1954 г. Декабрь *Т. LIV, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

АМПЛИТУДНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ

А. А. Санин

Для решения многих проблем современной экспериментальной физики часто применяют различные схемы амплитудных анализаторов импульсов напряжения. С их помощью снимают спектр амплитуд импульсов напряжения, создаваемых каким-нибудь датчиком, например сцинтилляционным или пропорциональным счётчиком, ионизационной камерой.

Исключительно важное значение таких приборов побудило многие исследовательские лаборатории заниматься этим вопросом. Только за последние годы в периодической литературе появилось описание нескольких десятков различных конструкций амплитудных анализаторов.

Многоканальный амплитудный анализатор импульсов состоит из K простых дифференциальных дискриминаторов. Так как при использовании анализаторов не требуется повторять эксперимент K раз и переключать выбранные уровни (пороги), то время измерений сокращается и повышается точность полученных данных. Последнее связано с уменьшением дрейфа уровней (порогов) за счёт сокращения длительности эксперимента. Однако, несмотря на очевидные достоинства амплитудных анализаторов, вследствие своей сложности и громоздкости они получили значительно меньшее распространение, чем простейшие дискриминаторы.

В зависимости от содержания физического эксперимента к конструкции амплитудного анализатора предъявляются различные требования. Так, например, в тех случаях, когда анализатор применяется для получения энергетического спектра короткоживущего изотопа, особенно жёсткие требования накладываются на разрешающее время прибора.

Основными характеристиками всякого анализатора являются: число каналов, разрешающее время, универсальность, стабильность порогов дискриминации, линейность, простота и надёжность конструкции. Большинство характеристик связано между собой.

Так, например, увеличение числа каналов и уменьшение разрешающего времени обычно ведёт к усложнению конструкции прибора. Часто считают, что число каналов полностью определяет допустимое разрешение прибора по амплитудам. Однако это не соответствует действительности, если учесть, что в некоторых конструкциях приборов применяют экспандеры и снимают не весь спектр, а лишь его участок. В большинстве случаев более важными, чем число каналов, параметрами являются разрешающее время прибора и стабильность ширины каналов. Число каналов и их ширина определяются типом датчика, совместно с которым работает прибор. Так, например, можно показать, что при работе со сцинтилляционным счётчиком наиболее рентабельно выбирать переменную ширину каналов, причём последняя должна возрастать пропорционально корню квадратному из уровня амплитуд [1].

Наиболее громоздкой частью многоканального амплитудного анализатора является счётное устройство. Действительно, допустим, что прибор рассчитывается на разрешающее время $\tau = 10$ *мксек*, тогда разрешающее время пересчётной схемы должно быть $\tau < 10$ *мксек*. Если бы прибор предназначался для регистрации периодических импульсов, то кратность счётной системы должна была бы быть 10^3 (предполагается, что разрешающее время механического регистратора 10^{-2} *сек*), т. е. потребовалась бы схема, состоящая по крайней мере из 3 декад. Однако импульсы, поступающие от большинства датчиков, распределены по времени статистически, поэтому кратность счётной системы может быть уменьшена до 10^2. Даже при такой кратности пересчёта двадцатиканальный амплитудный анализатор становится настолько громоздким, что практическое использование такого прибора сопряжено с большими трудностями. Кроме того, прибор, имеющий много сотен ламп, становится ненадёжным в работе, и эксплуатация его требует высококвалифицированного персонала. Поэтому в большинстве опубликованных конструкций анализаторов кратность счётных систем выбирается небольшой, порядка 10—16, благодаря чему разрешающая способность дискриминирующего устройства полностью не используется. Некоторые авторы старались упростить конструкцию самих счётных систем, заменяя в них электронные лампы безнакальными тиратронами. В связи с этим необходимо отметить большую актуальность работы Л. Н. Кораблёва над созданием простых и надёжных пересчётных схем на безнакальных тиратронах [2].

В последние годы в периодической печати [3, 4] появилось несколько работ, посвящённых применению в счётных схемах специальных ламп: трахотронов и декатронов. Пересчётные схемы на трахотронах или декатронах содержат меньшее число элементов и могут с успехом использоваться в амплитудных анализаторах.

В одной из работ [5], опубликованной в последние годы, была описана простая схема 30-канального механического анализатора. Этот прибор имеет очень большое разрешающее время (0,15 *сек*) и малую ёмкость каналов (100 импульсов). Анализатор состоит из плоскости, наклонённой под углом 10°, в которой прорезано 30 параллельных бороздок (рис. 1). У одного из краёв плоскости находится «пушка», которая заряжается стальными шариками. Шарики толкает металлический стержень, который перемещается катушкой электромагнита. Входной сигнал подаётся в специальное устройство. Это устройство усиливает и удлиняет входные

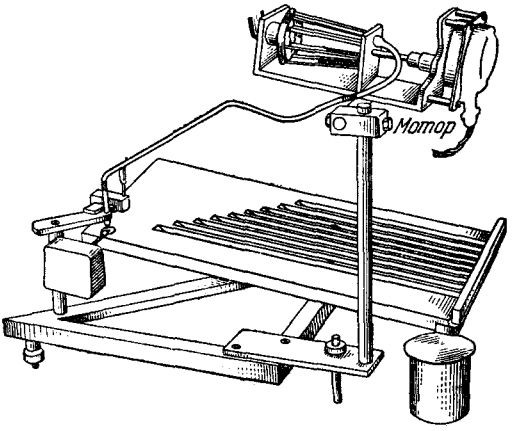

Рис. 1.

импульсы до 100 *мксек*. Усиленный импульс подаётся на катушку электромагнита. Металлический стержень сообщает шарику скорость, пропорциональную амплитуде входного сигнала. Шарик перемещается на плоскости по параболической траектории и попадает в соответствующую лунку. В зависимости от амплитуды входного сигнала меняется начальная скорость стального шарика, а, следовательно, и номер борозды, в которую попадает шарик. После прихода импульса вход прибора блокируется на время 0,15 *сек*, так что следующий импульс не может прийти прежде, чем не будет «заряжен» новый шарик.

Разрешение несколько меньше ширины канала, так что при одинаковой амплитуде входных сигналов 85% шариков попадёт в соответствующий канал, остальные 15% разделятся поровну по двум близлежащим каналам.

Рассмотренный принцип дискриминации импульсов напряжения не является перспективным, так как уменьшение разрешающего времени механического анализатора связано с рядом принципиальных трудностей.

В последние годы в периодической литературе появилось описание трёх конструкций анализаторов [6, 7, 8] с диодными дискриминаторами. Первые две конструкции, несмотря на сложность, имеют худшие характеристики, чем третья. Последняя представляет собой шестиканальный анализатор. Однако число каналов может быть увеличено, так как конструкция позволяет совместное использование нескольких приборов. Разрешающее время анализатора 10 *мксек*. Прибор рассчитан на дискриминацию импульсов с минимальным фронтом нарастания 0,2 *мксек* и длительностью

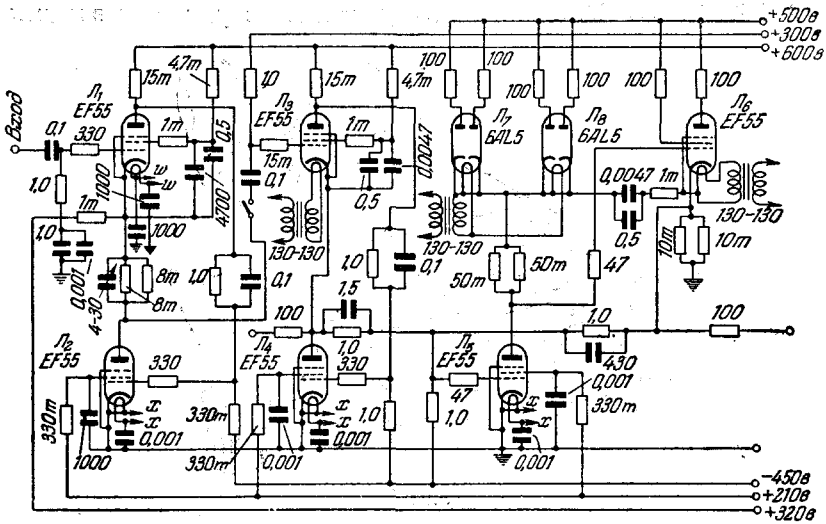

Рис. 2.

