейнер (ЗК) – устройство для хранения или транспортировки источника излучения, обеспечивающее безопасность обслуживающего персонала в пределах принятых норм радиационной безопасности, а также предназначенное для обеспечения безопасного ремонта РИП.

Требования к защитным контейнерам

1. Защитный контейнер рассчитывается исходя из типа и энергии излучения $E_{\text{ист}}$, активности источника A , а также особенностей прибора.
2. Мощность дозы на поверхности защитного контейнера не должна превышать 3 мкР/с, а на расстоянии 1 м – 0,1 мкР/с.
3. Необходимо, чтобы защитный контейнер имел минимально возможные массу и размер.
4. Защитный контейнер должен быть оснащен устройством для перекрывания пучка во время ремонта РИП и транспортировки источника излучения.
5. Защитный контейнер должен обеспечивать удобство замены источника.

Контрольные вопросы

1. Назовите типы применяемых в РИП источников излучения.
2. Что такое источник закрытого типа?
3. Каковы требования к защитным контейнерам?
4. В чем назначение защитных контейнеров в РИП?

Глава 3. Блок детектирования ядерно-физических контрольно-измерительных приборов

Блоком детектирования (датчиком) радиоизотопного прибора называется устройство, предназначенное для преобразования потока излучения, несущего информацию об измеряемом параметре, в электрический сигнал.

Состав блока детектирования

1. Один или несколько детекторов.
2. Элементы согласования детектора с регистрирующим устройством.
3. Устройства для предварительного усиления сигнала.

Виды детекторов, применяемых в радиоизотопных приборах

1. Ионизационные камеры.
2. Газоразрядные детекторы.
3. Сцинтилляционные детекторы.
4. Полупроводниковые детекторы.

Существует два режима работы детектора: импульсный (дискретная информация на выходе детектора) и токовый (аналоговая информация на выходе детектора).

В импульсном режиме на выходе детектора можно получить: среднюю частоту n , число импульсов N , амплитуду импульсов V и т.д.

Амплитуда сигнала для различных детекторов лежит в следующих диапазонах:

- 1) газоразрядный – $1 \div 50$ В;
- 2) сцинтилляционный – $0,1 \div 1$ В;
- 3) полупроводниковый – $0,1$ В.

Токовый режим работы детектора применяется для ионизационных камер и газоразрядных детекторов.

Средний ток в счетчике [4] при средней скорости счета $n = 100 \div 1000$ с⁻¹

$$i = K \cdot n \cdot (U_c - U_0),$$

где U_c – напряжение питания счетчика, $U_0 = 300$ В, $K = \text{const}$, зависящая от типа счетчика ($K \approx 10^{10}$ с/Ом).

При работе детектора в токовом режиме необходима высокая стабильность напряжения питания и температуры окружающей среды. Значительное «мертвое время» может вызывать «захлебывание» счетчика при перегрузках.

Эксплуатационные параметры детекторов

При проектировании радиоизотопных приборов необходимо учитывать внешние факторы, которые могут изменить параметры блоков приборов и нарушить их работоспособность. То есть необходимо обеспечить устойчивость работы детектора к воздействию внешних факторов (изменение напряжения питания, колебания температуры и влажности, наличие вибрации, электрических и магнитных полей).

При проектировании РИП необходимо учитывать следующее:

- 1) при применении сцинтилляционных детекторов необходимо учитывать, что стабильность фотоэлектронного умножителя сильно зависит от внешних и внутренних факторов. Под нестабильностью фотоэлектронного умножителя понимается изменение его интегральной чувствительности от анодного тока во времени. Для фотоэлектронного умножителя следует обеспечить такой режим работы, при котором анодный ток фотоэлектронного умножителя не превышает $10^{-10} \div 10^{-9}$ А. Сцинтилляторы оказывают незначительное влияние на стабильность работы детектора в целом;
- 2) газоразрядные детекторы имеют более высокую стабильность параметров при воздействии внешних факторов, чем сцинтилляционные. На характеристики газоразрядных детекторов могут оказывать влияние изменения состава и давления газа (в основном гасящего);
- 3) нестабильность полупроводниковых детекторов определяется в основном изменением свойств материала из-за радиационных повреждений и нарушения высокоомного контакта.

Влияние температуры, влажности, радиации на стабильность работы блоков детектирования

При проектировании РИП необходимо учитывать температурную стабильность блока детектирования и всего радиоизотопного прибора. Наибольшей температурной нестабильностью обладают сцинтилляционные счетчики. При изменении температуры в них происходит немонотонное изменение анодного тока ФЭУ, а также изменение коэффициента усиления фотоэлектронного умножителя. Таким образом, не рекомендуется использовать сцинтилляционные детекторы в условиях резких изменений температуры.

Газоразрядные детекторы имеют более простую и монотонную зависимость характеристик от температуры по сравнению со сцинтилляционными.

Галогенные счетчики могут работать в температурном диапазоне от минус 40 до +50 °С), коронные счетчики – от минус 50 до +150 °С, пропорциональные – от минус 10 до +100 °С.

Повышенная влажность окружающей среды влияет на поверхностные токи утечки в сцинтилляционных блоках и вызывает коррозию деталей блока детектирования. Радиационная устойчивость всех блоков детектирования, кроме полупроводниковых, достаточно приемлема при решении задач контроля технологических параметров в производственных условиях.

Критерии выбора детектора при проектировании РИП

Основной критерий применимости детектора в РИП – возможность получения с его помощью необходимой и достаточной информации о потоке излучения, несущем сведения о контролируемом технологическом параметре.

Выбор детектора осуществляется по следующим критериям:

- 1) характеристики детектора: эффективность регистрации, энергетическое разрешение, временное разрешение, чувствительность к различным видам излучения, амплитуда сигнала;
- 2) возможность применения детектора в данных условиях эксплуатации: температура, давление, влажность и т.д.;
- 3) сложность и стоимость аппаратуры, необходимой для обработки информации, поступающей с детектора;

4) конструктивные особенности при обеспечении питания детектора.

Контрольные вопросы

1. Назовите блоки детектирования радиоизотопных приборов. Каковы их устройство и назначение? Какие детекторы излучений используют в РИП?
2. Перечислите особенности работы блоков детектирования в токовом и импульсном режимах.
3. По каким критериям осуществляется выбор детекторов излучения при конструировании РИП?
4. Какое влияние оказывают режимы эксплуатации на стабильность работы блоков детектирования?

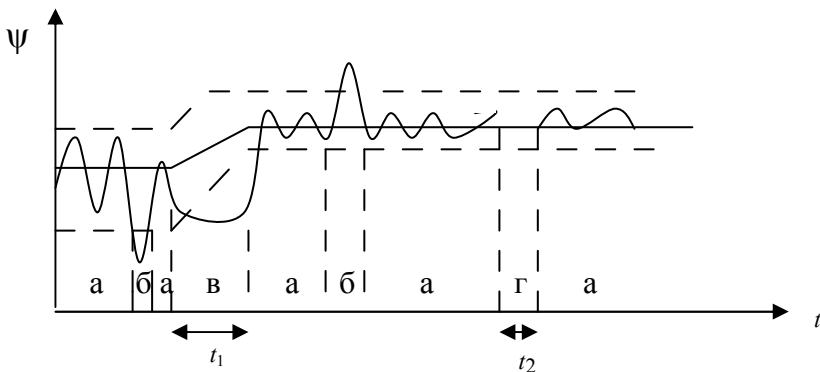


Рис. 4.2. Пример работы радиоизотопного прибора

Области а (рис. 4.2) – области нормальной работы прибора.

В областях б – сбой в работе прибора вследствие случайного изменения напряжения питания прибора, появления вибрации, флуктуации плотности потока излучения и т.д. Данный сбой не связан с выходом из строя элементов прибора. Для его устранения необходимо вмешательство оператора, связанное с увеличением активности источника излучения, изменением режима работы детектора и т.п.

В области в – сбой особого рода, произошедший из-за плохого быстродействия прибора.

В области г – отказ прибора, связанный с выходом из строя одного или нескольких элементов прибора (требуется ремонт).

Быстродействие прибора

Способность прибора реагировать на изменение измеряемого параметра называется быстродействием.

Количественная оценка быстродействия производится при помощи различных величин. Среди них: время задержки измерения, время прохождения шкалы прибора, число замеров в единицу времени, время одного замера.

Под временем одного замера понимают интервал с момента начала измерения параметра до момента, когда прибор выдает информацию о параметре.

На быстродействие приборов оказывают влияние различные преобразования сигнала. В радиоизотопном приборе происходят четыре основных преобразования сигнала:

- 1) взаимодействие излучения с веществом измеряемого параметра (практически мгновенное) изменяет характеристики первоначального потока излучения;
- 2) поток излучения в детекторе преобразуется в электрический сигнал ($t_{\text{преобр}}$ очень мало);
- 3) интегрирующая RC -цепочка (или счетный блок) усредняет сигналы с детектора и преобразует их в электрические сигналы, амплитуда которых зависит от величины измеряемого параметра (на данное преобразование необходимо время усреднения t_y);
- 4) исполнительное устройство прибора (реле, двигатель) преобразует сигнал в действие требуемого вида (включение контакта, движение ленты, перемещение шкалы), на что требуется время исполнения t_u . Таким образом, время

$$t_1 = t_y + t_u.$$

Можно сделать вывод, что быстродействие прибора связано с переходными процессами в его электрических цепях, возникающих при изменении входного сигнала, и оценить быстродействие для схем прямого измерения по следующей формуле:

$$t_1 \sim \tau = RC.$$

При проектировании РИП необходимо выбирать оптимальное для решения поставленной задачи быстродействие.

