

СЗУЧ.Зте  
3-91

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



9/11-78

4962 / 2-78

13 - 11731

А.М.Зубарева, С.Илиев, А.Н.Кузнецов,  
В.Г.Субботин

ЭЛЕКТРОНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО  
СПЕКТРОМЕТРА  
С ИМПУЛЬСНОЙ СВЕТОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

1978

13 - 11731

А.М.Зубарева, С.Илиев, А.Н.Кузнецов,  
В.Г.Субботин

ЭЛЕКТРОНИКА РЕНТГЕНОВСКОГО  
СПЕКТРОМЕТРА  
С ИМПУЛЬСНОЙ СВЕТОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ



Зубарева А.М., Илиев С., Кузнецов А.Н., Субботин В.Г. 13 - 11731

Электроника рентгеновского спектрометра с импульсной световой обратной связью

Приведена электроника рентгеновского спектрометра с импульсной световой обратной связью. Подробно рассмотрены принципиальные схемы блоков. Представлены результаты, показывающие качество работы электроники при различной частоте следования входных сигналов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Zubareva A.M. et al.

13 - 11731

Electronics of X-Ray Spectrometer with a Pulse Light Feedback

Electronics of x-ray spectrometer with a pulse light feedback is presented. Electric circuits of any blocks are considered in detail. The results are given that illustrate the quality of electronics operation at different frequency of input pulses.

The investigation has been performed at the Laboratory Nuclear Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

## ВВЕДЕНИЕ

В спектрометрах рентгеновского излучения с импульсной световой обратной связью основным источником шума является шум канала полевого транзистора. Последовательный тепловой шум канала уменьшают увеличением постоянных времени формирования в усилителе. Оптимум разрешения соответствует длительности сформированного импульса в десятки и даже сотни микросекунд. Время нарастания приблизительно равно времени спада импульса.

Большая длительность импульсов приводит к состоянию высокой интенсивности следования сигналов в усилителе, начиная со средних частот в несколько килогерц, и очень часто исключает прямое применение преобразователей амплитуда-код, так как большинство из них измеряют импульсы с передними фронтами, не превышающими нескольких микросекунд. Перепад напряжения на выходе предусилителя с импульсной световой обратной связью при его восстановлении превышает амплитуду одиночной ступеньки напряжения, вызываемой фотонами рентгеновского излучения, в 100-1000 раз. При восстановлении в усилителе возникает перегружающий импульс, полярность которого противоположна полярности импульсов, вызываемых рентгеновским излучением.

Чтобы реализовать разрешение спектрометра, необходимо: сформировать выходной импульс спектрометра, измеряемый анализатором; принять меры, уменьшающие сдвиг и уширение пиков амплитудного распределения при большой интенсивности; исключить импульсы само-

наложений; заблокировать усилительный тракт на время восстановления предусилителя.

Ниже приведены схемные решения электронных блоков, в которых сделана попытка разрешить поставленные задачи.

## ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ И УСИЛИТЕЛЬ

Принципиальная схема предусилителя изображена на рис. 1. Основу входного чувствительного к заряду каскада составляет каскодная пара полевого транзистора (2N4416) с биполярным транзистором. Кристалл полевого транзистора переставлен в специально изготовленный корпус из нитрида бора. В этом же корпусе монтируется световой диод. Конструкция оправки, в основном, повторяет конструкцию, приведенную ранее в работе<sup>1/</sup>.

Усилитель (рис. 2) состоит из трех аналогичных каскадов, выполненных по схемам работы<sup>2/</sup>. Первый и второй каскады одинаковы, имеют полевые транзисторы на входе и коэффициент усиления без обратной связи около  $5 \cdot 10^3$ . Третий каскад отличается включением на вход пары биполярных транзисторов, и его коэффициент усиления около  $10^5$ . Уровень выходного напряжения третьего каскада стабилизируется схемой стабилизации уровня, которая является усовершенствованием схемы<sup>3/</sup> применительно к однополярным выходным сигналам.

Формирование импульса осуществляется двумя активными и пассивными RC-фильтрами с постоянной времени 8 мкс. Переходная характеристика усилителя не имеет выбросов обратного знака, что существенно для нормальной работы схемы стабилизации выходного уровня. Длительность сформированного импульса на уровне 10% от максимальной амплитуды составляет 34 мкс, на уровне 1% 68 мкс.