не более 600 *мксек*. В каждом канале предусмотрена 10-кратная пересчётная схема, поэтому прибор допускает максимальную скорость счёта порядка 150 *имп/сек*.

Входной сигнал с максимальной амплитудой около 14 *в* усиливается дополнительно до 200 *в*, за этим усилителем следует 6 диодных дискриминаторов. Схема усилителя приведена на рис. 2. Эта схема имеет коэффициент усиления порядка пяти. В усилителе имеются катодный повторитель и фазоинвертер. Линейное усиление импульсов с крутым фронтом нарастания до столь больших амплитуд является трудной задачей.

Анодная цепь усилительного каскада состоит из катодного повторителя и активного сопротивления. Управляющяя сетка катодного повторителя через ёмкость соединена с анодом лампы, что обусловливает большую величину сопротивления анодной цепи. С помощью такой схемы усилителя можно получить выходной сигнал с амплитудой, достигающей 200 *в* без заметных нелинейных искажений.

Катодный повторитель состоит из двух ламп. Нетрудно показать, что выходное сопротивление такого повторителя очень мало [9]. Для схемы, приведённой на рис. 2, выходное сопротивление примерно равно нескольким омам. Катодные повторители на двух лампах одинаково хорошо передают как положительные, так и отрицательные импульсы даже при достаточно большой ёмкостной нагрузке.

С выхода усилителя отрицательный сигнал поступает на диодные дискриминаторы (рис. 3). Положительный импульс от фазоинвертера через небольшую переменную ёмкость также передаётся на диодные дискриминаторы. Величина ёмкости подбирается так,

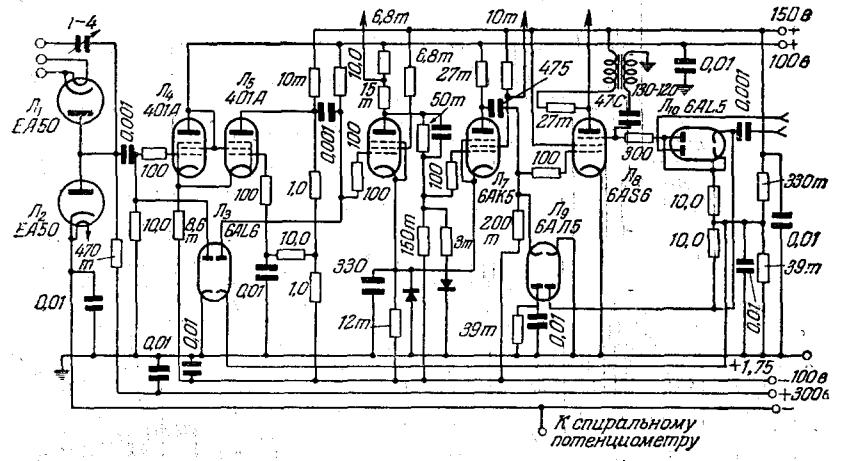

Рис. 3.

чтобы импульс, обусловленный ёмкостью диода, был минимальным. Для частичной компенсации изменения уровня дискриминации, вызванного колебанием напряжения накала или старением лампы, включается дополнительный диод $Л_2$. Полную компенсацию можно получить при одинаковых параметрах ламп $Л_1$ и $Л_2$. Смещения на диодные дискриминаторы поступают от спиральных потенциометров. Импульс после диодного дискриминатора усиливается лампами $Л_4$ и $Л_5$ и подаётся на вход схемы Шмитта ($Л_6$ и $Л_7$). Выходной сигнал с анода лампы $Л_7$ через дифференцирующую ячейку попадает на управляющую сетку лампы совпадений. Когда на антидинатронную сетку этой лампы поступает сигнал с экранного сопротивления $Л_7$ следующего канала, то лампа $Л_8$ остаётся запертой. Однако, если канал n сработал, а $n+1$ нет, то лампа $Л_8$ открывается, и на её анодной нагрузке создаётся выходной отрицательный импульс. Импульс от схемы Шмитта $n+1$-го канала не совпадает по времени с сигналом, поступающим на управляющую сетку лампы $Л_8$. После прихода

импульса от $n+1$-го канала конденсатор C заряжается и поддерживает отрицательный потенциал на антидинатронной сетке $Л_8$ до прихода разрядного сигнала. Разрядный сигнал возвращает всю схему в исходное состояние. Генератор разрядного сигнала на схеме не показан. Выходной сигнал с анода лампы $Л_8$ подаётся на декадную пересчётную схему.

Основным достоинством рассмотренной выше схемы является сравнительно высокая стабильность уровней дискриминации. Кроме того, такая схема может работать от импульсов различной

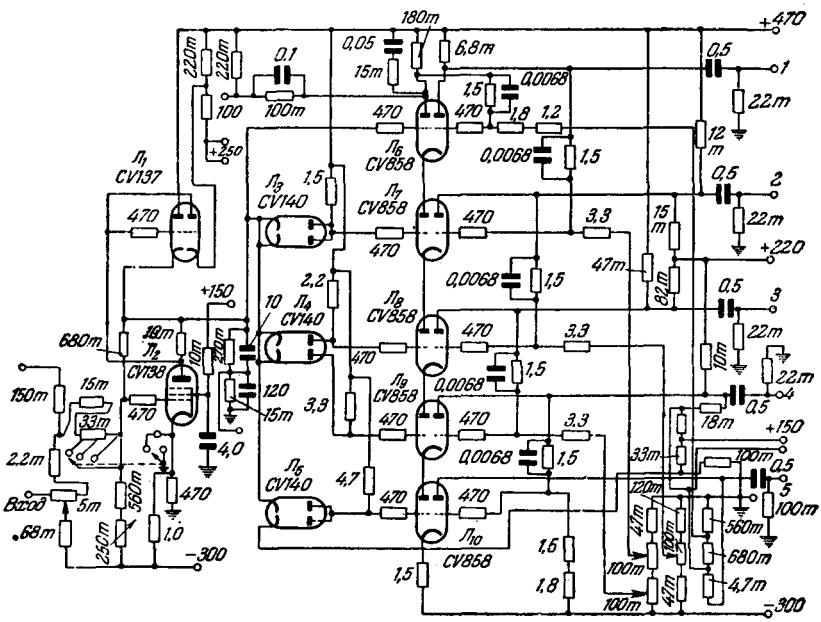

Рис. 4.

длительности и формы без дополнительной регулировки. Однако такой анализатор имеет большое число ламп на канал (10 шт.). Надо отметить также, что кратность пересчёта в каналах слишком мала, поэтому разрешающее время дискриминирующей части не согласовано с разрешающим временем счётной системы.

На рис. 4 приведена схема дискриминирующего устройства другой оригинальной конструкции амплитудного анализатора[10]. Такой анализатор имеет высокую стабильность уровней дискриминации (30 *мв*) и сравнительно малое разрешающее время (50 *мксек*). Прибор допускает скорость счёта в каналах до 2000 *имп/мин*. В каждом канале предусмотрено 10-кратное пересчётное устройство.