Надежность радиоизотопного прибора

Рассмотрим понятие аппаратной надежности. Любой прибор может нормально работать определенное время. Время нормальной работы прибора $t_{\text{раб}}$ зависит от устройства, сложности и условий эксплуатации.

Время нормальной работы определяется основной характеристикой прибора – надежностью, которая задается при конструировании прибора. После испытаний готового прибора экспериментальная надежность сравнивается с заданной заказчиком. Прибор должен проходить тестирование на испытательных стендах (кли-

матических, вибрационных, ударных и др.), имитирующих реальные условия эксплуатации. По результатам тестирования можно сравнить экспериментальную и теоретическую надежность прибора.

Определение надежности

Надежность – свойство прибора выполнять заданные функции в определенных условиях и в течение определенного промежутка времени при сохранении значений других основных характеристик прибора в заранее установленных пределах.

Существует два понятия, связанных с надежностью прибора: 1) T_{ϕ} – время физического износа прибора (выход из строя прибора или его отдельных блоков); 2) $T_{\text{м}}$ – время морального износа (прибор имеет большую надежность, функционирует нормально, но морально устарел).

Правила надежности

При конструировании прибора завышать надежность не следует, так как:

- 1) увеличивается стоимость прибора за счет дорогих деталей, дублирования блоков и т.д.;
- 2) время физического износа не должно превышать время морального износа $T_{\phi} \leq T_{\text{м}}$. Необходимо отметить, что время морального износа $T_{\text{м}}$ определяется техническим прогрессом.

В ЯФКИП моральный износ в основном определяется электронной базой, а не физическим принципом действия прибора.

Надежность по отказам

Основной параметр количественного определения надежности – распределение вероятности отказов во времени, это распределение можно найти экспериментально. Для этой цели определенное число приборов эксплуатируют длительное время и отмечают моменты выхода из строя каждого прибора. Если в начальный момент работают все приборы, то в определенный момент времени все приборы выйдут из строя.

Нормированная кривая $f(t)$, построенная на основе большого числа измерений, характеризует плотность вероятности отказов во времени (рис. 4.3). Момент времени, соответствующий максималь-

ной вероятности отказов, определяет средний срок службы прибора.

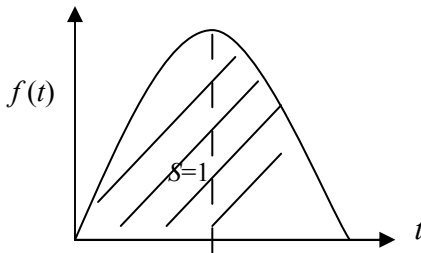


Рис. 4.3. Плотность распределения отказов во времени

Кривая $f(t)$ представляет собой частоту отказов, т.е. долю выхода из строя приборов в определенный момент времени по отношению к их начальному количеству:

$f(t) = n(t)$ [ч⁻¹] – частота отказов.

По функции $f(t)$ находят другие параметры надежности прибора или элементов прибора:

- 1) в интервале времени от t до $t + dt$ вероятность отказа $dp = f(t) \cdot dt$;
- 2) вероятность безотказной работы до момента времени t_1 определяется выражением

$$P(t_1) = \int_{t_1}^{\infty} f(t) dt ;$$

- 3) средний срок службы прибора

$$T = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt .$$

Экспериментально найдено, что плотность распределения отказов во времени может быть описана следующим выражением:

$$f(t) = \lambda \cdot \exp(-\lambda t),$$

где λ – параметр надежности [ч⁻¹], т.е. число отказов в единицу времени.

Надежность прибора определяется надежностью входящих в его конструкцию элементов (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Элемент	$\lambda, \text{ч}^{-1}$
Резистор	$10^{-7} \div 10^{-6}$
Конденсатор	$10^{-7} \div 10^{-5}$
Реле	10^{-6}

Для большинства элементов радиоаппаратуры время приработки составляет 100 ч, время нормальной работы не превышает 10^5 ч. Если прибор функционирует более 10^5 ч, то вероятность отказа прибора вследствие его износа возрастает. На надежность прибора влияют следующие факторы: режимы работы, условия эксплуатации, ошибки при конструировании, изготовлении и т.д.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные и дополнительные характеристики РИП.
2. Что такое быстродействия РИП?
3. Что такое надежность РИП? Назовите основные правила надежности РИП.
4. В чем состоит физический смысл надежности РИП по отказам?
5. Какие преобразования сигнала в РИП влияют на быстродействие прибора?

Глава 5. Регистрирующие устройства радиоизотопных приборов

Регистрирующее устройство радиоизотопного прибора предназначено для:

- а) усиления и формирования электрических сигналов, поступающих с детектора;
- б) отбора сигналов по определенным параметрам (амплитуда, форма, длительность);
- в) представления полученных результатов в удобном для пользователя виде.

Принципиальная особенность регистрации излучения – статистический характер процессов, то есть в процессе измерения флуктуирует поток излучения, число электрических сигналов с детектора, при этом значение измеряемого технологического параметра – величина постоянная.

Истинное или среднее значение плотности потока излучения можно определить с помощью многократных измерений. Ошибка измерения будет тем меньше, чем больше информации о потоке излучения, несущем информацию об измеряемом параметре, будет накоплено. В связи с этим для получения необходимой точности измерения поступающая с детектора информация должна накапливаться и усредняться в специальном блоке регистрирующего устройства (РУ) – усредняющем блоке (РС-цепочки, пересчетные ячейки и т. д.).

Усредняющий блок регистрирующего устройства является одним из основных блоков РИП, определяющих основные характеристики прибора – погрешность и быстродействие.

Результаты из усредняющего блока представляются в удобном для оператора виде с помощью выходного исполнительного блока. Таким образом, основными блоками регистрирующего устройства являются усредняющий (УБ) и выходной исполнительный (ВБ). Современные радиоизотопные приборы могут включать в себя микропроцессорный блок, который выполняет функции как УБ, так и ВБ.

В состав регистрирующего устройства могут входить обслуживающие блоки: усилители, формирователи, дискриминаторы, источники питания. Существует множество схем регистрирующих

устройств используемых в РИП, чаще используют готовые схемы, реже – специальные разработки.

Характер входной и выходной информации определяет принципиальные различия в построении схем регистрирующих устройств радиоизотопного прибора. Рассмотрим РУ с точки зрения выходной информации. Информацию об измеряемом параметре можно представить в двух формах: аналоговой и дискретной. Напряжение или ток на выходе РУ являются аналоговыми сигналами. При дискретной (цифровой) форме выходной информации результаты измерения выводят в виде цифровых групп или чисел. В данном случае информация может иметь дробные или целочисленные значения. При дискретной форме представления информации аппаратная погрешность регистрирующего устройства может быть существенно уменьшена. Рассмотрим регистрирующее устройство РИП с точки зрения входящей информации.

На вход РУ информация также может поступать в аналоговой или дискретной форме. Это зависит от того, в каком виде поступает информация с детектора (токовый или импульсный режим работы детектора). По характеру входной информации регистрирующие устройства подразделяют на аналоговые и счетные. Счетное регистрирующее устройство считает число сигналов с детектора, а аналоговое – измеряет ток в цепи детектора.

В радиоизотопных приборах применяются следующие РУ:
1) измерители скорости счета; 2) измерители постоянного тока;
3) счетчики импульсов.

Структурные схемы регистрирующих устройств

К структурным схемам регистрирующих устройств относятся:
1) схема прямого измерения; 2) дифференциальная схема; 3) компенсационная схема; 4) релейная схема.

Проведем сравнительный анализ всех типов схем РУ, что позволит выбрать оптимальную схему для решения конкретной задачи.

1. Простая схема (рис. 5.1) включает в себя один канал измерения, один источник, один детектор, одно регистрирующее устройство.

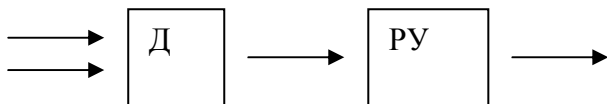


Рис. 5.1. Простая схема РИП

Схема РИП для определения толщины контролируемого объекта приведена на рис. 5.2, где $A\gamma$ – активность источника гамма-излучения, d – толщина контролируемого объекта.

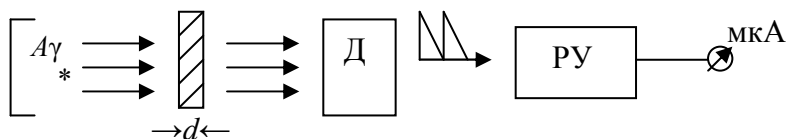


Рис. 5.2. Схема РИП для определения толщины контролируемого объекта

Основной особенностью схем прямого измерения является наличие существенных аппаратных погрешностей. При аналоговом входе на общую погрешность прибора влияет аппаратная погрешность детектора, включенного в токовом режиме. Простота регистрирующего устройства обеспечивает широкое применение схем прямого измерения в тех случаях, когда не требуется высокая точность измерения величины контролируемого параметра (погрешность измерения составляет 5–10 %).

2. В дифференциальных схемах регистрирующих устройств (рис. 5.3) наряду с рабочим каналом измерения присутствует канал измерения эталонного потока (канал сравнения).