Коэффициент усиления изменяется в 9 раз кнопочным переключателем и гелипотом, расположенными на лицевой панели блока. Диапазон усиления может быть легко

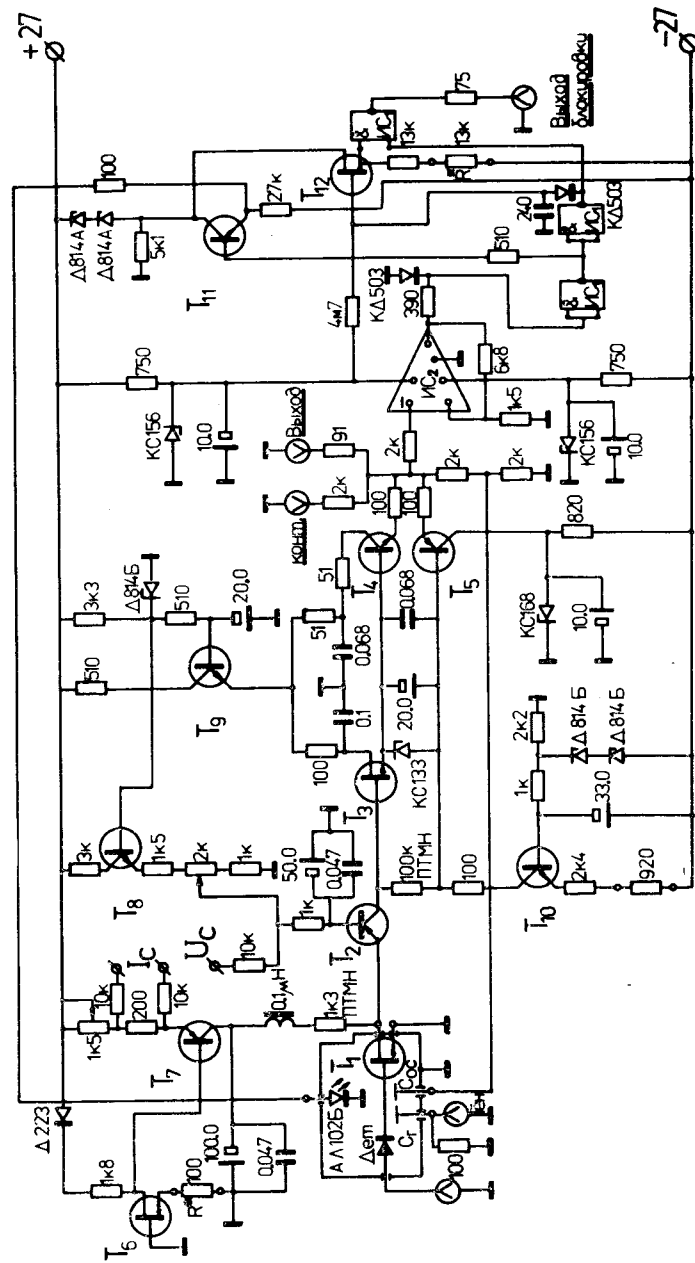


Рис. 1. Принципиальная схема предусилителя. Т<sub>1</sub> - 2N4416, Т<sub>2</sub> - ГТ308Б, Т<sub>3</sub> - КП303Г, Т<sub>4</sub> - КТ325Б, Т<sub>5</sub> - КТ326Б, Т<sub>6</sub> - КП303Г, Т<sub>7</sub> - КТ345 или КТ326Б, Т<sub>8</sub>, Т<sub>10</sub>, Т<sub>11</sub> - КТ312Б, Т<sub>9</sub> - КТ603, Т<sub>12</sub> - КП303Б, ИС<sub>1</sub> - К1ЛБ553, ИС<sub>2</sub> - К1УТ401А, Б.