В основу прибора положен принцип дискриминации, использующий пороговую систему. Входной сигнал подаётся на управляющую сетку лампы дифференциального усилителя. Изменяя смещение на управляющей сетке лампы дифференциального усилителя, можно выбрать различные участки амплитудного спектра. С выхода усилителя сигнал подаётся на катодный повторитель. Часть выходного сигнала, снимаемого с катодной нагрузки, поступает обратно на дифференциальный усилитель. Удлинение входного сигнала достигается путём заряда ёмкости через диод. Действие междуэлектродной ёмкости диода нейтрализуется подачей импульса другого знака от фазоинвертера. Напряжение на «запоминающей» ёмкости поддерживается равным амплитудному значению сигнала, снимаемого с катодного повторителя в течение времени, необходимого для дискриминации. В течение этого промежутка времени ток разряда ёмкости сведён к минимуму. Это обеспечивается тем, что напряжение с конденсатора снимается двухступенчатым катодным повторителем. Кроме того, напряжение накала ламп, связанных с этой ёмкостью, несколько меньше номинального значения (75%). Накальные цепи этих ламп питаются постоянным током. Сформированный импульс поступает на сортирующее устройство, где он далее усиливается и дискриминируется. Схема дискриминирующего устройства показана на рис. 4. Лампы $Л_1$ и $Л_2$ усиливают выделенную часть амплитудного спектра. Отрицательный импульс с максимальной амплитудой 330 *в* подаётся на управляющую сетку $Л_6$ и через диоды $Л_3$, $Л_4$ и $Л_5$—на управляющие сетки остальных ламп дискриминирующего устройства. Это устройство состоит из пяти двойных триодов, причём левые триоды (*А*) включены последовательно. До прихода входного сигнала управляющая сетка каждого из этих триодов поддерживается под потенциалом катода за счёт сеточного тока, текущего через сопротивление утечки сетки. Таким образом, потенциалы управляющих сеток левых триодов последовательно понижаются. Правые триоды (*Б*) нормально заперты. На вход дискриминирующего устройства подаётся отрицательный импульс. Этот импульс запирает лампу $Л_{6А}$. Анод лампы $Л_{6А}$ гальванически связан с управляющей сеткой $Л_{6Б}$, благодаря чему запирание лампы $Л_{6А}$ вызывает открывание $Л_{6Б}$. Работа дискриминирующей ячейки аналогична работе схемы Шмитта. Если амплитуда отрицательного импульса достаточна велика, то опрокидывается одна или несколько дискриминирующих ячеек. Запирание левой половины любого двойного триода вызывает прекращение тока во всех двойных триодах, включённых над этой лампой. Ток, текущий вверх, переключается в одну из 6 анодных цепей, в зависимости от амплитуды входного сигнала. Дискриминирующее устройство имеет пять каналов, ширина каждого из которых равна 50 вольтам. После дискриминирующего устройства в каждом канале

включена схема совпадений на сопротивлениях (на рис. 4 не показана). На выходе схемы совпадений создаётся сигнал лишь в том случае, когда данный канал срабатывает и на него подан импульс от генератора. Этим способом устраняется ложный запуск счётных устройств каналов, вызванный передним или задним фронтом сформированного сигнала. К каждому каналу подключена декадная пересчётная схема. Эта схема состоит из двух пересчётов: двухкратного на электронных лампах и пятикратного на неоновых лампах.

Наиболее интересным элементом в этом приборе является устройство для центрирования амплитудного спектра. Такое устройство может быть с успехом применено и в других конструкциях амплитудных анализаторов. К сожалению, автором не приводится схемное решение предложенного принципа. Автоматическое центрирование амплитудного спектра является весьма важной проблемой в связи с тем, что параметры датчика импульсов, усилителя и самой схемы дискриминатора могут медленно изменяться. Система автоматического центрирования амплитудного спектра состоит из двух измерителей скорости счёта и дифференциального усилителя. Схемы измерителей скорости счёта включаются в двух смежных каналах. Выходное напряжение измерителя скорости счёта пропорционально числу импульсов, попадающих в данный канал в единицу времени. Напряжение с измерителей скорости счёта подаётся на управляющие сетки ламп дифференциального усилителя. Допустим, что амплитудный спектр имеет пик в определённом диапазоне амплитуд. Изменением потенциала управляющей сетки лампы входного дифференциального усилителя смещают амплитудный спектр так, чтобы вершина пика находилась между каналами, к которым подключены измерители скорости счёта. С дифференциальной схемы постоянное напряжение подаётся на входной усилитель дискриминирующего устройства. Всякое смещение спектра вызывает изменение выходных напряжений на схемах измерителей скорости счёта, а следовательно, и выходного напряжения на дифференциальном усилителе. Это напряжение смещает амплитудный спектр в обратную сторону, компенсируя тем самым нестабильность параметров датчика импульсов, усилителя и дискриминатора. Рассмотренный выше принцип стабилизации может быть применён лишь в том случае, когда в оба канала, к которым подключены измерители скорости счёта, попадает достаточно большое число импульсов в единицу времени.

В последние годы было опубликовано несколько работ [11, 12, 13], в которых в качестве дискриминирующего элемента использовался электронный коммутатор. По своей конструкции электронный коммутатор похож на катодную трубку и отличается от последней тем, что на месте экрана впаян ряд плоских электродов (динодов). Так же, как и катодная трубка, электронный коммутатор имеет: катод, управляющую сетку, фокусирующие и ускоряющие элек-

троды, отклоняющие пластины. Амплитудные анализаторы с электронными коммутаторами состоят из формирующего устройства, генератора подсвета выходных усилителей и пересчётных устройств. Формирующее устройство преобразует входной сигнал в прямоугольный импульс. Амплитуда этого импульса пропорциональна амплитуде входного сигнала. Прямоугольный импульс подаётся на отклоняющие пластины, а сигнал подсвета — на управляющую сетку электронного коммутатора. В зависимости от амплитуды катодного импульса луч коммутатора попадает на различные диноды. Амплитуда импульса напряжения, возникающего на диноде, слишком мала для запуска счётной системы, поэтому сигнал предварительно усиливается. Если луч падает на край динода, то в зависимости от качества фокусировки и положения пучка электронов меняется амплитуда выходного импульса. Благодаря этому кажущееся положение уровня дискриминации данного канала зависит от коэффициента усиления усилителя и порога срабатывания регистрирующего устройства. Для более эффективного контроля этого уровня между усилителем и счётной системой включается дополнительный дискриминатор. Обычно такое увеличение числа ламп в каждом канале сильно усложняет конструкцию прибора. Надо отметить также, что серьёзные трудности возникают при изготовлении электронных коммутаторов, так как точная установка динодов в электронном коммутаторе является весьма трудной задачей.

В одной из первых конструкций [11] анализаторов такого типа применялся электронный коммутатор с 50 динодами. Электронный коммутатор находился под непрерывной откачкой. Для уменьшения вторичной эмиссии диноды покрывались слоем аквадага (коллоидального графита). На рис. 5 приведена схема формирующего устройства этого анализатора. Входной сигнал подаётся на управляющую сетку каскада, в катодную цепь которого включена искусственная линия, нагружённая высокоомным сопротивлением (100 *ком*). На аноде этой лампы создаётся сигнал длительностью 22 *мксек*. В начальный момент сопротивление катодной цепи невелико и равно волновому сопротивлению искусственной линии, поэтому коэффициент усиления каскада больше единицы. Наоборот, через промежуток времени, равный времени задержки искусственной линии, сопротивление катодной цепи становится очень большим и коэффициент усиления каскада практически обращается в нуль. С выхода формирующего каскада сигнал поступает на усилитель с обратной связью $Л_2$ и $Л_3$. Усиленный и сформированный сигнал подаётся на катодный повторитель. Ёмкость $C = 1500$ *мкмкф* заряжается током катодного повторителя через кристаллический детектор KD_2. Разряд этой ёмкости осуществляется через кристаллический детектор KD_1. Выходной импульс имеет плоскую вершину и амплитуду, пропорциональную амплитуде входного сигнала. Генератор подсвета собран на тиратроне. Через искусственную линию

на управляющую сетку тиратрона подаётся сформированный сигнал. Искусственная линия, включённая в катодную цепь тиратрона, разряжается и создаёт на катодном сопротивлении прямоугольный импульс длительностью 5 *мксек*. Этот импульс поступает на управляющую сетку электронного коммутатора. Сформированный входной сигнал подаётся на отклоняющие пластинки