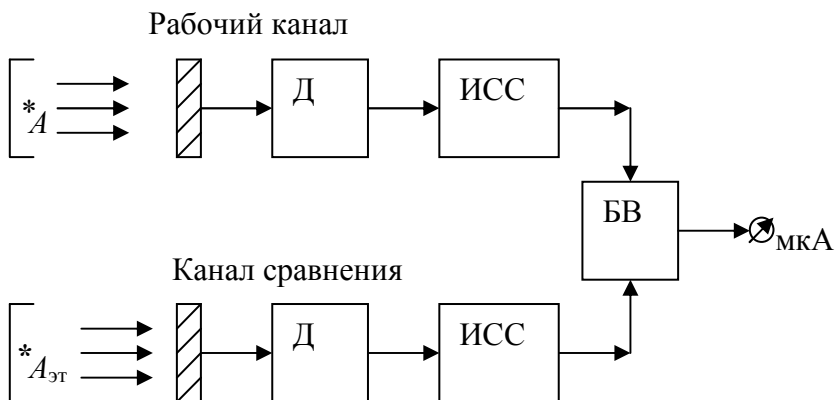


Рис. 5.3. Дифференциальная схема регистрирующего устройства (ИСС – измеритель скорости счета)

В блоке вычитания (БВ) сравниваются показания рабочего канала и канала сравнения, разность показаний усиливается и затем измеряется. За счет дифференциальной схемы удается повысить чувствительность РИП, а также уменьшить погрешность измерения за счет уменьшения аппаратных погрешностей детектора и регистрирующего устройства.

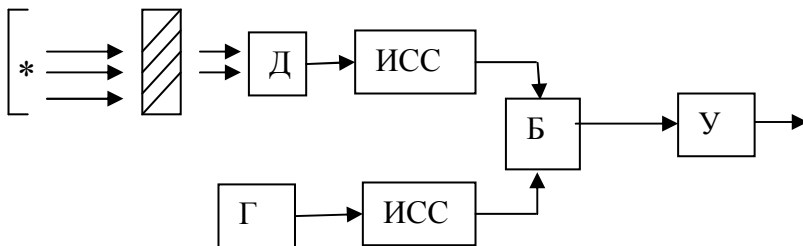


Рис. 5.4. Дифференциальная схема РУ с генератором импульсов (ГИ)

3. В компенсационных схемах измерения (рис. 5.5) присутствуют два канала измерения; в этих схемах разность сигналов между

рабочим каналом и компенсационным не измеряется, а компенсируется автоматически до нуля. Электродвигатель (ЭД) перемещает конусообразный ослабляющий экран в компенсационном канале вверх-вниз, чтобы свести разность показаний в каналах к нулю.

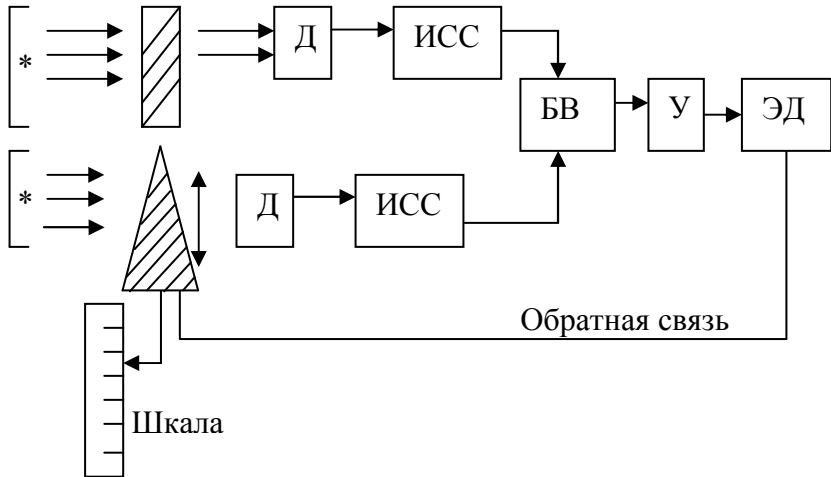


Рис. 5.5. Компенсационная схема РУ

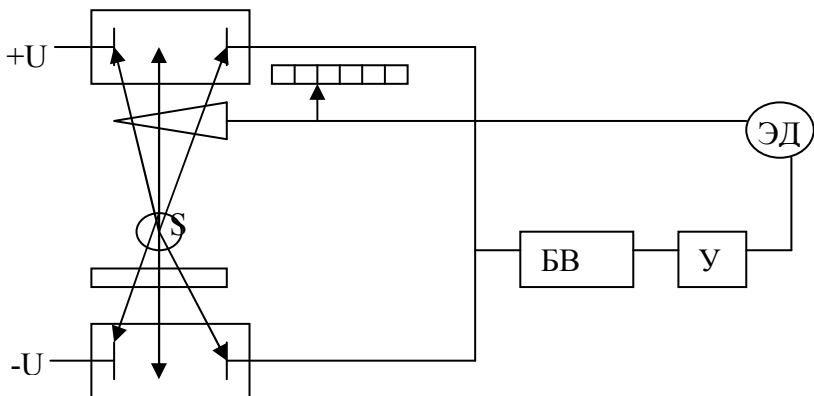


Рис. 5.6. Компенсационная схема РУ

На рис. 5.6 показана упрощенная компенсационная схема (не показаны детекторы и измерители скорости счета в рабочем и компенсационном каналах) с одним источником ионизирующего излучения.

Применение компенсационных схем позволяет повысить чувствительность регистрирующего устройства. В качестве детекторов в компенсационных схемах применяют ионизационные камеры, реже – газоразрядные счетчики, работающие в токовом режиме.

Импульсные регистрирующие устройства ядерно-физических контрольно-измерительных приборов

Импульсные регистрирующие устройства обладают высокой точностью измерения и часто применяются в радиоизотопных приборах.

Регистрирующие устройства РИП предназначены для измерения информации, поступающей с детектора. Так как импульсы, поступающие с детектора, случайно распределены во времени, то мгновенно получить информацию об их числе нельзя, необходимо провести усреднение (накопление) числа импульсов в течение определенного времени и преобразовать скорость счета импульсов в какой-либо параметр. Для этих целей служит усредняющий блок регистрирующего устройства радиоизотопного прибора.

Усредняющий преобразовательный блок определяет основные характеристики радиоизотопного прибора – погрешность и быстроедействие.

В импульсных регистрирующих устройствах существует три вида усредняющего преобразования сигнала:

- 1) число-импульсное преобразование сигнала $[n \rightarrow N]$, во время которого число импульсов с детектора (n) преобразуется в измеряемое число импульсов на выходе РУ (N);
- 2) время-импульсное преобразование сигнала $[n \rightarrow T]$, во время которого число импульсов с детектора преобразуется в длительность временных интервалов;
- 3) токовое преобразование сигнала $[n \rightarrow U]$, во время которого число импульсов с детектора преобразуется в сигнал постоянного тока.

Число-импульсное преобразование сигнала – классическая схема определения интенсивности за определённое время усреднения ($N = t_y \cdot n$).

Достоинства число-импульсного преобразования сигнала:

- а) малые аппаратные и статистические ошибки;
- б) высокая помехоустойчивость при передаче сигнала на выходной блок;
- г) удобство передачи информации в ЭВМ.

Примером блока, в котором реализуется число-импульсное преобразование сигнала, являются пересчетные ячейки, считающие и запоминающие импульсы.

При время-импульсном преобразовании сигнал поступает на вход исполняющего преобразования, преобразующего временной интервал в величины, удобные для измерения технологического параметра. Регистрирующее устройство для время-импульсного преобразования проще по конструкции, чем для число-импульсного, так как при данном преобразовании технически проще организовать связь между блоками регистрирующего устройства. Недостаток время-импульсного преобразования – отсутствие прямой пропорции между числом импульсов на входе РУ и длительностью временного интервала на выходе РУ.

Для изучения токового преобразования сигнала рассмотрим работу импульсного интенсиметра, в котором реализуется данное преобразование сигнала.

Интенсиметры в импульсных регистрирующих устройствах

Импульсным интенсиметром называется устройство для измерения скорости счета импульсов, поступающих с детектора. Если в интенсиметре имеет место токовое усредняющее преобразование [$n \rightarrow U$], то при этом средняя частота следования импульсов с детектора непрерывно преобразуется в пропорциональное ей напряжение, по величине которого можно определить значение измеряемого технологического параметра. Блок-схема регистрирующего устройства с импульсным интенсиметром представлена на рис. 5.7.

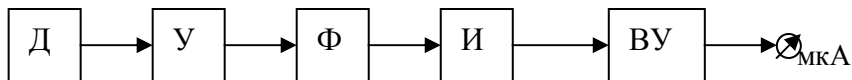


Рис. 5.7. Блок-схема регистрирующего устройства с импульсным интенсиметром: Д – детектор, У – усилитель, Ф – формирователь, И – интегратор, ВУ – выходное устройство

Усиленные и стандартизованные по амплитуде, форме и длительности импульсы усредняются на интеграторе, где выделяется постоянная составляющая сигнала, пропорциональная средней частоте импульсов с детектора. В качестве усилителей применяют импульсные усилители (коэффициент усиления которых определяется величиной сигнала), необходимые для запуска формирователя (~ 2 В)

В качестве формирователей используют триггеры Шмитта или мультивибраторы, вырабатывающие на выходе прямоугольные импульсы постоянной амплитуды.

В качестве примера интегратора рассмотрим устройство с дозирующей емкостью C_d и интегрирующей RC -цепочкой (рис. 5.8).

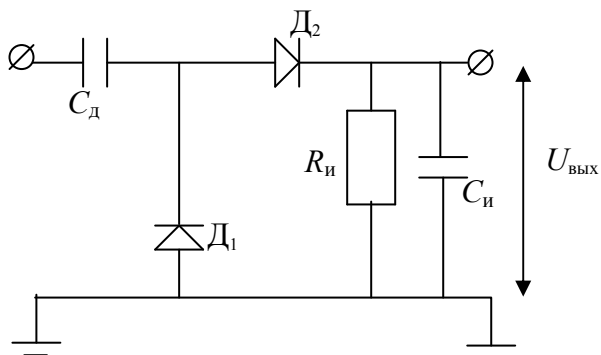


Рис. 5.8. Электрическая схема интегратора

Значение напряжения на выходе интегратора определяется следующим выражением:

$$U_{\text{вых}} \approx R_i \cdot C_i \cdot U_i \cdot n,$$

где $U_{\text{н}}$ – напряжение на входе интегратора, n – скорость счета на входе интегратора.