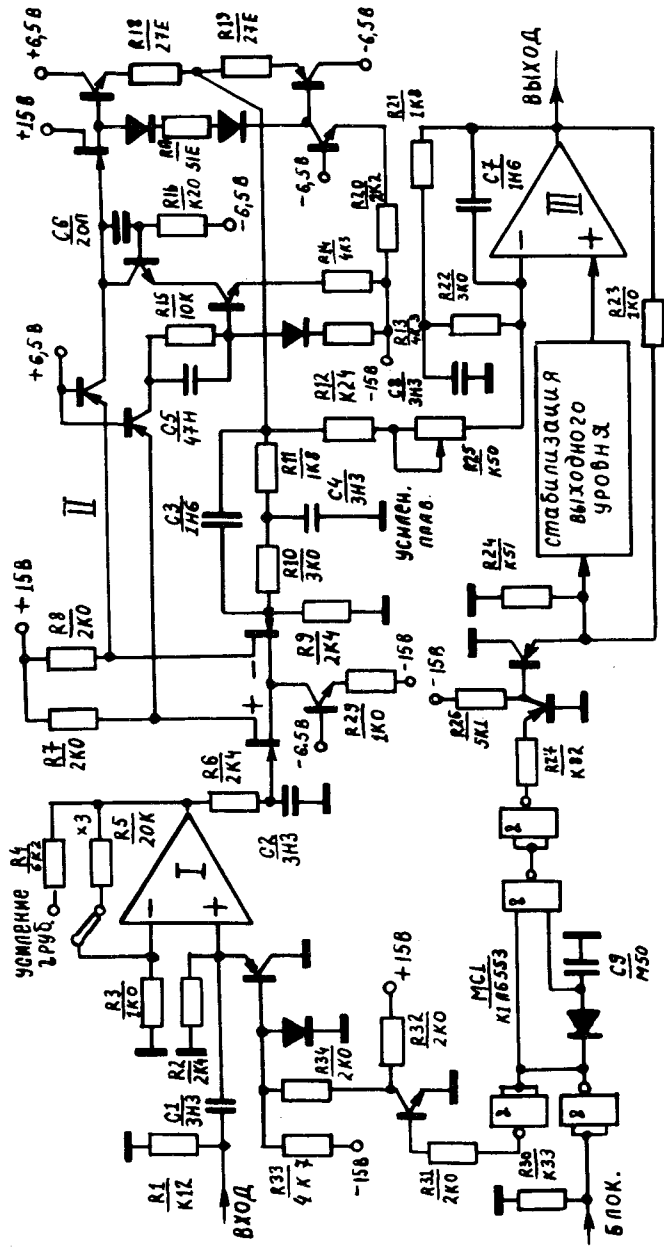


Рис. 2. Принципиальная схема усилителя. Полевые транзисторы - КП303Г, биполярные р-р-р - КТ326Б, п-р-п - КТ316В; диоды - КД503А. Каскады I и III аналогичны каскаду II и показаны условно.

изменен соответствующим подбором резисторов при работе с конкретным предусилителем. В данной работе усиление регулируется в пределах 85-765.

Защита усилителя на время импульса восстановления<sup>1/</sup> осуществляется транзисторными ключами. Блокируется вход усилителя и вход схемы стабилизации выходного уровня. Напряжение насыщения ключей составляет величину 1-2 мВ, так что усилитель не перегружается. Блокировка входа синхронна с импульсом восстановления предусилителя, а длительность блокировки схемы стабилизации увеличена на время окончания переходных процессов (~100 мкс) от блокировки входа.

В блоке осуществлена дополнительная стабилизация источников питания. Потребляемый ток от источника +27 В составляет 80 мА, от источника -27 В - 60 мА. Схема работоспособна при изменении напряжения источников питания на ±20%.

## УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ И ОТБОРА СИГНАЛОВ

Выходная часть спектрометра состоит из устройства формирования и отбора сигналов, которое формирует импульс для анализатора и исключает импульсы самоналожений, возникающие при высокой интенсивности статистически следующих событий.

Особенности схемных решений этого устройства подробно изложены в ранее опубликованной работе<sup>4/</sup>. Ниже рассматриваются принципиальные схемы и основные узлы формирователя и инспектора наложений.

На рис. 3, 4 приведены соответственно блок-схема и принципиальная схема формирователя.

При работе формирователя в спектрометре с основным усилителем, представленным выше, обеспечивается гальваническая связь с входом формирователя. Усиленный и сформированный основным усилителем импульс отрицательной полярности поступает на вход порогового усилителя

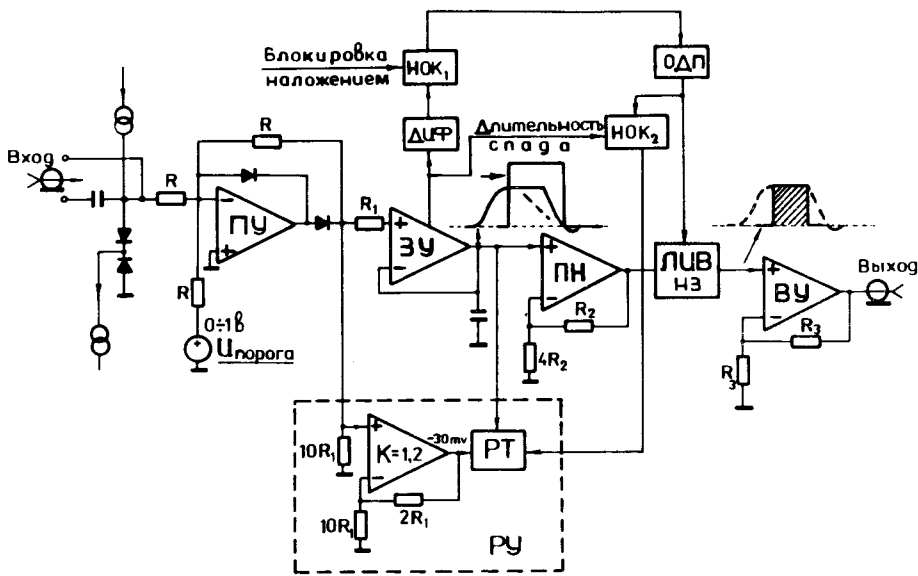


Рис. 3. Блок-схема формирователя спектрометрических импульсов. ПУ - пороговый усилитель, ЗУ - зарядное устройство, РУ - разрядное устройство, РТ - разрядный транзистор, ПН - повторитель напряжения, НОК<sub>1</sub>, НОК<sub>2</sub> - нормально открытые клапаны, ОДП - одновибратор памяти, ЛИВ - нормально закрытые линейные импульсные ворота, ВУ - выходной усилительный каскад.