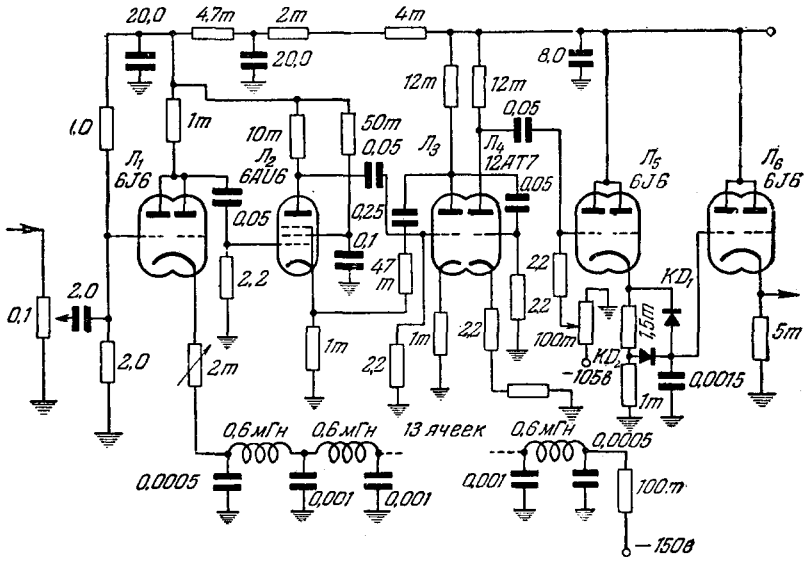

Рис. 5.

электронного коммутатора. К каждому диноду подключён трёхкаскадный усилитель. Разрешающее время прибора в основном ограничивается разрешающим временем механических счётчиков и равно 120 *имп/сек*.

Рассмотренная схема амплитудного анализатора имеет ряд серьёзных недостатков. Наиболее важными недостатками прибора являются: малое разрешающее время, необходимость постоянной откачки электронного коммутатора и относительно большое число ламп. Кроме того, прибор предназначен для работы совместно с одним типом датчика.

Более совершенная конструкция прибора была разработана на стандартном электронном коммутаторе [12]. Схема прибора приведена на рис. 6. Входной сигнал, имеющий фронт нарастания меньше одной микросекунды (предполагается, что прибор работает совместно с фотоумножителем), подаётся на управляющую сетку катодного повторителя. Через ёмкость C_1 и диод $Л_2$ конденсатор C_2 заряжается до амплитудного значения входного

импульса. До прихода входного сигнала напряжение на конденсаторе C_2 фиксируется диодом $Л_2$. Входной сигнал усиливается и подаётся через искусственную линию с задержкой, равной трём микросекундам, и формирующий каскад на разрядный пентод $Л_6$. На конденсаторе C_2 создаётся сигнал с плоской вершиной и амплитудой, равной амплитуде входного импульса. Этот сигнал через усилитель подаётся на отклоняющие пластины электронного коммутатора. На управляющую сетку коммутатора поступает импульс длительностью 1,5 *мксек*. Этот

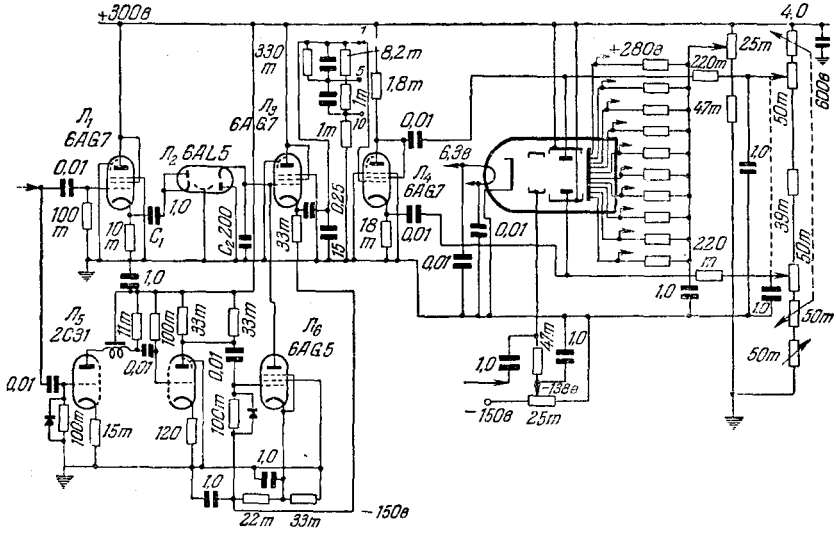

Рис. 6.

импульс генерируется ондовибратором (на схеме не показан). Ондовибратор запускается усиленным и задержанным на одну микросекунду входным сигналом. Каждый из 10 выходных усилителей имеет по 2 каскада на триодах и катодный повторитель. Регулируя порог срабатывания пересчётных устройств, можно получить ширину каждого канала одинаковой. Максимальная скорость счёта ограничивается разрешающим временем регистрирующего устройства. Анализаторы с электронными коммутаторами, несмотря на некоторые достоинства (отсутствие схем антисовпадений, достаточно высокая стабильность уровней дискриминации, высокая разрешающая способность), всё же не получили широкого распространения.

Сравнительно простая и надёжная конструкция амплитудного анализатора была разработана на обычных ондовибраторах[14]. Такой прибор имеет двадцать каналов и малое разрешающее

время (2,4 *мксек*). Блок-схема анализатора приведена на рис. 7. В анализатор входят следующие блоки: экспандер, контролирующее и дискриминирующее устройства и пересчётные схемы.

Сигнал с усилителя через искусственную линию подаётся на экспандер. На выходе усилителя включена релаксационная схема, генерирующая короткие отрицательные импульсы. Эти импульсы

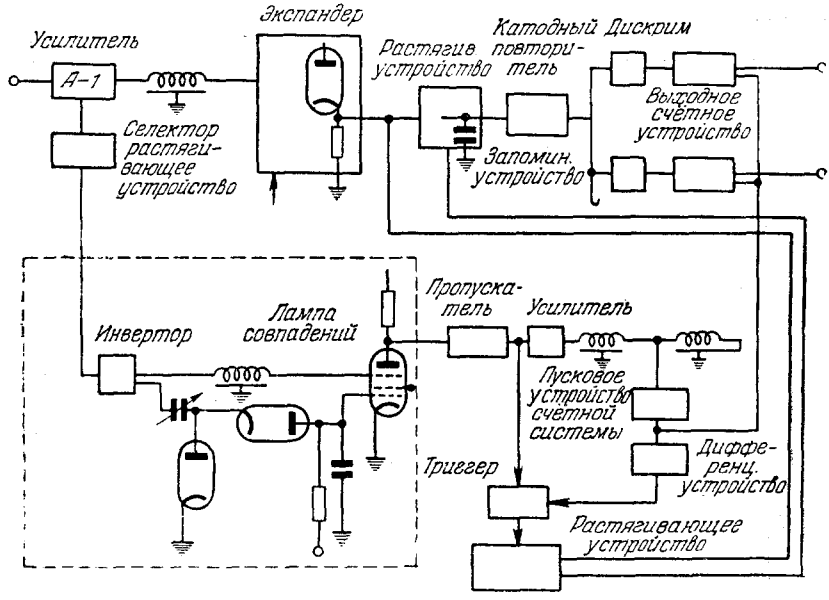

Рис. 7.

создаются одновременно с началом выходного сигнала и поступают на контролирующее устройство. Если импульсы с датчика следуют один за другим через интервалы времени, меньшие 2,3 *мксек*, то контролирующее устройство не включает экспандер, а также не создаёт поверочного импульса, идущего на дискриминирующее устройство. Таким образом, схема дискриминирует лишь те импульсы, которые с обеих сторон ограничены свободным интервалом времени 2,3 *мксек*. Экспандер выбирает часть спектра (10—20%) и подаёт его на дискриминатор. Коэффициент усиления экспандера постоянен и равен пяти. Ширина канала выбрана равной 3 *в*, поэтому участок спектра, который дискриминирует прибор, составляет 12 *в*.

