Рентгеновские телевизионные системы (РТС) можно разделить на две группы: РТС для рентгеноскопии и РТС для рентгенографии, хотя это деление достаточно условно. Появление этих систем вызвано, прежде всего, обострившейся за последние годы проблемой рентгеновской пленки. По времени раньше возникли РТС для рентгеноскопии (или просвечивания). В практике рентгенодиагностики они называются также усилителями рентгеновского излучения (УРИ) и включают в себя рентгеновский электронно-оптический преобразователь (РЭОП) и замкнутую телевизионную систему. УРИ позволили значительно уменьшить интенсивность рентгеновского излучения за счет снижения анодного напряжения и очень значительного уменьшения анодного тока. Так, например, съемка грудной клетки в режиме рентгенографии проводится при анодном токе 600 мА и напряжении 100 – 120 кВ, а при рентгеноскопии с РТС анодный ток составляет 3 – 5 мА, а напряжение 80 – 90 кВ. Таким образом, интенсивность излучения снижается в сотни раз, что позволяет соответственно увеличить время обследования. Как отмечалось выше, главной задачей РТС является не уменьшение дозы облучения (хотя и это тоже очень важно), а повышения достоверности диагностики, что достигается увеличением продолжительности наблюдения. РТС пока еще не исключают полностью применения рентгеновской пленки, но зато практически гарантируют безошибочность снимка, сделанного после предварительного обследования.

Первые РТС были аналоговыми, а для регистрации рентгеновских изображений в них использовались фото- и кинокамеры и видеомагнитофоны. Структурная схема такой РТС приведена на рис.1.

Рисунок 1. Структурная схема рентгено-телевизионной системы.


# В камере 1, защищающей от проникновения света и бокового рентгеновского излучения, находятся РЭОП 2, оптические системы 3, полупрозрачное зеркало 4, передающая телевизионная камера 5 и фотоаппарат 8. РЭОП преобразует рентгеновское излучение, прошедшее через объект, в оптическое изображение, которое оптическими системами и полупрозрачным зеркалом передается на телекамеру и фотоаппарат. Телекамерой управляет блок видеоканала 6 и передает видеосигнал в видеоконтрольное устройство (ВКУ) 6. Изображение может быть зарегистрировано также с помощью видеомагнитофона 9. Блок 10 осуществляет питание и управление системой. Наиболее важными узлами РТС, определяющими качество ее работы, являются РЭОП и передающая телекамера. Рассмотрим их более подробно. Так как аббревиатура «РЭОП» распространена в литературе по рентгеновской технике, будем обращаться с ней, как со словом. Устройство и принцип действия РЭОПа поясняет рис.2.

Рисунок 2. Рентгеновский электронно-оптический преобразователь.

РЭОП представляет собой крупногабаритный электровакуумный прибор с остаточным давлением 1 – 5⋅10-7 мм рт. ст. Внутри колбы находятся фотокатодный узел, состоящий из входного флуоресцентного экрана 1 и фотокатода 2, система электродов 3,4,5 и выходной люминесцентный экран 6. Флуоресцентный слой (CaWO4 или CsI) и слой фотокатода (Cs) нанесены с двух сторон тонкой стеклянной пластины толщиной 200 мкм. Световые фотоны, излучаемые под действием рентгеновского излучения, выбивают из фотокатода электроны, которые ускоряются и фокусируются системой электродов. Электрод 1 (подфокусирующий) представляет собой слой аммония, напыляемый на внутреннюю поверхность колбы. Энергия электронного потока, выходящего из фотокатода, увеличивается за счет прилагаемых к электродам высоких напряжений. Одновременно увеличивается плотность электронов за счет сжатия электростатическими линзами. Электроны бомбардируют выходной экран 6, представляющий собой мелкозернистый люминограф, напыленный на внутреннюю сторону окна колбы. Диаметр входного окна современных РЭОПов составляет 220 – 350 мм. Начинается выпуск РЭОПов с диаметром входного окна до 550 мм.

Наряду с РЭОПами в рентгеновских телевизионных системах применяют и ЭОПы – электронно-оптические преобразователи. От РЭОПов они отличаются отсутствием у них рентгеновского люминесцентного экрана. Поэтому они служат для усиления яркости оптического изображения, получаемого на внешнем люминесцентном экране. Обычно габариты ЭПОв значительно меньше, чем РЭОПОв.