ПУ<sup>7/</sup>, собранного на интегральной схеме ИС<sub>1</sub>. Уровень дискриминации порогового усилителя устанавливается гелипотом в пределах от 0 до 1 В. Положительный импульс с выхода ПУ поступает непосредственно на зарядное устройство ЗУ (Т<sub>0</sub>-Т<sub>7</sub>)<sup>8/</sup>, и одновременно - на разрядное устройство РУ (ИС<sub>2</sub>, Т<sub>8</sub>) (рис. 4). Входной импульс ЗУ, усиленный ИС<sub>2</sub> (K<sub>ус</sub>=1,2) и смещенный (на 30 мВ) ниже уровня земли, подается в исток полевого транзистора Т<sub>8</sub>. По истечении времени памяти источно закрытый полевой транзистор Т<sub>8</sub> открывается, и

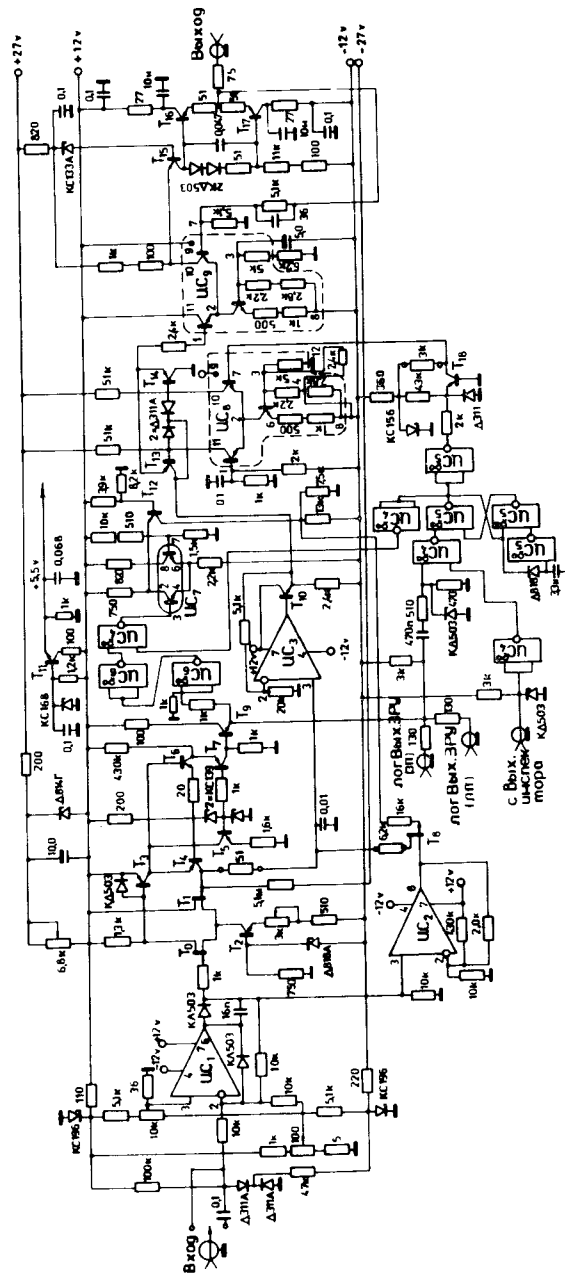


Рис. 4. Принципиальная схема формирователя спектрометрических импульсов. Т<sub>0</sub>, Т<sub>1</sub> - КП303Г, Т<sub>2</sub>, Т<sub>5</sub>, Т<sub>9</sub> - КП303Б, Т<sub>8</sub> - КП303В, Т<sub>3</sub>, Т<sub>4</sub>, Т<sub>6</sub>, Т<sub>7</sub>, Т<sub>12</sub>, Т<sub>15</sub>, Т<sub>17</sub> - КТ326А, Т<sub>10</sub>, Т<sub>16</sub> - КТ312Б, Т<sub>11</sub> - КТ602, Т<sub>13</sub>, Т<sub>14</sub> - ПЗО, ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub>, ИС<sub>3</sub> - операционный усилитель с полевыми транзисторами на входе; ИС<sub>4</sub>, ИС<sub>5</sub>, ИС<sub>6</sub> - ЛБ553, ИС<sub>8</sub>, ИС<sub>9</sub> - МА3005, ИС<sub>7</sub> - К1НТ591.

начинается разряд запоминающей ёмкости, следящий за импульсом в истоке  $T_8$ .