Достоинства импульсных интенсиметров:

1) основное достоинство – аналоговый выход, то есть получение непрерывной информации об измеряемом параметре с достаточной точностью (5–10 %);

2) на работу интенсиметра слабо влияют колебания амплитуды импульсов с детектора, поэтому высокой стабилизации питания счетчиков не требуется.

Недостатки:

1) невозможность измерения больших (более 10^4 имп/с) скоростей счёта;

2) если погрешность измерения должна быть менее 3 % и необходим аналоговый выход, то схема прямого измерения должна быть заменена на дифференциальную или компенсационную схему.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение регистрирующего устройства РИП?
2. Назовите типы структурных схем регистрирующих устройств.
3. Каковы преимущества компенсационных схем регистрирующих устройств перед другими схемами?
4. Опишите структуру регистрирующего устройства с импульсным интенсиметром.
5. Какие виды усредняющего преобразования сигнала в импульсных регистрирующих устройствах вы знаете?

Глава 6. Погрешности регистрирующих устройств ЯФКИП

При оценке соответствия прибора решению конкретных задач контроля и регулирования технологических процессов необходимо выяснить, какую погрешность позволяет обеспечить прибор. Измерение любого непрерывно изменяющегося параметра не может быть осуществлено с абсолютной точностью, точно могут быть измерены только те параметры, которые принимают лишь строго определенные дискретные значения. Следовательно, важнейшая метрологическая характеристика радиоизотопного прибора – погрешность измерения. Погрешность ЯФКИП складывается из аппаратной и статистической погрешностей. На погрешность прибора существенное влияние оказывают следующие факторы: ток схемы регистрирующего устройства, активность источника излучения, характеристики детектора.

Аппаратурные погрешности ЯФКИП, в значительной мере определяемые схемой регистрирующего устройства, не являются принципиальными для радиоизотопных приборов, так как могут быть сведены к минимуму в случае применения импульсных регистрирующих устройств. Однако в аналоговых регистрирующих устройствах аппаратурные погрешности велики и могут быть сравнимы по величине со статистическими.

Аппаратурно-статистические погрешности являются систематическими и связаны с наличием «мертвых времен» блоков ЯФКИП.

Статистические погрешности принципиальны для радиоизотопных приборов, так как не могут быть существенно уменьшены. Статистическая погрешность может быть уменьшена при увеличении активности источника или снижении быстродействия прибора.

Рассмотрим более подробно статистическую погрешность радиоизотопных приборов. Распад радиоактивного ядра – случайное событие. Поэтому интервалы времени между моментами вылета частиц из источника распределены случайным образом. Случайными являются и процессы взаимодействия излучения с веществом контролируемого объекта, а также процессы регистрации излучения детектором. Следовательно, на выходе детектора мы также имеем случайное рас-

пределение импульсов во времени. Однако на выходе прибора необходимо получить регулярный сигнал, соответствующий величине измеряемого технологического параметра.

Преобразование случайного сигнала в регулярный осуществляется в усредняющем блоке РУ. Усреднение сигнала основано на том, что при увеличении числа измеренных импульсов N за время t_y значение скорости счета измеренных импульсов n асимптотически приближается к истинному значению.

Если сделать допущение, что число измеренных за время t_y импульсов N распределено по закону Пуассона, то относительная погрешность измерения

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{n \cdot t_y}}.$$

В данной формуле отражена связь статистической погрешности измерения, быстродействия прибора и активности источника.

Аппаратурно-статистические погрешности импульсного регистрирующего устройства

Аппаратурно-статистическая погрешность импульсного регистрирующего устройства связана с наличием «мертвого» или разрешающего времени следующих блоков прибора: детектора, формирователя, усредняющего устройства, электромеханического счетчика.

Разрешающим («мертвым») временем τ_p называется минимальный интервал времени между двумя сигналами, при котором данные сигналы регистрируются раздельно.

Все элементы схемы регистрирующего устройства могут быть разделены на две группы:

- 1) с непродлевающимся «мертвым» временем;
- 2) с продлевающимся «мертвым» временем.

Элементы с непродлевающимся «мертвым» временем имеют $\tau_p = \text{const}$. Например, мультивибратор формирователь импульсов, который имеет фиксированное постоянное τ_p , складывающееся из длительности пребывания мультивибратора в «прокинутом» состоянии и времени его восстановления. Следовательно, τ_p не зависит от частоты импульсов, поступающих на вход формирователя.

Такой элемент работает нормально и при больших скоростях счета на входе.

Пример элемента с продлевающимся «мертвым» временем – электромеханический счетчик импульсов, «мертвое» время которого равно полному циклу одной регистрации в результате протекания тока через обмотку якоря. При поступлении второго импульса спустя время меньшее τ_p возникающее в обмотке электромагнитное поле не позволяет якорю вернуться в исходное положение и закончить цикл регистрации первого импульса. Вследствие чего разрешающее время продлевается и просчеты импульсов увеличиваются при больших скоростях счета.

Рассмотрим просчеты импульсов η элементом с непродлевающимся «мертвым» временем. Обозначим число импульсов на входе элемента $n_{вх}$, а измеренное число импульсов на выходе элемента $n_{изм}$. Просчеты импульсов данным типом элемента определяются следующим выражением:

$$\eta = (n_{вх} - n_{изм}) / n_{вх} = (n_{вх} \cdot \tau_p) / (1 + n_{вх} \cdot \tau_p).$$

Выводы

1. Аппаратурно-статистические погрешности являются систематическими и возрастают с увеличением скорости счета.
2. Аппаратурно-статистические погрешности учитываются при градуировке прибора. Но они могут нарушить линейность шкалы при больших скоростях счета.
3. Аппаратурно-статистические погрешности сводятся к минимуму при использовании элементов с малым разрешающим временем.

Погрешности импульсных интенсиметров

Рассмотрим погрешности токового усредняющего преобразования. Обозначим напряжение на выходе регистрирующего устройства $U_{вых}$.

Аппаратурная погрешность регистрирующего устройства обусловлена погрешностями выходного устройства и усилителя постоянного тока.

Аппаратурные погрешности считаются случайными и описываются нормальным законом распределения с нулевым средним значением. Если задана величина максимальной относительной аппа-

ратурной погрешности $\varepsilon_{\text{ам}}$, то величина относительной среднеквадратичной погрешности может быть рассчитана из условия $\delta_{\text{а}} = \varepsilon_{\text{ам}}/3$.

Статистическая погрешность импульсного интенсиметра

Найдем статистическую погрешность токового усредняющего преобразования, которое определяется погрешностью интегрирующей RC -цепочки. Флуктуация сигнала на выходе RC -цепочки определяется выражением $\delta = \frac{\sigma}{\bar{U}}$, где σ – среднеквадратическое отклонение сигнала, \bar{U} – среднее значение напряжения на выходе RC -цепочки.

В случае стационарного режима интенсиметра, дисперсия сигнала на выходе RC -фильтра:

$$D(U) = n \cdot \frac{q^2 R}{2C},$$

где q – приращение заряда на емкости от одного входящего импульса, n – скорость счета импульсов на входе RC -цепочки.

Среднее значение сигнала U на выходе RC -фильтра:

$$U = qnR.$$

Относительная флуктуация сигнала на выходе RC -цепочки в стационарном режиме:

$$\delta(U) = \frac{\sigma(U)}{U} = \frac{1}{\sqrt{2RCn}}.$$

Введя обозначение $\tau = R \cdot C$, получаем выражение для относительной флуктуации сигнала на выходе RC -цепочки $\delta = \frac{1}{\sqrt{2n\tau}}$.

Данное выражение является основным для расчета интенсиметров, поскольку содержит связь таких характеристик прибора, как минимальная активность источника и погрешность выходного сигнала.

Расчет величины $\tau = RC$ проводят по минимальной скорости счета импульсов n_{min} , при которой статистическая погрешность вы-

ходного сигнала будет максимальной: $\tau = \frac{1}{2n_{\text{min}}\delta^2}$.

Контрольные вопросы

1. Проведите анализ погрешностей регистрирующих устройств радиоизотопных приборов.
2. Дайте определение разрешающего времени РИП.
3. Приведите примеры элементов РИП с продлевающимся и непродлевающимся «мертвым» временем.
4. Чем определяется значение относительной флуктуации сигнала на выходе RC -фильтра?

Глава 7. Интегральные функции распределения погрешности ядерно-физических контрольно-измерительных приборов

При расчете и конструировании РИП решают две основные задачи.

1. Зная закон распределения статической погрешности, найти величину абсолютной или относительной погрешности.

2. Определить вероятность того, что погрешность не превысит заданных величин $\Delta_c \leq \Delta_3^\pm$, где Δ_3^\pm – заданная допустимая относительная погрешность измерения.

Если вероятность $P_{\text{вых}}$ выхода погрешности прибора Δ_c за заданный интервал Δ_3^\pm существенно превышает заданную вероятность P_3 , то повторно определяют новые значения основных параметров прибора ($A_{\text{мин}}, RC, \eta_{\text{пер}}$) с тем, чтобы выполнить условие $P_{\text{вых}} \leq P_3$.

Для оценки погрешности прибора удобно использовать интегральную функцию распределения Лапласа (интеграл ошибок).

Нормальное распределение плотности вероятности случайной величины x :

$$P(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right)dx,$$

где $P(x)$ – вероятность попадания случайной величины ζ в интервал значений $(x \div x+dx)$.