Схема экспандера приведена на рис. 8. Эта схема состоит из катодного повторителя, усилителя с обратной связью и удлинителя. Нижняя граница участка спектра, который подаётся на

дискриминирующее устройство, определяется положением движка потенциометра R_1. Для того чтобы усилитель не перегружался, в его схему включён ряд нелинейных элементов (диод $Л_3$, кристаллический детектор KD_1). Кристаллические диоды KD_4, KD_5 и KD_6 и лампы $Л_7$, $Л_8$ и $Л_9$ являются элементами удлинителя импульсов. В состоянии покоя управляющая цепь удлинителя (эта

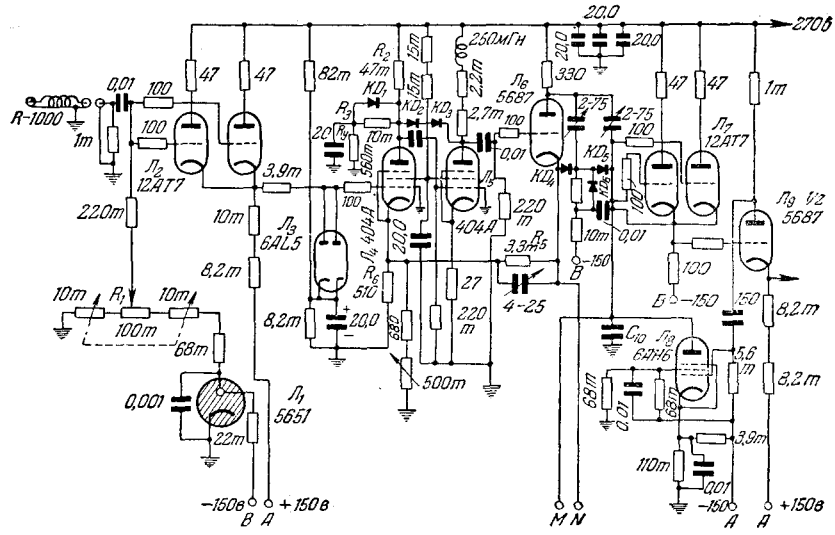

Рис. 8.

цепь показана на рис. 9) пропускает 3,2 *ма* через кристаллические диоды KD_4, KD_5 и вывод M. Когда отрицательный импульс с усилителя запускает контролирующее устройство, то ток переключается от вывода M к выводу N. Конденсатор C_{10} заряжается катодным повторителем $Л_6$ до амплитудного значения входного сигнала. После прохождения сигнала катодный повторитель и кристаллический детектор KD_6 поддерживают постоянное напряжение в точке B, так что весь обратный потенциал подаётся на KD_6. На кристаллическом детекторе появляется напряжение, меньшее 1,5 *в*, так как этот детектор имеет очень высокое обратное сопротивление. Ток разряда очень мал, поэтому выходной импульс имеет плоскую вершину. Через 4,5 *мксек* контролирующее устройство возвращает удлинитель в исходное состояние.

Для ускорения разряда конденсатора C_{10} включена лампа $Л_8$. Выходной катодный повторитель $Л_9$ имеет ёмкостную нагрузку, поэтому сигнал, появляющийся на его аноде, близок по форме к отрицательной производной импульса. В момент окончания этого импульса на аноде лампы $Л_9$ создаётся положительный импульс,

который открывает разрядную лампу $Л_8$. Импульс на конденсаторе спадает быстро, однако выходной сигнал имеет более пологий задний фронт из-за ёмкостной нагрузки выходного катодного повторителя.

На рис. 9 приведена схема контролирующего устройства. Импульс с генератора усилителя, длительностью 0,4 *мксек*, поступает на управляющую сетку лампы $Л_{10}$. Последовательно с анодной нагрузкой этой лампы включена искусственная линия, поэтому положительный сигнал на сопротивлении R_1 возникает через 2,3 *мксек*.

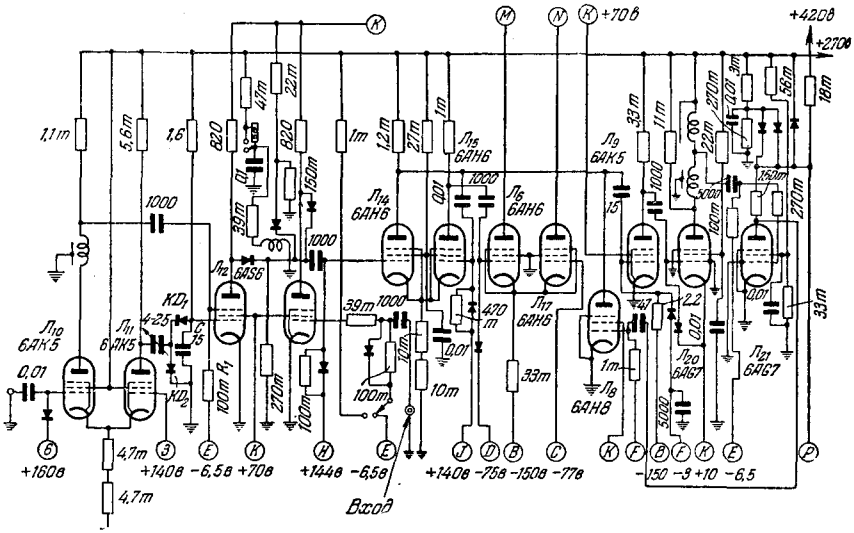

Рис. 9.

На аноде лампы $Л_{11}$ создаётся отрицательный импульс одновременно с входным сигналом. Этот импульс через кристаллический детектор KD_1 поступает на управляющую сетку смесительной лампы $Л_{12}$ и заряжает конденсатор $C = 15$ *мкмкф*. Ёмкость этого конденсатора подбирается так, чтобы лампа $Л_{12}$ была заперта по управляющей сетке в течение 2,3 *мксек*. Когда лампа $Л_{12}$ открывается по управляющей сетке и на её антидинатронную сетку приходит положительный сигнал, то на аноде создаётся отрицательный импульс. Однако в том случае, когда на вход контролирующего устройства поступают два сигнала, разделённые интервалом времени, меньшим 2,3 *мксек*, то первый сигнал не вызывает выходного импульса. Импульс с анода лампы $Л_{12}$ запускает ондовибратор $Л_{14}$ и $Л_{15}$. Выходной сигнал с этого ондовибратора имеет длительность несколько сот микросекунд. Однако с помощью лампы $Л_8$ ондовибратор принудительно возвращается

в исходное состояние через 1,8 *мксек*. Действительно, передний фронт импульса от ондовибратора усиливается лампами $Л_9$ и $Л_{20}$ и задерживается на 1,8 *мксек* с помощью искусственной линии, включённой в анодную цепь лампы $Л_{20}$. Этот сигнал дифференцируется; возникающий в результате этого прямоугольный положительный импульс длительностью 0,4 *мксек* подаётся на управляющую сетку выходного каскада. До прихода импульса кристаллический детектор KD_3 поддерживает потенциал анода лампы $Л_{21}$ равным $+271$ *в*. Когда лампа $Л_{21}$ открывается, то потенциал её анода не может упасть ниже 265 *в* из-за тока кристаллических детекторов KD_4. Такое ограничение амплитуды выходного сигнала необходимо для надёжной работы схем антисовпадений дискриминирующего устройства. Выходной сигнал подаётся обратно через дифференцирующую цепочку R и C на управляющую сетку пусковой лампы $Л_9$ ондовибратора.

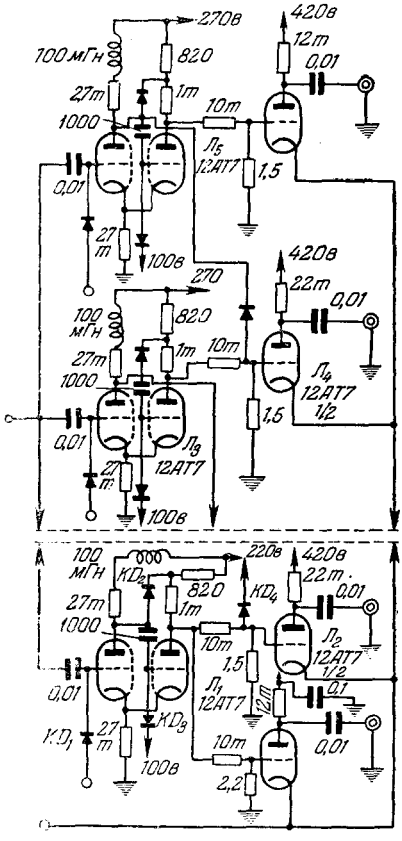

Рис. 10.