Когда на вход формирователя приходит спектрометрический импульс, то в момент прохождения вершины на выходе ЗУ ( $\Delta T_9$ ) появляется логический импульс. Последний своим передним фронтом запускает одновибратор памяти ОДП, задающий время памяти запоминающей ёмкости и время открывания линейных ворот  $T_{13-14}$ ,  $ИС_8$ . Этот же одновибратор блокирует НОК<sub>2</sub>, задерживая разряд запоминающей ёмкости. Разряд последней происходит через полевой транзистор  $T_8$ , который открывается только после окончания времени памяти и длится до тех пор, пока напряжение на ёмкости не станет более отрицательным, чем на входе ЗУ. В этот момент логический импульс ЗУ прекращается, и ЗУ перебрасывается в исходное состояние. Схема готова к следующему воздействию.

Спектрометрический импульс с плоской вершиной (с запоминающей ёмкости) последовательно поступает на усилитель-повторитель напряжения ПН ( $ИС_3, T_{10}$ ), линейные ворота ЛИВ ( $T_{13-14}, ИС_8$ ) и выходной усилительный каскад ВУ ( $ИС_9, T_{15} - T_{17}$ ). Все перечисленные узлы между собой связаны гальванически. Усилитель-повторитель ПН собран на ОУ с полевыми транзисторами на входе.

Температурная нестабильность исходного входного уровня линейных ворот определяется температурной нестабильностью  $ИС_3$  и полевых транзисторов ЗУ. Измерения, проведенные нами, показали, что основной вклад в нестабильность вносят полевые транзисторы на входе ЗУ. Нестабильность, измеренная на входе ворот, составляет 500 мкВ/°С.

На рис. 5,6 приведены блок-схема и принципиальная схема инспектора наложений. Импульс предусилителя дважды дифференцируется на входе схемы и подается на вход быстрого усилителя. Быстрый усилитель представляет собой два идентичных гальванически связанных между собой каскада У. Каждый усилительный каскад

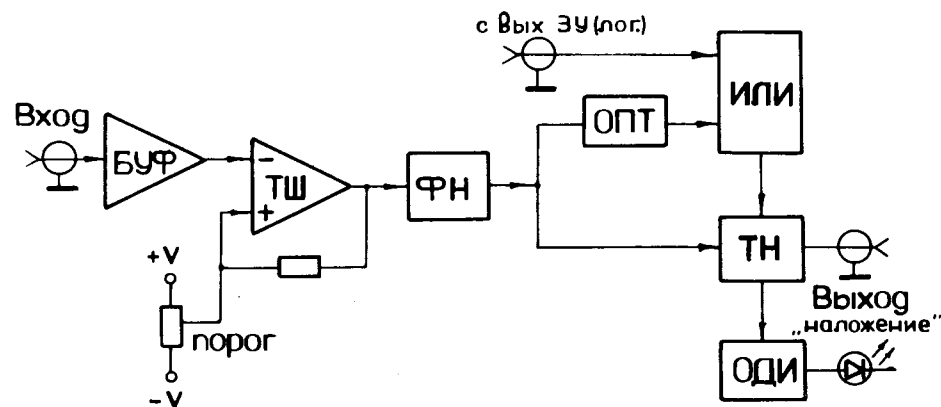


Рис. 5. Блок-схема инспектора наложений. БУФ - быстрый усилитель формирователь с двойным дифференцированием на входе, ТШ - триггер Шмитта, ФН - формирователь начала спектрометрических импульсов, ОПТ - одновибратор продлевающегося типа, ТН - триггер наложений, ОДИ - одновибратор для индикации.

собирается по схеме, предложенной в работе<sup>5/</sup> с использованием в качестве дифференциального каскада интегральных схем. Амплитуда выходного импульса регулируется потенциометром, выведенным на лицевую панель с надписью "порог". Выходной уровень усилителя стабилизируется цепью отрицательной обратной связи, содержащей операционный усилитель с дифференциальными входами, и интегрирующую цепь с большой постоянной времени. Временная привязка к началу спектрометрического импульса осуществляется триггером Шмитта "У". Длительность выходного импульса триггера Шмитта зависит от амплитуды и от уровня порога. Передним фронтом этого импульса запускается формирователь ФН ( $ИС А$ ), фиксирующий начало каждого спектрометрического импульса. Длительность выходного импульса формирователя равна 0,3 мкс. В качестве формирователя используется одновибратор<sup>6/</sup>, срабатывающий от положительного перепада входного сигнала.