Важнейшими параметрами РЭОПа, определяющими его усилительно-преобразовательные свойства и влияющими на качество конечного изображения, являются коэффициент преобразования, коэффициент усиления, разрешающая способность, шумовые параметры, частотно-контрастная характеристика, динамический диапазон.

Коэффициент преобразования есть отношение яркости выходного экрана к мощности дозы входного излучения

η = B/P [кд⋅м-2/мР⋅с-1].

Коэффициент преобразования η зависит от ряда параметров и определяется формулой

η = ηвх.экр ⋅γ⋅Γ2⋅Ua⋅L , (1)

где ηвх.экр – коэффициент преобразования входного экрана ( 2⋅10−2кд⋅м-2⁄мР⋅с-1), γ - чувствительность фотокатода (15 мкА/млк) , Г – коэффициент элетронно-оптического уменьшения (1), Ua – напряжение основного анода 5 (25 кВ), L – светоотдача выходного экрана (12 кд/Вт). В скобках указаны типичные значения параметров. Для них коэффициент преобразования будет равен 110 кд⋅м-2⁄мР⋅с-1.

Коэффициент усиления представляет собой отношение интенсивности выходного оптического излучения к интенсивности входного рентгеновского излучения. Даже с учетом потерь в оптической системе он достигает нескольких тысяч.

Разрешающая способность РЭОПа оценивается количеством различимых пар линий на 1 мм в центре выходного экрана.

Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) представляет собой зависимость контраста изображения объекта от пространственной частоты. Понятно, что передача контраста и разрешающая способность – взаимосвязанные величины.

Динамический диапазон есть отношение интенсивностей РИ, при которых устройство обеспечивает различение некоторого порогового (обычно 5%) контраста одновременно в верхнем и нижнем интервалах рабочих мощностей доз. Динамический диапазон РЭОПов обычно значительно превосходит динамический диапазон яркости ВКУ (около 30 дБ). Параметры некоторых типов РЭОП приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры рентгеновских электронно-оптических преобразователей.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметр | РЭОПRBV 250/150«Сименс» (ФРГ) | РЭОП«ЗОКС-270» | РЭОПфирмы CGR |
| Размер рабочего поля, ммКоэффициент преобразования, кд/м2/мР/сРазрешающая способность, пл/ммКонтрастная чувствительность, %Коэффициент контраста (10% площади)Анодное напряжение, кВ | 250/1501703 – 4225 - 30 | 230/1501403 – 4325 | 400/300/2201203,6/4,2/4,815:1 |

Для считывания оптического изображения с выходного экрана РЭОПа и передачи его в оптический канал применяют различные фотоэлектрические преобразователи ФЭП – в основном это передающие трубки типа видикон и ФЭП матричного типа на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Трубки

типа видикон характеризуются высокой световой чувствительностью и высокой разрешающей способностью. Существует несколько разновидностей видиконов: плюмбикон (с окисло-свинцовой мишенью), кремникон (с полупроводниковой мишенью на основе кремния) и др.

На рис.3 показано устройство видикона типа плюмбикон.

Рисунок 3. Устройство видикона.

Видикон представляет собой стеклянный вакуумный баллон 1, внутри которого на торцевой поверхности нанесена светочувствительная мишень 2. Последняя состоит из прозрачной металлической пленки, называемой сигнальной пластиной, и контактирующего с ней тонкого фотопроводящего слоя. Вид этого слоя и определяет тип видикона (плюмбикон, кремникон, кадмикон). Сигнальная пластина соединена с металлическим кольцом 3, которое выведено наружу баллона.

Вторым функциональным узлом видикона является электронный прожектор, включающий в себя подогревный катод 4, модулятор 5 и аноды 6. Он обеспечивает ускорение и формирование узкого пучка электронов. Непосредственно у сигнальной пластины расположена мелкоструктурная сетка 8, которая создает равномерное тормозящее поле перед мишенью. Благодаря этому электроны падают перпендикулярно на фотослой по всей его площади. Фокусировку и отклонение электронного луча 7 обеспечивает магнитная фокусирующе-отклоняющая система. Для фокусировки электронного луча используется соленоид 9. Пролетающие сквозь него электроны группируются (закручиваются по спирали) вблизи его оси. Отклонение луча производится парами отклоняющих катушек 10 – горизонтальной (строчной) и вертикальной (кадровой).