На рис. 10 приведена схема дискриминирующего устройства. Эта схема состоит из ондовибраторов, схем антисовпадений и выходных каскадов для запуска счётных систем. Применение в дискриминирующем устройстве ондовибраторов вместо схем Шмитта позволило сильно упростить конструкцию прибора. Напряжение на управляющей сетке правого триода каждого ондовибратора устанавливается равным $+100$ *в*. Управляющие сетки левых триодов подключаются через кристаллические детекторы с большим обратным сопротивлением к выводам делителя с последовательно понижающимся потенциалом. Выходной сигнал с экспандера подаётся на управляющие сетки ондовибраторов. В зависимости от амплитуды входного сигнала запускаются один или несколько ондовибраторов. Кристаллические детекторы KD_1, KD_3

включены для уменьшения времени нечувствительности ондовибраторов. Положительный сигнал с ондовибраторов через сопротивление 10 *ком* подаётся на управляющую сетку выходного каскада. Однако эта лампа открывается лишь в том случае, когда на её катод одновременно поступает отрицательный сигнал с контролирующего устройства.

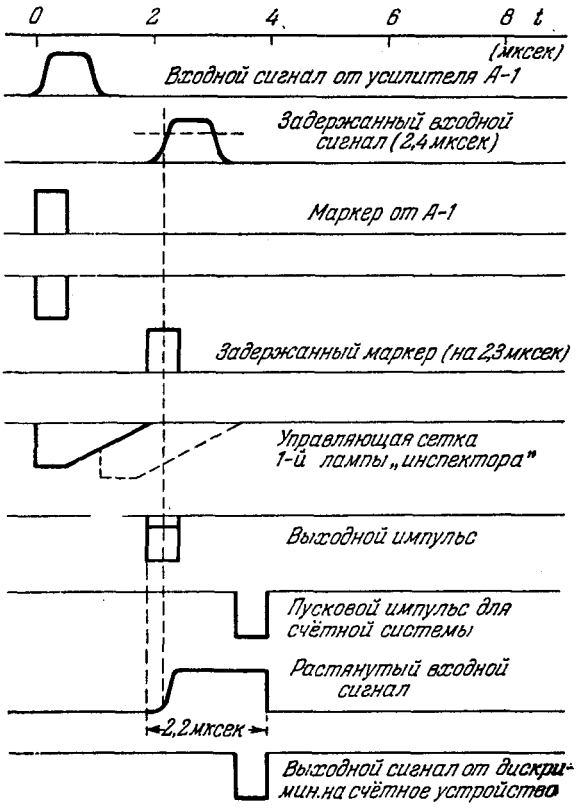

Рис. 11.

Если опрокидывается ондовибратор в следующем более высоком канале, то сигнал на данном выходном каскаде не создаётся, так как с анода левой лампы через кристаллический детектор KD_4 подаётся гасящий отрицательный импульс. Импульсы с выходных каскадов подаются на пересчётные устройства. На рис. 11 приведены эпюры напряжений в различных точках схемы. Анализатор правильно дискриминирует импульсы с временем нарастания не меньше 0,2 *мксек*.

В последние годы автором был предложен принцип амплитудно-временной трансформации*). Входной сигнал предварительно преобразовывался в прямоугольный импульс так, чтобы длительность последнего была пропорциональной амплитуде входного сигнала. Измерение длительности прямоугольного импульса осуществлялось механическим или электронным коммутатором. Оказалось, что, используя принцип амплитудно-временной трансформации, можно построить различные системы анализаторов с меньшим числом элементов. Кроме того, можно показать, что в таких системах практически отсутствует относительный дрейф ширины каналов.

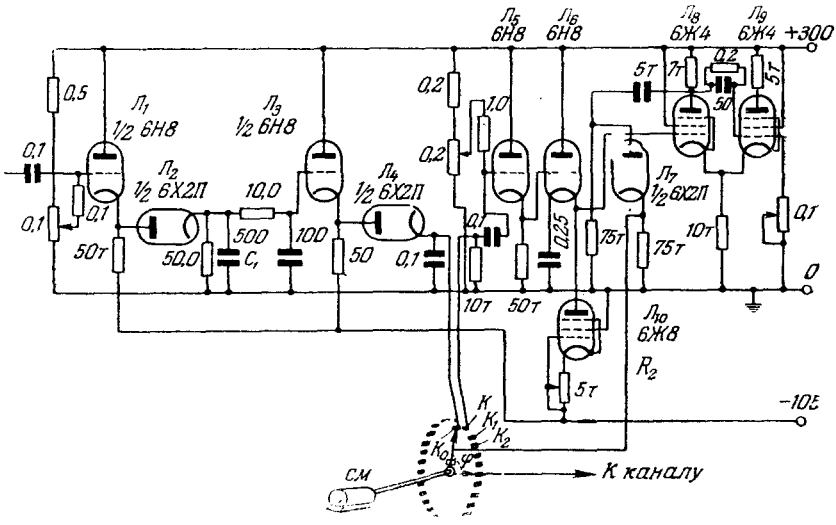

Рис. 12.

Основываясь на предложенном принципе, автором совместно с Н. Н. Сухановой была разработана конструкция моторного анализатора[15]. Такой анализатор имел 30 каналов и разрешающее время 0,05 *сек*. Схема прибора очень проста (рис. 12). Входной сигнал подаётся на управляющую сетку лампы $Л_1$. Через диод $Л_2$ конденсатор C_1 заряжается до напряжения, равного амплитуде входного сигнала. Конденсатор C_1 выбран небольшой ёмкости, поэтому импульс, имеющий даже малую длительность фронта нарастания (несколько микросекунд), успевает зарядить его до напряжения, равного амплитуде входного сигнала. На второй катодный повторитель импульс подаётся через интегрирующую цепочку, благодаря чему

*) Принцип амплитудно-временной трансформации был предложен автором независимо от Вилкинсона.

фронт нарастания входного сигнала удлиняется. Током катодного повторителя $Л_3$ через диод $Л_4$ заряжается другой конденсатор, имеющий значительно бо́льшую ёмкость (0,1 *мкф*). Катод диода $Л_4$ соединён с ламелями коммутатора K и K_0. Ось коммутатора вращается синхронным мотором.

На оси коммутатора насажен искатель. Все ламели, кроме K и K_0, соединены с управляющими сетками безнакальных тиратронов, в анодных цепях которых включены механические счётчики. Когда искатель коммутатора замыкает ламели K и K_0, на сопротивлении создаётся положительный импульс с амплитудой, пропорциональной амплитуде входного сигнала. Этот импульс подаётся на управляющую сетку $Л_5$. Лампа $Л_5$ включена катодным повторителем. С выхода $Л_5$ сигнал подаётся на второй катодный повторитель, который заряжает конденсатор C_2. Конденсатор C_2 разряжается пентодом постоянного тока $Л_{10}$. Внутреннее сопротивление лампы $Л_{10}$ достаточно велико, поэтому изменение напряжения на конденсаторе C_2 близко к линейному. Длительность импульса пилообразной формы пропорциональна амплитуде входного сигнала и может регулироваться с помощью потенциометра R_2. С анода лампы $Л_{10}$ пилообразный импульс подаётся на вход схемы Шмитта. Прямоугольный импульс с анода лампы $Л_9$ подаётся на дифференцирующую ячейку. Постоянная времени дифференцирующей ячейки выбирается так, чтобы длительность выходного положительного импульса была несколько меньше времени скольжения искателя коммутатора между ламелями. С выхода дифференциальной ячейки положительный импульс подаётся на искатель коммутатора, а отрицательный обрезается диодом $Л_8$. Положительный импульс, снимаемый с выхода дифференцирующей ячейки, совпадает с концом прямоугольного сигнала. В зависимости от амплитуды входного сигнала к моменту прихода положительного импульса искатель коммутатора повернётся на различный угол относительно ламелей K и K_0. Поэтому положительный импульс может попасть лишь в тот канал, на ламели которого находился искатель коммутатора. На рис. 13 показаны эпюры напряжений в различных точках схемы. Для приведения в действие механического счётчика в каждом канале включено

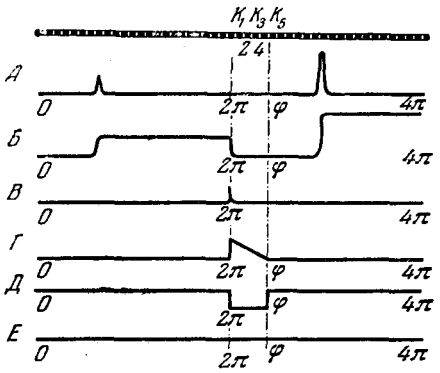

Рис. 13.