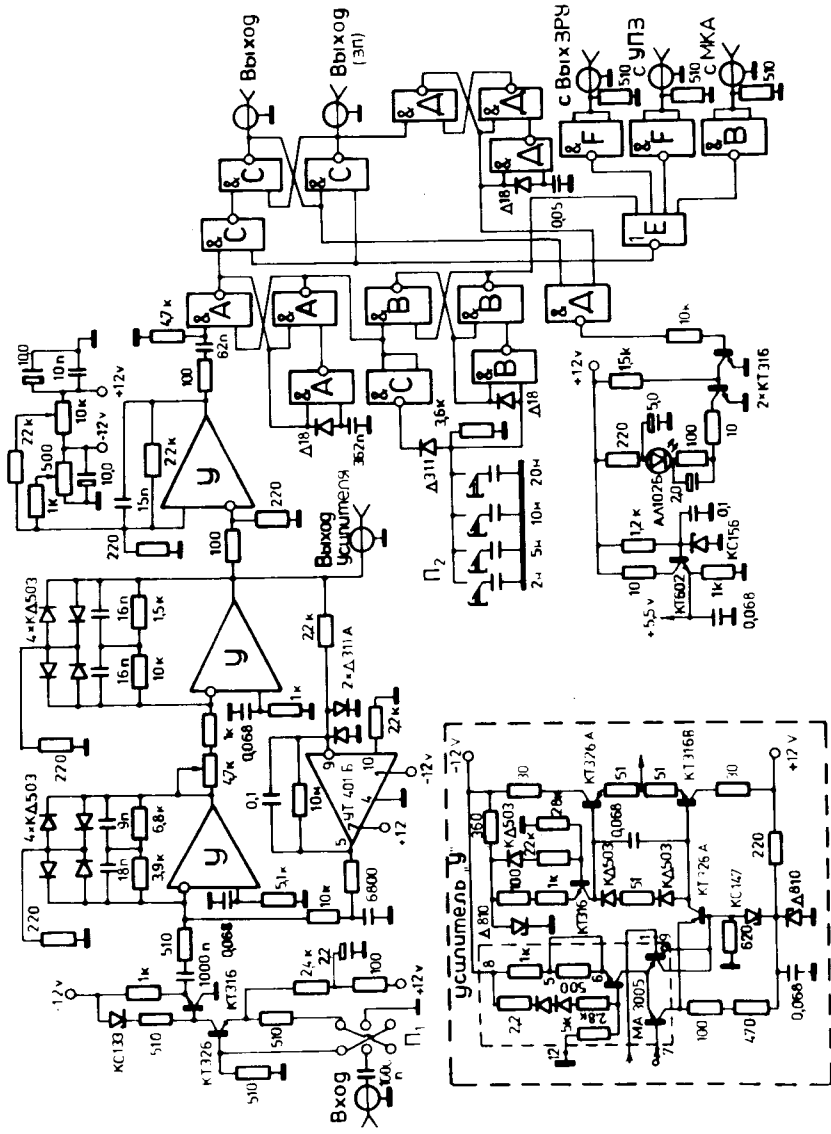


Рис. 6. Принципиальная схема инспектора наложений, ИС А, ИС В, ИС С, ИС Д, ИС Е - КИЛБ553, ИС Е-КИЛБ551.

Задний фронт импульса "формирователя начала" приводит в действие (ОПТ)-одновибратор продлевающегося типа - ИС В, который формирует импульс, соответствующий времени нарастания спектрометрического импульса, поступающего на вход формирователя (с задержкой, равной длительности импульса ФН). Переключателем емкостей  $\Pi_2$ , выведенным на лицевую панель, можно выбрать длительность импульса одновибратора ОПТ, соответствующую времени нарастания фронта одиночного спектрометрического импульса. ОПТ работает таким образом, что если во время нарастания входного сигнала, идущего на формирователь, придет "следующий", то с этого момента ОПТ продлит свою длительность на величину длительности, установленной переключателем  $\Pi_2$ .

Поскольку "следующий" импульс может прийти не только во время нарастания спектрометрического импульса, но и во время его спада, то необходимо иметь полную длительность спектрометрического импульса. Это осуществляется в схеме ИЛИ (ИС Е), на которую, с одной стороны, подается импульс с ОПТ, а с другой, через внешний разъем, - логический импульс с зарядно-разрядного устройства формирователя. Импульс, соответствующий полной длительности спектрометрического и импульс "формирователя начала" подаются на входы триггера наложений ТН (ИС С), который срабатывает от каждого импульса, начиная со второго, и отпускает в тот момент, когда заканчивается логический импульс ЗРУ. Имеется индикация наложений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Рис. 7-9 демонстрируют работу спектрометра при высокой интенсивности следования событий. Длительность спектрометрического импульса по основанию на уровне 1% составляет 68 мкс.