Изображение проецируется на светочувствительный слой мишени. В результате каждый ее элементарный участок приобретает электрический заряд. Образуется так называемый потенциальный рельеф. Электронный луч, взаимодействуя с каждой точкой потенциального рельефа, как бы стирает (нейтрализует) ее потенциал. При этом через сопротивление нагрузки Rн, протекает ток, который будет зависеть от освещенности участка мишени, куда попадает электронный луч. Таким образом, на нагрузке выделяется видеосигнал. Его напряжение будет изменяться от уровня «черного», соответствующего наиболее темным участкам передаваемого изображения, до уровня «белого», соответствующего наиболее светлым участкам.

В РТС используются передающие трубки типа плюмбикон ЛИ-432, ЛИ-444, ЛИ-447, ЛИ-450.

Рассмотрим некоторые особенности видеоканала рентгеновских телевизионных систем. РТС представляют собой телевизионные системы замкнутого типа (ЗТС). Они не связаны с другими телевизионными системами и при их проектировании не обязательно соблюдение стандартов телевизионного вещания. Однако общие принципы формирования телевизионных сигналов и растра телевизионного изображения сохраняются.

Как правило, видеоконтрольные устройства (ВКУ), предназначенные для РТС, работают со стандартными телевизионными сигналами. Изображение на ВКУ формируется с помощью кадровой и строчной развертки, причем один кадр состоит из двух полукадров, или полей, с частотой 50 Гц. При этом строки в полукадрах чередуются – чересстрочнная развертка (рис.4).

Рисунок 4. Формирование телевизионного растра.

В результате частота кадров получается равной 25 Гц. Такой способ развертки позволяет вдвое уменьшить полосу частот видеосигнала. Стандартные параметры растра вещательного телевидения: число строк разложения – 625; частота полей – 50; число кадров в секунду – 25; частота строк – 15625 Гц.

Полоса частот, необходимая для передачи видеосигнала, определяется по формуле

,

где n – число кадров в секунду, N – число элементов разложения. Его можно определить по формуле N = к⋅z2, где к – формат изображения; z – число строк разложения. Для к = 4/3 и z = 625 N = 520000. Реально, за счет потерь на обратном ходе строчной развертки, величина N составляет 500000, а полоса частот видеосигнала F = 6,25 МГц. Для РТС эта величина может быть снижена до 5 – 5,5 МГц.

Для правильной работы всей системы необходима жесткая синхронизация передающего и приемного устройств. Она осуществляется под управлением общего генератора со стабильной (опорной) частотой и делителей, которые вырабатывают импульсы для синхронизации строчной и кадровой развертки передатчика и приемника. Необходимы также специальные импульсы для гашения луча при обратном ходе строчной и кадровой разверток. Длительности синхроимпульсов соответственно равны: ССИ – 4,7 мкс; КСИ – 166 мкс; импульсов гашения: СГИ – 12 мкс; КГИ – 1612 мкс. Период одной строки равен 1/15625 = 64 мкс, а длительность ее рабочего хода (за вычетом времени СГИ) – 52 мкс.

Все эти импульсы вместе с видеосигналом объединяются в так называемый полный телевизионный сигнал (ПТС). Форма ПТС показана на рис.5. На нем изображены только строчные синхронизирующие и гасящие импульсы. Соответствующие кадровые импульсы намного длиннее и, кроме того, кадровый синхроимпульс представляет собой сигнал сложной формы. Полный телевизионный сигнал генерируется в видеоканале.

Рисунок 5. Полный телевизионный сигнал.

Типичная структурная схема видеоканала, включая передающую камеру, представлена на рис.5. В передающей телевизионной камере, механически и оптически сопрягаемой с РЭОПом, расположены передающая трубка 1 с фокусирующе-отклоняющей системой (ФОС) 2 и блоком режимов трубки 3, а также видеоусилитель 4 и генератор строчной развертки 5. Оптическая фокусировка обеспечивается с помощью перемещения ФОС вместе с трубкой относительно объектива РЭОПа 6.