Если ввести новую случайную величину $z = \frac{x-a}{\sigma}$, то закон распределения примет следующий вид:

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right),$$

где $\bar{z} = 0, \sigma = 1$.

Функцией Лапласа называется интегральная функция

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)dz.$$

Производная функции Лапласа имеет вид

$$\Phi^1(z) = \varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right).$$

Функция Лапласа всюду непрерывна, монотонно возрастает и ограничена значениями $\Phi(-\infty) = 0$, $\Phi(+\infty) = 1$. Производная функции Лапласа также всюду непрерывна и $\Phi^1(-\infty) = \Phi^1(+\infty) = 0$.

Найдем вероятность отклонения случайной величины z от среднего значения $z = 0$ на величину, большую z_1 :

$$P(|z| > z_1) = 2\Phi(-z_1) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-z_1} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz.$$

В окрестности $z = 0$ функция $\Phi(z)$ раскладывается в степенной ряд:

$$Z=0, \Phi(z) = 0,5 + 0,399(z - z^3/6 + z^5/40 - \dots).$$

При больших значениях z функция $\Phi(z)$ раскладывается в степенной ряд:

$$\Phi(z) = 1 + 0,399(1/z - 1/z^3 + 3/z^5 - \dots)\exp(-z^2/2).$$

Производные функции Лапласа высших порядков:

а) $\Phi^1(z) = \varphi(z)$;

б) $\varphi^{(n)}(z) = \Phi^{(n+1)}(z) = (-1)^n H_n(z) \cdot \varphi(z)$;

где $H_n(z)$ – полином Чебышева–Эрмита.

$$H_0(z) = 1; H_1(z) = -z; H_2(z) = z^2 - 1; H_3(z) = -(z^3 - 3z).$$

Аргументы z могут быть отрицательными, в этом случае

$$\Phi(-z) = 1 - \Phi(z).$$

Найдем интегральные функции $G(z, \delta)$, $g(z, \delta)$, описывающие распределение статистической погрешности (флуктуации) аналогового сигнала на выходе интегрирующей RC-цепочки.

С помощью полиномов Чебышева–Эрмита можно разложить в ряд по производным функции Лапласа любую функцию распределения случайной величины. Это очень важно для случая, который имеет место в радиоизотопном реле, где флуктуации на выходе RC-фильтра значительны и замена имеющегося закона распределения флуктуаций на нормальный закон может привести к значительным ошибкам при расчете основных параметров реле.

Функция распределения флуктуации на выходе RC -фильтра и ее производная могут быть представлены в виде рядов

$$G(z, \delta) = \Phi(z) - 2/9 \cdot \varphi^{(2)}(z) \cdot \delta + (1/12 \cdot \varphi^{(3)}(z) + 2/81 \cdot \varphi^{(5)}(z)) \cdot \delta^2 - \dots;$$

$$g(z, \delta) = \varphi(z) - 2/9 \cdot \varphi^{(3)}(z) \cdot \delta + (1/12 \cdot \varphi^{(4)}(z) + 2/81 \cdot \varphi^{(6)}(z)) \cdot \delta^2 - \dots$$

При токовом усредняющем преобразовании

$$z = \frac{U - \bar{U}}{\sigma}, \quad \delta = \frac{\sigma}{U}.$$

Выводы

1. После создания радиоизотопного прибора производится его градуировка, при которой каждое измерение может продолжаться сколь угодно долго. Среднее значение параметра, полученное при градуировке прибора, принимается за истинное.

2. При практической работе с прибором время каждого измерения ограничено, поэтому значение рабочего замера может отличаться от истинного значения измеряемого параметра в ту или иную сторону.

Анализ распределения погрешностей серии измерений около истинного значения контролируемого параметра позволяет определить правильность расчета основных параметров прибора, обеспечивающих заданную погрешность измерения.

3. Выбор метода проведения анализа флуктуаций сигнала на выходе прибора определяется способом усреднения сигнала.

Для число-импульсного усредняющего преобразования должно выполняться условие

$$(1 - |\Delta_c^-|) \cdot N_0 \leq N \leq (1 + |\Delta_c^+|) \cdot N_0, \quad (7.1)$$

где $\Delta_{c\pm}$ – заданные предельно допустимые погрешности измерения технологического параметра; $N = n \cdot t_y$ – результат измерения;

$N_0 = n_0 \cdot t_y$ – истинное значение измеряемой величины.

Вероятность выполнения условия (7.1) можно найти с помощью следующего выражения:

$$P(n_0, t_y, \Delta_c) = F(z_1, \delta) - F(z_2, \delta).$$

Интегральную функцию распределения $F(z, \delta)$ можно представить в виде ряда

$$F(z, \delta) = \Phi(z) - 1/6 \cdot \varphi^{(2)}(z) \cdot \delta + \dots,$$

где $\delta = \frac{1}{\sqrt{n \cdot t_y}}$; $z_1 = \frac{\Delta_c}{\delta}$; $z_2 = \frac{-\Delta_c}{\delta}$.

Для время-импульсного усредняющего преобразования должно выполняться условие

$$\frac{T_0}{1 + \Delta_c^+} \leq T \leq \frac{T_0}{1 - \Delta_c^-}, \quad (7.2)$$

где T_0 – время набора числа импульсов n_0 , соответствующих истинному значению измеряемого параметра.

Вероятность выполнения условия (7.2) можно найти с помощью следующего выражения:

$$P(N_3, \Delta_c) = F(z_1, \delta) - F(z_2, \delta).$$

Интегральная функция распределения для время-импульсного преобразования имеет вид

$$F(z, \delta) = \Phi(z) - 1/3 \cdot \varphi(z) \cdot \delta + 1/36 \cdot (9 \cdot \varphi^{(3)}(z) + 5 \cdot \varphi^{(5)}(z)) \cdot \delta^2,$$

где $\delta = \frac{1}{\sqrt{N_3}}$; $z_1 = \frac{\Delta_c}{\delta}$; $z_2 = \frac{-\Delta_c}{\delta}$.

Для токового усредняющего преобразования должно выполняться условие

$$(1 - |\Delta_c|) \cdot U_0 \leq U \leq (1 + |\Delta_c|) \cdot U_0, \quad (7.3)$$

где U – мгновенно измеренное значение напряжения на выходе RC-цепочки; U_0 – значение напряжения, соответствующее измеряемому параметру.

Вероятность выполнения условия (7.3) можно найти с помощью следующего выражения:

$$P(n_0, \tau, \Delta_c) = G(z_1, \delta) - G(z_2, \delta).$$

Функцию $G(z, \delta)$ можно разложить в ряд с помощью функции Лапласа и ее производных:

$$G(z, \delta) = \Phi(z) - 2/9 \cdot \varphi^{(2)}(z) \cdot \delta + \dots,$$

где $\delta = \frac{1}{\sqrt{2n_0\tau}}$; $z_1 = \frac{\Delta_c}{\delta}$; $z_2 = \frac{-\Delta_c}{\delta}$.

Выводы

1. Анализ рядов показывает, что при увеличении набора информации (импульсов) в каждом измерении второй и последующие члены рядов убывают.
2. Если не требуется высокой точности расчета параметров РИП, можно ограничиться только первым членом ряда – интегральной функцией Лапласа.

Контрольные вопросы

1. Как можно оценить погрешность РИП с помощью функции Лапласа? Каковы свойства функции Лапласа?
2. Каковы методы оценки флуктуаций сигнала на выходе RC-фильтра с помощью производных функции Лапласа высших порядков?
3. Каким образом можно рассчитать вероятность невыхода показаний прибора за заданный интервал с помощью интегральных функций распределения?
4. Представьте производные функции Лапласа высших порядков с помощью полиномов Чебышева–Эрмита.

Глава 8. Ядерно-физические приборы с релейными схемами

Весьма распространённый контрольно-измерительный прибор – радиоизотопное реле, отличающееся от других приборов тем, что его работа практически не зависит от изменения интенсивности излучения в некотором диапазоне. Релейные устройства просты, дешевы, надежны, поэтому их широко используют в промышленности.

Радиоизотопное реле – устройство, реагирующее на изменение потока излучения в заданных пределах. Оно срабатывает (закрывает или отпускает контакты) в том момент, когда поток излучения достигает некоторых пороговых значений.

Устройство реле

Основные элементы радиоизотопного реле (рис. 8.1) – детектор излучения (газоразрядный, сцинтилляционный счетчик), усредняющее устройство (RC -фильтр), усилитель ($У$), выходное электромагнитное реле (ЭМП).

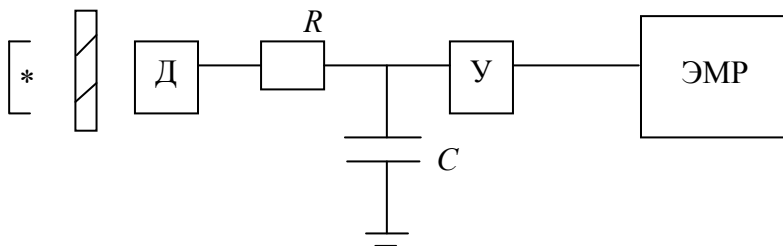


Рис. 8.1. Структурная схема радиоизотопного реле

Детектор и RC -цепочка объединены в линейный элемент, а усилитель и выходное реле – в нелинейный. Контакты выходного реле обычно включены в схемы сигнализации, измерения или регулирования технологического производственного процесса. При инженерных расчетах реле принято считать нелинейный элемент безынерционным, хотя в действительности электромагнитное реле имеет инерционность, обусловленную индуктивностью обмотки и механической инерцией якоря.

Характеристики релейного элемента

Функция $y(t) = f(U(t))$ связывает напряжение на выходе усилителя U с состоянием выходного реле (рис. 8.2).