ионное реле Кораблёва. Гашение безнакальных тиратронов осуществляется общим реле.

Рассмотренный принцип дискриминации импульсов является перспективным, так как замена в анализаторе механического коммутатора электронным (например, типа Зернова) даст возможность уменьшить разрешающее время до сотни *мксек*. Замена механического коммутатора электронным вызывает некоторое усложнение схемы прибора. Так, например, для разряда конденсатора C_2 используется дополнительная лампа. Момент открывания разрядной лампы определяется некоторой фазой синусоидального напряжения, подаваемого на круговую развёртку электронного коммутатора.

В зарубежной периодической литературе было описано несколько схем амплитудных анализаторов, основанных на принципе амплитудно-временной трансформации [16, 17, 18].

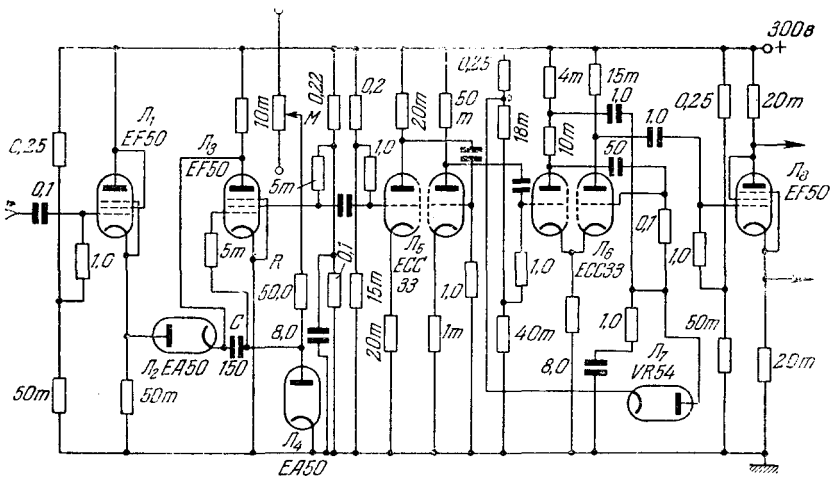

Рис. 14.

На основе этого принципа Вилкинсоном был разработан 99-канальный амплитудный анализатор [16] с разрешающим временем 0,1 *сек*. В этом анализаторе схема блока временной трансформации разработана весьма удачно. Точность работы прибора, в основном, определяется качеством амплитудно-временной трансформации.

Положительный входной сигнал подаётся на управляющую сетку катодного повторителя (рис. 14). Током катодного повторителя через диод $Л_2$ ёмкость C заряжается до амплитудного значения входного импульса. До прихода сигнала напряжение на аноде лампы $Л_3$ равно выходному напряжению катодного повторителя. Управляющая сетка лампы $Л_3$ соединена через

диод $Л_4$ с землёй, поэтому потенциал этой сетки во время заряда конденсатора не может стать положительным. Благодаря глубокой обратной связи разряд конденсатора C происходит по линейному закону. Скорость разряда определяется величиной сопротивления R, ёмкостью конденсатора C и напряжением в точке M. Для правильной работы схемы необходимо, чтобы входной импульс спадал быстрее, чем разряжается конденсатор C.

Лампа $Л_3$ запирается в тот момент времени, когда входной сигнал начинает спадать, и открывается после разряда конденсатора C. Таким образом, время, в течение которого лампа $Л_3$ заперта, линейно зависит от амплитуды входного импульса. Сигнал, снимаемый с экранного сопротивления лампы $Л_3$, формируется с помощью каскадов $Л_5$ и $Л_6$. Затем он подаётся на синусоидальный генератор, создающий последовательность импульсов, число которых пропорционально амплитуде входного сигнала. Эти импульсы подсчитываются с помощью двух, включённых последовательно, декадных кольцевых пересчётных схем. Первая схема определяет цифру единиц, а вторая запускается один раз за каждый цикл первого пересчёта и определяет цифру десятков. В схему включено 20 реле, каждое из которых приводится в действие соответствующей лампой пересчётных схем. С помощью этих реле подаются напряжения на механические счётчики. Допустим, что на вход анализатора поступил сигнал, амплитуда которого соответствует 46 импульсам синусоидального генератора. В этом случае один из выводов 46-го механического счётчика соединяется с землёй шестым реле, которое питается шестой лампой декады единиц. Другой вывод этого механического счётчика присоединяется к выходной лампе, через которую идёт большой импульсный ток после окончания сформированного прямоугольного сигнала. Это соединение осуществляется с помощью четвёртого реле декадного пересчёта, отмечающего десятки. В этом приборе максимальная скорость счёта ограничивается разрешающим временем реле и механических счётчиков. Как отмечает автор, анализатор имеет блокирующее устройство, которое запирает вход прибора после прихода очередного сигнала на время 0,1 *сек*. Анализатор содержит 70 ламп. Рассмотренный принцип амплитудной дискриминации является весьма перспективным, так как имеется возможность уменьшения разрешающего времени путём замены механических реле электронными.

В работе[17] описана другая схема анализатора, основанная также на принципе амплитудно-временной трансформации. В отличие от рассмотренных выше конструкций амплитудных анализаторов этот прибор имеет специальное счётное устройство, содержащее сравнительно небольшое число ламп. Входной сигнал после усиления и удлинения сравнивается с линейно нарастающим напряжением. Это сравнение производится с помощью диф-

ференциального усилителя. На один вход усилителя подаётся постоянное напряжение, равное амплитуде входного импульса, а на другой вход — пилообразный сигнал. В момент времени, когда напряжения на обоих входах дифференциального усилителя становятся одинаковыми, генерируется выходной сигнал. Время, необходимое для нарастания пилообразного сигнала до напряжения на другом входе усилителя, пропорционально амплитуде входного импульса. Выходной сигнал с усилителя поступает на управляющую сетку схемы Шмитта (триггера). Сигнал с триггера подаётся на схему совпадений. На другой вход схемы совпадений поступает импульс с генератора (рис. 15).

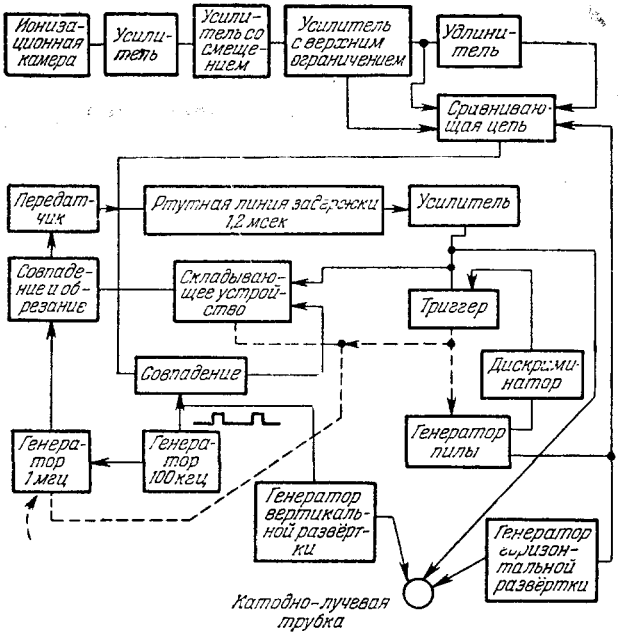

Рис. 15.