На рис. 7 приведены спектры X-лучей К-серии Mn (источник  $^{55}\text{Fe}$ ) для разных интенсивностей. Разрешение ухудшается на 35% при изменении интенсивности от 300 имп/с до  $1,1 \cdot 10^4$  имп/с, а смещение пика составляет (0,2 - 0,3)%. Для интенсивности  $2 \cdot 10^4$  имп/с разрешение ухудшается на 55%, и сдвиг пика составляет уже



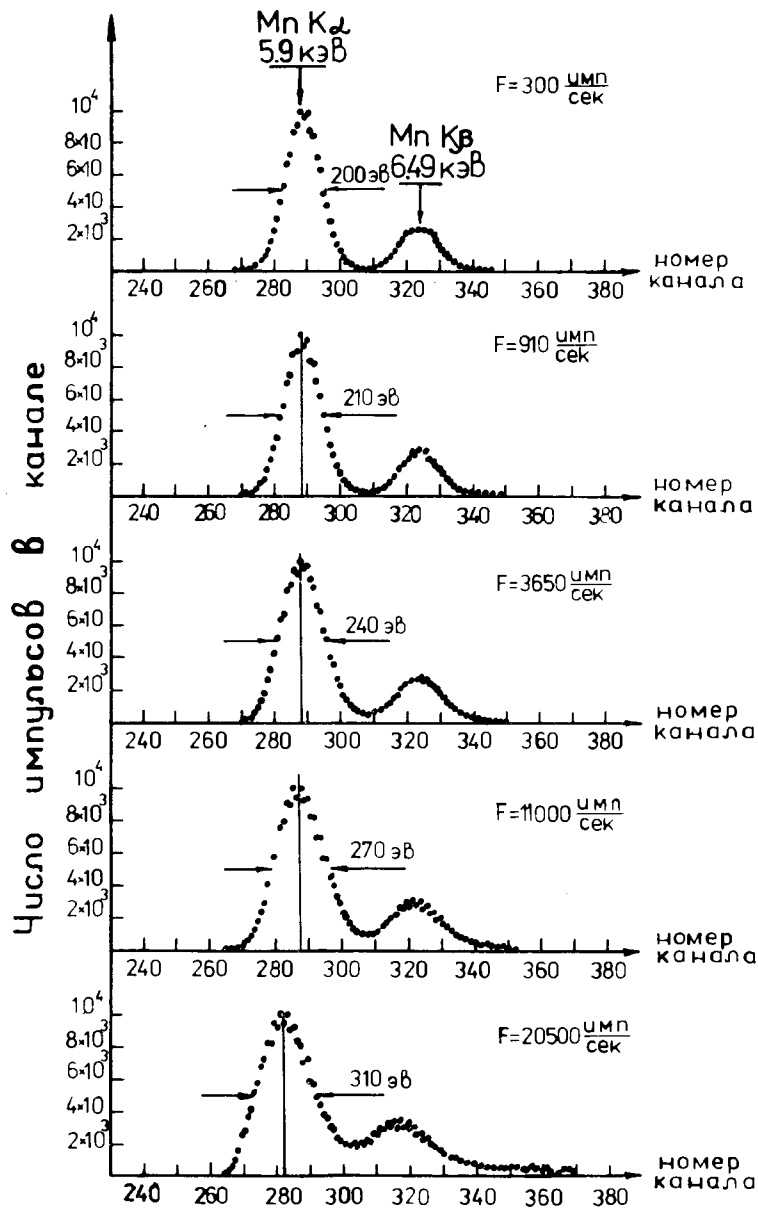


Рис. 7. Спектры X-лучей K-серии Mn (источник  $^{55}\text{Fe}$ ) для разных значений интенсивности.

1,7%. Надо иметь в виду, что для интенсивности  $2 \cdot 10^4$  имп/с средний период следования импульсов меньше длительности импульса.

На рис. 8 изображены спектры, полученные с источником  $^{55}\text{Fe}$ , для интенсивности  $1,05 \cdot 10^4$  имп/с. Верхний спектр без схемы, исключая наложения, и нижний спектр с инспектором наложений. Сравнение спектров демонстрирует, что частично наложенные импульсы эффективно исключаются.