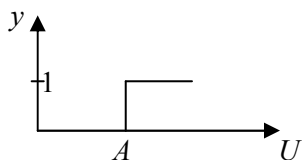


Рис. 8.2. Функция идеального релейного элемента

В идеальном релейном элементе существует один порог срабатывания A . Для идеального релейного элемента $y = 1$ (при $U > A$) и $y = 0$ (при $U < A$).

Выходные реле обычно бывают двухпозиционными, т.е. имеют два состояния: состояние «1» – контакты замкнуты, состояние «0» – контакты разомкнуты.

Реальные релейные элементы обладают гистерезисом, т.е. значение порога срабатывания зависит от направления изменения управляющего сигнала, таким образом, существует два порога – срабатывания (A) и отпускания ($A^1 = \lambda A$).

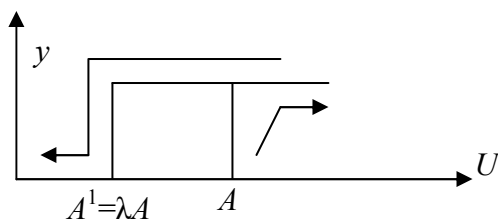


Рис. 8.3. Функция реального релейного элемента

Численной характеристикой гистерезиса реле служит коэффициент возврата $\lambda = A^1/A < 1$.

У идеального релейного элемента $\lambda = 1$.

В ряде случаев и у реальных релейных элементов $\lambda \approx 1$, поэтому их гистерезис можно не учитывать при расчетах РИП с релейным элементом.

Уравнение реального релейного элемента с гистерезисом выглядит следующим образом:

$$y[U] = \{1 \text{ при } U > A; 0 \text{ при } U < \lambda A\}.$$

Гистерезисное реле может регулироваться в нужных пределах путем изменения характеристик усилителя, т.е. коэффициент возврата может изменяться в диапазоне $\lambda = 0,2 \div 0,8$.

Параметры радиоизотопного реле

Основные параметры радиоизотопного реле – быстродействие и надежность.

Под быстродействием понимают время, за которое изменяется состояние выходного реле при скачкообразном изменении потока излучения в рабочем пучке. Быстродействие зависит от величины скачка интенсивности в рабочем пучке и характеристик релейного элемента, детектора и RC-цепочки.

Быстродействие – это время, в течение которого происходит с заданной вероятностью изменение состояния реле при условии, что поток излучения в рабочем пучке скачкообразно изменился в заданных пределах.

Среднее значение времени срабатывания при скачкообразном изменении скорости счета

$$t_{01} = \tau \cdot \ln \left(\frac{U_1 - U_0}{U_1 - A} \right),$$

где U_1 – среднее значение сигнала в состоянии «1»; U_0 – среднее значение сигнала в состоянии «0».

Среднее значение времени отпускания при скачкообразном изменении скорости счета

$$t_{10} = \tau \cdot \ln \left(\frac{U_1 - U_0}{\lambda A - U_0} \right).$$

Так как мгновенное значение управляющего напряжения $U(t)$ на входе релейного элемента – случайная величина, то существует вероятность того, что реле будет находиться в «ложном» состоянии, противоречащем среднему значению управляющего сигнала в данном состоянии реле. Ложные срабатывания реле могут быть вызваны дрейфом усилителя, дрейфом порогов срабатывания и отпускания и т.д.

Надежность характеризует устойчивость основного состояния реле и определяется двумя способами:

- 1) через относительное время пребывания реле в нормальном (основном) состоянии;
- 2) через среднее число ложных срабатываний в единицу времени.

Надежностью радиоизотопного реле называется вероятность его пребывания в нормальном (основном) состоянии. Надежность состояния «1» по вероятности P_1 можно определить путем усреднения состояний реле во времени.

Для количественной оценки надежности реле по вероятности необходимо знать закон распределения флуктуации сигнала на выходе RC -фильтра. Так как флуктуации данного сигнала могут быть значительными и могут снижать надежность, то для расчета надежности используют функции $G(z, \delta)$ и $g(z, \delta)$.

Надежность по вероятности состояний реле определяется выражениями:

$$P_1 = 1 - G(z_1, \delta_1); P_0 = G(z_0, \delta_0),$$

где P_1 – вероятность невыброса напряжения за нижний порог отпущения; P_0 – вероятность невыброса напряжения за верхний порог срабатывания;

$$\delta_1 = \frac{1}{\sqrt{2n_1\tau}}; \delta_0 = \frac{1}{\sqrt{2n_0\tau}};$$

$$z_0 = \left(\frac{n_A}{n_0} - 1 \right) \cdot \sqrt{2n_0\tau}; z_1 = \left(\frac{n_A}{n_1} - 1 \right) \cdot \sqrt{2n_1\tau}.$$

Приведенные выше выражения справедливы при $\lambda = 1$ (коэффициент возврата).

Надежность по вероятности не всегда является достаточной характеристикой надежности реле, поэтому рассмотрим надежность реле по числу ложных срабатываний P_N :

$$P_N = 1/(1 + N),$$

где N_0 – среднее число ложных срабатываний в секунду.

При $N_0 = 0$, $P_N = 1$ – случай абсолютной надёжности.

Величину надежности по числу ложных срабатываний можно вычислить, используя функцию плотности распределения флуктуации на выходе RC -фильтра.

При $\lambda = 1$ справедливы следующие зависимости:

$$P_{N1} = 1 - \frac{g(z_1, \delta_1)}{\tau \delta_1 \left(1 + \frac{n_1}{N_A}\right)}; \quad P_{N0} = 1 - \frac{g(z_0, \delta_0)}{\tau \delta_0 \left(1 + \frac{n_0}{N_A}\right)}.$$

При $\lambda \neq 1$ надежности по числу ложных срабатываний имеют вид

$$P_{N1} = 1 - \frac{g(z_1, \delta_1)}{\tau \delta_1 \left(1 + \frac{n_1}{\lambda N_A}\right)}; \quad P_{N0} = 1 - \frac{g(z_0, \delta_0)}{\tau \delta_0 \left(1 + \frac{n_0}{\lambda N_A}\right)},$$

где $\delta_1 = \frac{1}{\sqrt{2n_1\tau}}$; $\delta_0 = \frac{1}{\sqrt{2n_0\tau}}$;

$$z_0 = \left(\frac{n_A}{n_0} - 1\right) \cdot \sqrt{2n_0\tau}; \quad z_1 = \left(\frac{\lambda n_A}{n_1} - 1\right) \cdot \sqrt{2n_1\tau}.$$

Методы инженерного расчета параметров радиоизотопного реле

Задание: вычислить значения быстродействия и надежности гамма-релейного индикатора уровня (рис. 8.4) для двух значений параметра RC-цепочки: $\tau = 1$ с и $\tau = 2$ с, и определить, какое влияние оказывает параметр τ на быстродействие и надежность прибора. Если уровень воды ниже уровня индикации, то реле – в состоянии «1», если выше – в состоянии «0».

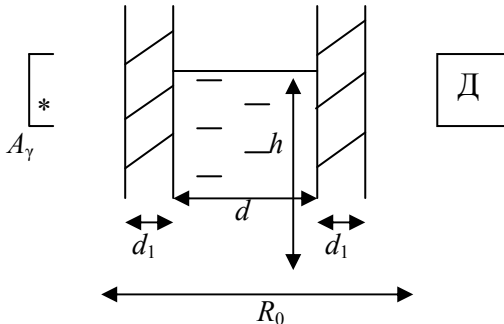


Рис. 8.4. Схема индикатора уровня

Дано: внутренний диаметр сосуда $d = 30$ см, толщина стенок сосуда $d_1 = 3$ см, расстояние «источник–детектор» $R_0 = 50$ см, активность $A_\gamma(^{60}\text{Co}) = 5$ мКи, эффективность регистрации детектора $\eta = 0,8$ %, площадь окна детектора $S = 5$ см², коэффициент возврата $\lambda \approx 1$, пороговое значение реле соответствует скорости счета импульсов $n_A = 50$ имп/с.

Определим скорость счета n_1 при отсутствии жидкости на уровне индикации:

$$n_1 = \frac{3,7 \cdot 10^7 k \eta S \cdot \exp(-2\mu_1 d_1)}{4\pi R_0} \cdot A_\gamma,$$

где k – квантовый γ -выход; μ_1 – линейный коэффициент ослабления материала стенок сосуда ($\mu_1 = 0,3$ см⁻¹ для стали).

В результате получаем $n_1 = 75$ имп/с.

Скорость счета n_0 при наличии жидкости на уровне индикации:

$$n_0 = n_1 \cdot e^{-\mu d} = 35 \text{ имп/с.}$$

Для $\tau_1 = 1$ с рассчитаем быстродействие реле:

$$t_{01} = 1 \cdot \ln\left(\frac{75 - 35}{75 - 50}\right) = 0,5 \text{ с; } t_{10} = 1 \cdot \ln\left(\frac{75 - 35}{50 - 35}\right) = 1 \text{ с.}$$

Рассчитаем необходимые для определения надежности величины:

$$z_0 = \left(\frac{50}{35} - 1\right) \cdot \sqrt{2 \cdot 35 \cdot 1} = 3,5; \quad z_1 = \left(\frac{50}{75} - 1\right) \cdot \sqrt{2 \cdot 75 \cdot 1} = -4;$$

$$\delta_0 = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 35 \cdot 1}} = 0,12; \quad \delta_1 = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 75 \cdot 1}} = 0,08.$$

Надежность реле по вероятности

$$P_1 = 1 - G(-4, 0,08) = 0,99999;$$

$$P_0 = G(3,5, 0,12) = 0,99949.$$

Надежность реле по числу ложных срабатываний

$$P_{M1} = 0,99985; \quad P_{N0} = 0,99999.$$

Определяем среднее число ложных срабатываний в единицу времени в состояниях «0» и «1»:

$$N_{01} = 0,5 \text{ ч}^{-1}; N_{00} = 28 \text{ ч}^{-1}.$$

Проведем аналогичные расчеты для $\tau = 2$ с:

$$t_{01} = 1 \text{ с}; t_{10} = 2 \text{ с};$$

$$P_1 = 0,999999989; P_0 = 0,9999999;$$

$$P_{N1} = 0,999999927; P_{N0} = 0,999965;$$

$$N_{01} = 0,026 \text{ ч}^{-1}; N_{00} = 0,13 \text{ ч}^{-1}.$$

Выводы:

- 1) при увеличении τ в два раза быстродействие реле уменьшается в два раза, но надежность резко возрастает;
- 2) другим способом повышения надежности реле является увеличение пороговых значений реле и активности источника излучения, чтобы значения быстродействия остались прежними.