Генератор строчной развертки 5 обеспечивает формирование в магнитной системе пилообразного тока строчного отклонения амплитудой около 200 мА для получения номинального размера растра на мишени передающей трубки.

Блок режимов трубки служит для питания напряжениями ее электродов и для усиления сигналов гашения обратного хода электронного луча передающей трубки.

Выходной сигнал предварительного усилителя поступает в аппаратный блок на вход усилителя канала 7. Он осуществляет дополнительное усиление и замешивание в видеосигнал гасящих и синхронизирующих импульсов, формируя полный телевизионный сигнал. В него входит также γ-корректор 8, который обеспечивает различные формы амплитудной характеристики. В аппаратном блоке имеются также генератор кадровой развертки 9, генератор компенсирующих сигналов специальной формы 10 для компенсации специфических искажений, обусловленных особенностями трубки.

Синхронная и синфазная работа всех блоков осуществляется под управлением синхрогенератора 11, который вырабатывает следующие импульсы: сигнал синхронизации приемников; строчные и кадровые синхронизирующие импульсы; гасящие импульсы передающей трубки и приемников; импульсы фиксации (об их назначении будет сказано ниже). Блок питания 12 снабжает питающими напряжениями все узлы видеоканала.

Наиболее ответственным аналоговым узлом видеоканала является предварительный усилитель передающей камеры. От него в наибольшей степени зависит качество изображения. Поэтому к нему предъявляются повышенные требования в отношении собственных шумов, полосы пропускания, неравномерности АЧХ.

Следует иметь в виду, что выходной ток передающих трубок (и ПЗС матриц) чрезвычайно мал: у современных трубок он не превышает 1 мкА. Поэтому входное сопротивление усилителя должно быть весьма большим. Необходимо также учитывать, что в тракте усиления имеются разделительные конденсаторы, которые не пропускают постоянную составляющую видеосигнала, характеризующую средний уровень яркости изображения. Этот уровень восстанавливают посредством специальных цепей фиксации.

Рисунок 6. Структурная схема видеоканала РТС.

Структурная схема предварительного усилителя показана на рис.7. На ней для лучшего понимания его особенностей показаны схемные фрагменты некоторых узлов. Усилитель условно разбит на три каскада. В свою очередь первый каскад состоит из двух каскадов, выполненных по каскодным схемам, что обеспечивает хорошую развязку между входом и выходом. Как уже отмечалось, выходной ток передающих трубок очень мал. Поэтому входной каскад видеоусилителя должен обладать малыми собственными шумами и большим входным сопротивлением. Для этих целей подходят полевые транзисторы. Например, транзистор КП307Б имеет собственные шумы Еш= 2,5

Входной сигнал поступает с сигнальной пластины передающей трубки через разделительную емкость С1, на которой теряется средняя величина видеосигнала. Для получения равномерной АЧХ в диапазоне 50 Гц – 6,25 МГц необходимо прежде всего уменьшать ее спад в области верхних частот, который происходит за счет влияния паразитных параметров. Это достигается применением глубоких отрицательных ОС и корректирующих RC-цепочек R2C2, R3C3. Например, цепочка R2C2, включенная в цепь отрицательной ОС, с ростом частоты уменьшает глубину ОС и тем самым препятствует спаду коэффициента усиления. Параллельная отрицательная ОС, охватывающая первый и второй каскады имеет большую глубину. Поэтому сигнал на выходе второго каскада будет равен Ic⋅R1. Например, при Ic =0,5 мкА и R1 = 300 кОм Uвых2= 0,15 В.

Рисунок 7. Предварительный усилитель видеосигнала.

Восстановление среднего значения видеосигнала (т.е. возвращение ему характера униполярности) происходит на входе третьего каскада. Это делается с помощью ключа Sф, управляемого строчными синхроимпульсами. Вначале каждой строки он кратковременно замыкается и разряжает постоянную составляющую напряжения конденсатора С4. Благодаря этому видеоимпульсы на входе третьего каскада начинаются с нуля. Это называется фиксацией уровня черного. Постоянная времени в цепи конденсатора С4 выбирается намного больше длительности строки, чтобы за это время он не успел заметно зарядиться.