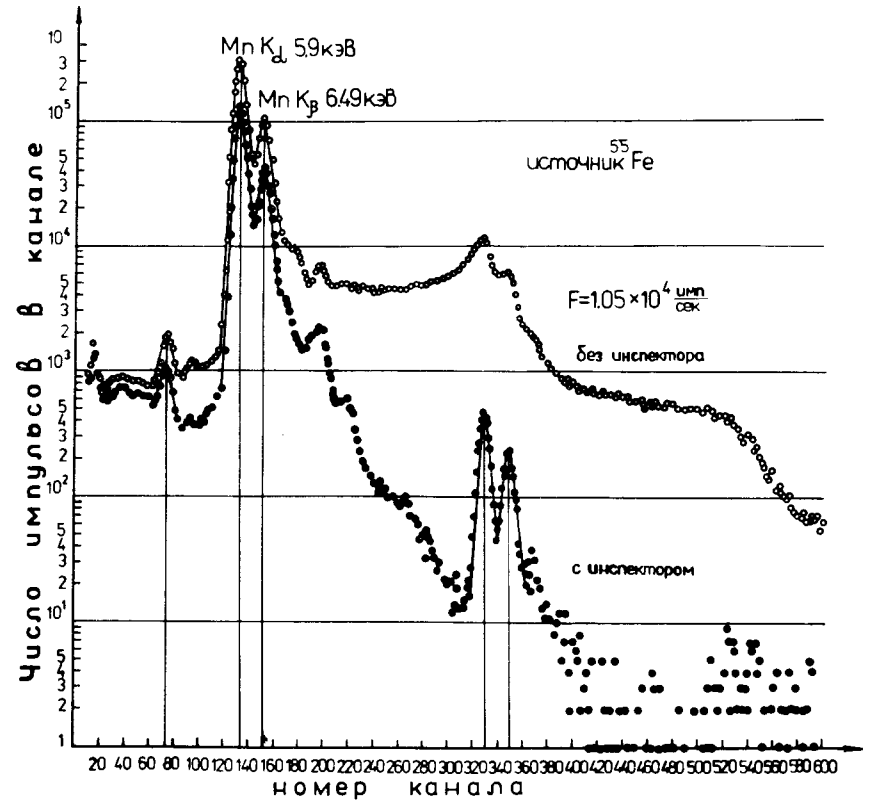


Рис. 8. Спектры X-лучей Mn для интенсивности  $1,05 \cdot 10^4$  имп/с при использовании инспектора наложений и без него.

На рис. 9 приведена зависимость интенсивности на выходе формирователя спектрометрических импульсов от входной интенсивности.

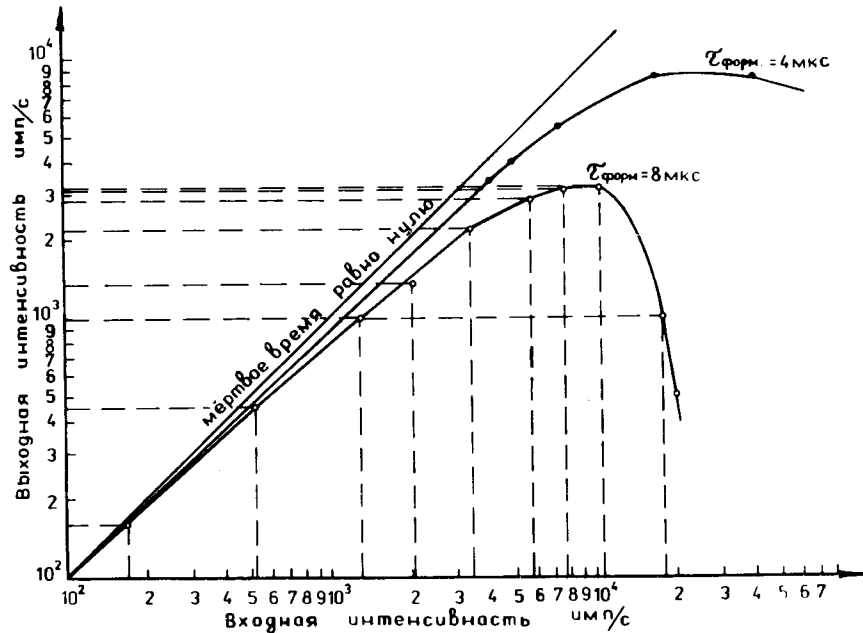


Рис. 9. Зависимость интенсивности на выходе формирователя от входной интенсивности. Кривая для  $\tau_{\text{форм}} = 4$  мкс взята из работы [1].

Из представленных характеристик видно, что полная интенсивность в спектрометрическом тракте для отмеченной формы сигнала в усилителе не должна превышать  $10^4$  имп/с. Для более высокой интенсивности резко возрастает мертвое время из-за наложений, увеличивается смещение пика и ухудшается разрешение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зубарева А.М., Илиев С., Кушнирук В.Ф., Субботин В.Г., Харитонов Ю.П., ОИЯИ, Р13-10430, Дубна, 1977.
2. Millard I.K., Blalock T.V. A Linear Wide Band, Low Noise Amplifier Stage for Use in Nuclear Pulse Amplifiers. IEEE Trans, NS-17, No. 1, 1970.
3. Субботин В.Г. Авторское свидетельство № 531248, ОИПОТЗ 1976, № 37, с. 148.
4. Зубарева А.М., Субботин В.Г. ОИЯИ, Р13-10277, Дубна, 1976.
5. Зубарева А.М., Субботин В.Г., Субботина Г.Г. ОИЯИ, Р13-3718, Дубна, 1968.
6. Шабашов М.Ф., Яник Р. Использование цифровых интегральных схем системы ТТЛ. ОИЯИ, 11-7564, Дубна, 1973.
7. Ковальский Е. Ядерная электроника, Атомиздат, М., 1972, с. 136.
8. Casoli P., Manfredi P.E. Accuracy and Charging Speed in Pulse Stretchers. Part 1. Energia Nuclear, V.16, No.7, p.446. Part 2. Energia Nuclear, V.16, No.8, p.487.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 июля 1978 года.