Области применения релейных радиоизотопных приборов:

- 1) реле, основанные на изменении расстояния «источник–детектор»:
 - а) реле, реагирующие на перемещение предметов и изменение линейных размеров контролируемого объекта;
 - б) реле-тахометр;
 - в) реле – бесконтактный выключатель (лифт);
- 2) реле, основанные на взаимодействии излучения с веществом:
 - а) реле, реагирующее на наличие объекта на линии контроля (уровнемер);
 - б) реле плотности и толщины.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о применении релейных элементов в РИП.
2. Каковы методы расчета параметров радиоизотопного реле?
3. Опишите устройство радиоизотопного реле.
4. Дайте определения быстродействия и надежности радиоизотопного реле.
5. Что такое «идеальные» и «реальные» релейные элементы?
6. Где применяются релейные радиоизотопные приборы?

Глава 9. Радиозотопные приборы для контроля уровня

Ядерно-физические приборы контроля уровня жидкостей и сыпучих средств имеют ряд преимуществ, среди которых:

а) бесконтактный контроль уровня любой жидкости и сыпучих веществ;

б) возможность контроля уровня в сложных технологических условиях (герметичные сосуды, высокие температура и давление);

в) высокие надежность и точность прибора.

Наиболее распространенные нерадиозотопные измерители уровня: поплавковые, весовые, электромеханические, индукционные, емкостные.

В зависимости от схем измерения радиозотопные уровнемеры подразделяются на три типа:

- 1) позиционные;
- 2) уровнемеры с переменной геометрией потока излучения;
- 3) следящие.

Позиционный уровнемер – это индикатор уровня для определения факта наличия вещества на линии контроля, обладающий дискретным действием. Регистрирующим устройством в данных уровнемерах является радиозотопное реле. В качестве физического принципа действия чаще всего используется явление поглощения гамма-излучения, реже – отражение гамма- или нейтронного излучения.

а) *Уровнемер на прохождение излучения:*

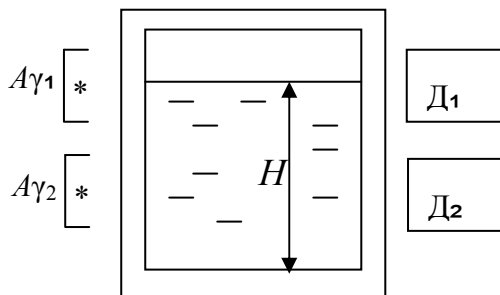


Рис. 9.1. Двухпозиционный уровнемер

Расчет уровнемера на прохождение излучения сводится к выбору типа излучения, определению минимально необходимой активности источника и выбору параметров реле, обеспечивающих выполнение заданной погрешности.

б) *Уровнемер на отражение излучения:*

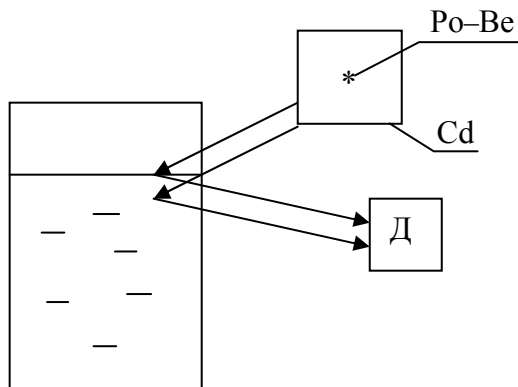


Рис.9.2. Уровнемер на отражение нейтронного излучения

Кадмиевый экран (рис. 9.2) служит для поглощения тепловых нейтронов.

Уровнемер с переменной геометрией потока излучения

Принцип действия прибора основан на том, что источник излучения находится на поверхности жидкости, и при изменении уровня жидкости изменяется расстояние между источником и детектором (рис. 9.3).

Уравнение шкалы уровнемера с переменной геометрией потока излучения имеет вид

$$n = \frac{A_{\gamma} \cdot k \cdot S \cdot \eta \cdot e^{-\mu \cdot d}}{4\pi R^2},$$

где d – толщина стенок сосуда, R – расстояние «источник-детектор», A_{γ} – активность источника, η – эффективность регистрации детектора, S – площадь окна детектора, k – квантовый

γ -выход, μ – линейный коэффициент ослабления материала стенок сосуда.

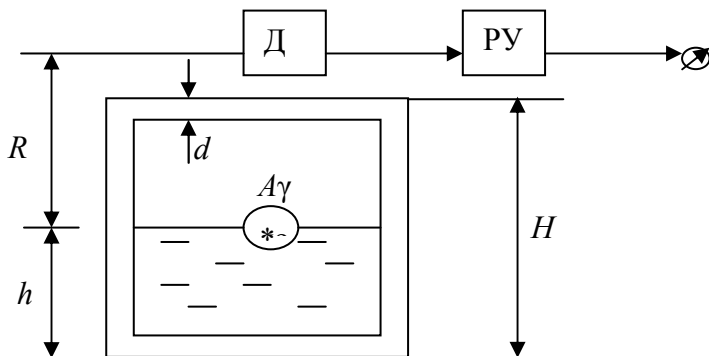


Рис. 9.3. Структурная схема уровнемера с переменной геометрией излучения

Радиоизотопный следящий уровнемер

Следящие уровнемеры, обеспечивающие высокую точность измерения уровня, имеют линейную шкалу. По причине сложной конструкции данные уровнемеры менее надежны и более дорогостоящи по сравнению с другими типами уровнемеров. Для синхронного перемещения источника излучения и детектора по вертикали в состав следящего уровнемера входят один или два электро-двигателя.

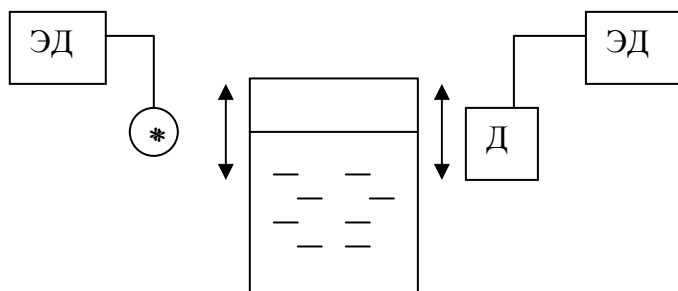


Рис. 9.4. Структурная схема следящего уровнемера

Промышленные следящие уровнемеры УР-4 и УР-8 имеют следующие технические характеристики: диапазон измерения 1 – 10 м, погрешность 1 см, скорость слежения 10 см/мин, погрешность измерения уровня постоянна по всей шкале.

При конструировании уровнемеров для сыпучих веществ применяют метод «восходящее солнце», при котором источник излучения неподвижно закреплен с одной стороны сосуда, а детектор перемещается в вертикальном направлении с другой стороны сосуда. Технические характеристики данного типа уровнемеров: диапазон измерения 1–5 м, погрешность 2,5 см, скорость слежения 3 м/с.

В промышленности также применяются дистанционные следящие уровнемеры с дальностью действия до одного километра, например, УДАР-3.

Контрольные вопросы

1. Какие типы радиоизотопных уровнемеров вы знаете?
2. Перечислите достоинства и недостатки следящих радиоизотопных уровнемеров.
3. Где применяются позиционные уровнемеры?
4. Опишите принцип действия уровнемеров с переменной геометрией потока излучения.
5. Назовите методы измерения уровня сыпучих веществ.

Список использованной литературы

1. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. *Чудаков В.А.* Радиоизотопное измерение плотности легких сред. Минск: БГУ, 1982.
3. *Румянцев С.В.* Применение бета-толщиномеров в промышленности. М.: Атомиздат, 1980.
4. *Таточенко Л.К.* Радиоактивные изотопы в приборостроении. М.: Атомиздат, 1960.
5. *Афанасьев В.Н.* Радиоизотопные приборы в металлургии. М.: Металлургия, 1966.
6. *Клемпер К.С.* Вероятностный анализ при проектировании радиоизотопных приборов. М.: Атомиздат, 1977.
7. *Гельфанд М.Е., Калошин В.М., Ходоров Г.Н.* Радиоизотопные приборы и их применение в промышленности: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Приложение 1

Пример расчета РИП для определения степени сгорания теплозащитного слоя обшивки космического аппарата

Задание: спроектировать и рассчитать радиоизотопный прибор для определения степени сгорания теплозащитного слоя обшивки космического аппарата в атмосфере Земли во время взлета и приземления.

Дано: толщина теплозащитного слоя 20 см, погрешность измерения 7 %, быстродействие 5 с.

Для контроля сгорания теплозащитного слоя подбирают радионуклид, температура разложения которого примерно идентична температуре разложения материала теплозащиты. Для введения материала в теплозащитный слой смесью радионуклида равномерно пропитывают пробку из материала теплозащиты. Во время снижения аппарата скорость уменьшения количества нуклида будет характеризовать скорость сгорания теплозащитного слоя.

По мере сгорания теплозащитного слоя уменьшается активность источника излучения и снижается скорость счета в блоке детектирования. По изменению скорости счета можно судить об изменении толщины теплозащитного слоя космического аппарата. В данном случае целесообразно использовать принцип действия прибора, основанный на регистрации прямого излучения.

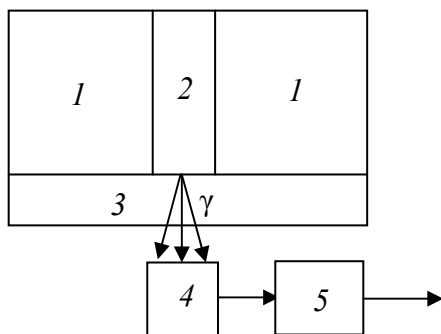


Рис. П.1.1. Схема радиоизотопной измерительной системы:

1 – теплозащитный слой; 2 – линейный источник гамма-излучения; 3 – корпус аппарата; 4 – детектор излучения; 5 – блок преобразования и усиления сигнала

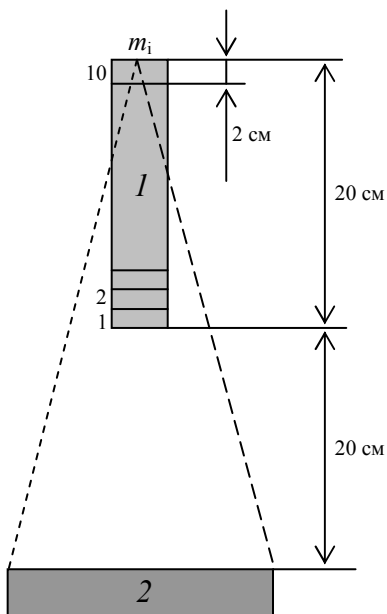


Рис. П.1.2. Геометрия радиоизотопного прибора:
 1 – источник излучения; 2 – детектор излучения

Разделим линейный источник излучения на десять частей (рис. П.1.2). В данном допущении число частиц n^1 , упавших на окно детектора, будет пропорционально величине

$$n^1 = \sum_{m=1}^{10} \frac{1}{4\pi(19 + 2m)^2}.$$

На основании физического принципа действия конструируемого РИП выбираем в качестве источника излучения ^{60}Co , имеющий следующие характеристики: $T_{1/2}=5,3$ года, $E_\gamma=1,17; 1,3$ МэВ.

Расчет минимально необходимой активности источника проведем по минимальной скорости счета, обеспечивающей заданную погрешность измерения

$$A_{\gamma\text{min}} = \frac{4\pi R^2 n_{\text{min}}}{kS\eta_{\text{эф}}}.$$

Минимальная активность источника связана с быстродействием t и погрешностью прибора δ :

$$n_{\min} = \frac{3}{2t\delta^2} = 64 \text{ с}^{-1}.$$

Минимальная активность источника при данной минимальной скорости счета $A_{\gamma\min} = 2,3 \cdot 10^5$ Бк.

Для данных условий эксплуатации приемлемым детектором является счетчик Гейгера–Мюллера, устойчивый к повышенным вибрациям при приземлении летательного аппарата.

Характеристики детектора

Длина 18 см, диаметр 2 см, площадь окна детектора 36 см².

Эффективность регистрации 1 %.

Разрешающее время $t_a = 10^{-4}$ с.

При скорости счета $n_{\text{изм}} = 100 \text{ с}^{-1}$ истинное число частиц, упавших на детектор

$$n_{\text{ист}} = \frac{n_{\text{изм}}}{1 - n_{\text{изм}} t_a} = 1,01 \cdot n_{\text{изм}}.$$

Таким образом, влиянием «мертвого» времени прибора на просчеты импульсов можно пренебречь.

Рабочее напряжение детектора 850 В; значение выходного сигнала 1 В.

На рис. П.1.3 представлена структурная схема проектируемого РИП.

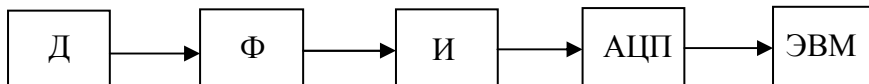


Рис. П.1.3. Структурная схема РИП:

Д – детектор; Ф – фомирователь импульсов; И – интегратор;

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

Уравнение шкалы прибора

$$n_{\text{изм}} = (A_{\gamma} / 10) \cdot kS\eta \cdot \sum_{m=1}^{10} \frac{1}{4\pi(19 + 2m)^2}.$$

Из уравнения шкалы прибора можно заметить, что по уменьшению скорости счета детектора можно судить о степени сгорания теплозащитного слоя обшивки космического аппарата при движении в атмосфере Земли.

Приложение 2

Примеры современных радиоизотопных приборов

П.2.1. Плотномер радиоизотопный «ПР-1026М»

Назначение

Бесконтактное непрерывное измерение плотности растворов и пульп, транспортируемых по трубопроводу, контроль и регулирование технологических процессов.

Область применения

Металлургическая, химическая, строительная, пищевая, целлюлозно-бумажная отрасли промышленности.

Принцип действия

Измерение величины интенсивности гамма-излучения при прохождении через потоки материалов различной плотности.

Достоинства и преимущества

- запатентованный способ автоматической компенсации дестабилизирующих факторов (патенты № 2073887 и № 1443624).
- Встроенный тестер контроля режимов.
- Проверка прибора на технологической точке.
- Термостатирование блока детектирования.
- Автоматическое обеспечение минимальной статистической погрешности.
- Применение широкодоступной отечественной элементной базы.
- 15-летний опыт промышленной эксплуатации.
- Возможна работа с источниками активностью меньше минимальной значимой активности.
- Внесен в Государственный реестр измерительных приборов за № 12820-91.
-

Таблица П.2.1

Основные характеристики

Контролируемая плотность, кг/м ³	500 – 3500
Диапазон измерений, кг/м ³	50 – 500
Основная приведенная погрешность, %	0,1 – 0,6
Наименьшая абсолютная погрешность, кг/м ³	1,0

продолжение табл. П.2.1

База измерений (диапазон возможных диаметров трубопроводов), м	0,1 – 0,5
Время установления показаний, с	1 – 300
Длина соединительного кабеля, м	500
Выходной сигнал, мА	4 – 20
Индикация	Стрелочная

Таблица П.2.2

Состав изделия

Датчик (блок детектирования)	БД-30
Измерительный блок	БОИ
Блок источника излучения	БГИ-А
Вторичный регистрирующий прибор	«ДИСК-250»
Рама монтажная	Рама
Комплект пластин-имитаторов контролируемой среды	Пластины-имитаторы

Таблица П.2.3

Технические характеристики блока детектирования
и измерительного блока

	БД-30	БОИ
Масса, кг	10	8
Габаритные размеры, мм	164x500x90	343x312x155
Исполнение	IP64	IP00
Рабочая температура, °С	От –30 до +50	От 0 до +50

П.2.2. Радиоизотопные релейные приборы РРП-1Т, РРП-3, РРПВЗ-1

Назначение

Радиоизотопные релейные приборы РРП-1Т, РРП-3, РРПВЗ-1 предназначены для бесконтактного позиционного контроля уровня жидких и сыпучих материалов, контроля границы раздела двух сред:

- РРП-1Т — моноблочное общепромышленное исполнение;
- РРП-3 — общепромышленное исполнение;
- РРПВЗ-1 — взрывоопасное исполнение.



Рис. П.2.1. Внешний вид радиоизотопного релейного прибора РРП-1Т



РРП-3 РРПВЗ-1

Рис. П.2.2. Внешний вид радиоизотопных релейных приборов РРП-3, РРПВЗ-1

Радиоизотопные релейные приборы РРП-1Т, РРП-3, РРПВЗ-1 позволяют контролировать:

- уровень материалов в закрытых сосудах, бункерах и других емкостях;
- забивку течек, желобов и зависание материалов на стенках бункера;
- наличие материала на ленте транспортера;
- изменения свойств (плотности) контролируемого объекта.

Состав изделия

- РРП-1Т: релейный блок, блок источника излучения;
- РРП-3, РРПВЗ-1: блок детектирования, блок источника излучения, блок обработки информации.

Таблица П.2.4

Основные характеристики

Минимальное время срабатывания, с: РРП-1Т: РРП-3, РРПВЗ-1: – объем памяти 4 разряда – объем памяти 8 разрядов	4±1 0,02 20
Питание, В	220 (50 Гц)
Температурный диапазон, °С: РРП-1Т: РРП-3, РРПВЗ-1: – для блока детектирования БДГ – для блока обработки информации БОИ	От –30 до +50 От –50 до +50 От –10 до +50
Длина кабеля БДГ – БОИ (для РРП-3, РРПВЗ-1), м	До 300
Габариты, мм: РРП-1Т: РРП-3, РРПВЗ-1: – блока детектирования БДГ – блока обработки информации БОИ	376 x 230 x 149 Ø 115 x 294 265 x 160 x 160
Масса прибора, кг	8
Масса, кг: РРП-1Т: РРП-3, РРПВЗ-1: – блока детектирования БДГ – блока обработки информации БОИ	8 4 6

Сергей Викторович Исаков

Ядерно-физические
контрольно-измерительные
приборы

Учебное пособие

Редактор Е.Г. Станкевич

Подписано в печать 15.11.2012. Формат 60x84 1/16

Печ. л. 3,75. Уч.-изд. л. 3,75. Тираж 175 экз.

Изд. № 10/1

Заказ № 67.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
115409, Москва, Каширское ш., 31.

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский»,
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д.42.