Период колебаний этого генератора выбирается в соответствии с необходимым числом каналов. Например, если требуется иметь 60 каналов, то при длительности пилообразного импульса 1200 *мксек* период колебаний генератора должен быть равен 20 *мксек*.

Таким образом, на выходе схемы совпадений импульс создаётся одновременно с сигналом, поступающим с генератора. Этот сигнал передаётся обратно на растягивающее устройство. Конденсатор «запоминания» разряжается, и схема Шмитта опрокидывается в исходное состояние, благодаря чему за время

периода пилообразного сигнала на выходе схемы совпадений может создаваться только один импульс. Этот импульс смещён относительно начала пилообразного сигнала на $k \cdot 20$ *мксек*, где k — номер канала. В зависимости от амплитуды входного импульса число k может меняться от 1 до 60. Данные об амплитуде входного импульса сохраняются с помощью ультразвуковой ртутной линии задержки. Это осуществляется следующим способом. Сигнал с выхода схемы совпадений поступает на специальное устройство, которое пропускает его далее в том случае, когда на другой его вход в данный момент времени не поступает управляющего импульса. Если на оба входа этого устройства одновременно подаются сигналы, то на выходе создаётся импульс, смещённый по времени на одну микросекунду. Далее, сигнал с этого устройства запускает модулятор генератора. Частота колебаний генератора ультразвуковой линии равна 13 *Мгц*. Этот генератор возбуждает кварцевый резонатор, который находится на одном из концов ультразвуковой ртутной линии. На другом конце линии укреплён второй кварцевый резонатор. Время распространения сигнала по линии немного больше 1200 *мксек*. Сигнал со второго кварцевого резонатора усиливается, детектируется и подаётся на специальное устройство как управляющий импульс. В том случае, когда на вход прибора не поступило вновь импульса, который попадает в тот же канал, специальное устройство пропускает импульс с детектора на модулятор. Процесс становится периодическим.

Таким образом, в каждом периоде пилообразного сигнала будет появляться импульс. Порядковый номер импульса определяется величиной амплитуды поданного на вход сигнала. Если на вход прибора подаётся второй импульс с амплитудой, соответствующей тому же каналу, то выходной сигнал специального складывающего устройства будет смещён относительно импульса данного канала на одну микросекунду. Соответственно, попадание в тот же канал 2^3 импульсов смещает выходной сигнал складывающего устройства на 3 *мксек*. Таким способом осуществляется счёт импульсов во всех каналах. Выше отмечалось, что полный период пилообразных колебаний разбивается на m равных частей (по числу каналов). Каждый интервал времени, соответствующий ширине канала, в свою очередь разбивается на n частей, где n является коэффициентом кратности бинарного пересчёта. В рассмотренном примере прибор имел 60 каналов, поэтому при длительности пилообразного сигнала 1200 *мксек* каждый канал занимает 20 *мксек*. Входной сигнал открывает один из 60 импульсов каналов. Допустим, что во второй канал попало 43 импульса, тогда в интервале времени от 20 *мксек* до 40 *мксек* будет иметься ряд сигналов. Первый сигнал смещён по времени относительно начала пилообразного

импульса на 20 *мксек*, второй на 21 *мксек*, третий на 23 *мксек* и четвёртый на 25 *мксек*, так как

$$43 = 2^0 + 2^1 + 2^3 + 2^5.$$

Эпюры напряжений в различных точках схемы приведены на рис. 16.

Разрешающее время прибора, ёмкость данного канала (максимальное число импульсов, которое может накопляться в канале) и число каналов однозначно связаны друг с другом *).

Увеличение разрешающей способности прибора вызывает уменьшение допустимого числа каналов или их ёмкости. Так, например, при периоде пилообразного сигнала 1200 *мксек* и числе каналов 60 допустимая ёмкость канала 2^{19} импульсов. Соответственно, при 120 каналах максимальная ёмкость каналов 2^{10} импульсов.

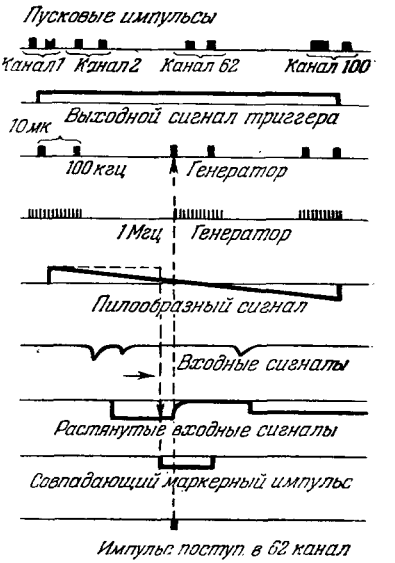

Рис. 16.

Регистрация заполнения каналов анализатора производится с помощью катодно-лучевой трубки. На развёртывающие и отклоняющие пластины катодно-лучевой трубки подаются пилообразные сигналы. Длительность пилообразного импульса, подаваемого на развёртывающие пластины, 1200 *мксек*, а на отклоняющие — 20 *мксек* (при 60 каналах). На экране трубки получается растр. Число строк в растре задаётся необходимым числом каналов. На управляющую сетку трубки поступают детектированные сигналы с ультразвуковой ртутной линии, поэтому на строчках растра появляется ряд светящихся точек. Если во второй канал попало 43 импульса, то будут светиться первая, вторая, четвёртая и шестая точка второй строки. Рассмотренная выше схема анализатора имеет ряд существенных достоинств. К этим достоинствам нужно прежде всего отнести: простоту конструкции (сравнительно небольшое число ламп — 82 шт.), надёжность в работе, отсутствие механических счётчиков, малый относительный дрейф каналов. Наряду с отмеченными достоинствами анализатор имеет много недостатков.

*) Предполагается, что минимальное допустимое смещение сигнала в складывающем устройстве является некоторой фиксированной величиной, примерно равной одной *мксек*. Эта величина зависит от характера лампы и ряда других причин.

Основным недостатком прибора является сравнительно малая разрешающая способность и зависимость её от числа каналов и их ёмкости. Из других недостатков прибора нужно отметить громоздкость применяемой в нём ультразвуковой линии, трудность её транспортировки и изготовления, трудность получения малых утечек в цепи «запоминающего» конденсатора (сопротивление изоляции должно быть порядка 10^{10} *ом*).

Анализ работы опубликованных схем амплитудных анализаторов импульсов напряжения показывает, что в настоящее время нельзя указать какую-либо конструкцию прибора, которая сочетала бы в себе простоту, надёжность в работе, сравнительно большое число каналов и малое разрешающее время.

Наиболее перспективным принципом амплитудной дискриминации является принцип амплитудно-временной трансформации. Действительно, в приборах, основанных на этом принципе, стабильность порогов дискриминации в основном зависит от компарационного элемента, общего для всех каналов. Поэтому для повышения точности работы прибора достаточно стабилизировать небольшое число элементов схемы.

В обзоре не рассмотрены некоторые устаревшие конструкции амплитудных анализаторов, а также системы, принципы работы которых не являются новыми.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. G. Kelley, Nucleonics **10**, № 4, 34 (1952).
2. Л. Н. Кораблёв, ДАН **75**, № 3, 375 (1950).
3. М. И. Елинсон и Г. А. Барышевский, Автоматика и телемеханика **13**, № 2, 204 (1952).
4. А. В. Шилейко, Труды МЭИ **13**, 42 (1952).
5. S. G. Frank, O. R. Frisch, G. G. Scarott, Phil. Mag. **42**, 603 (1951).
6. W. F. Freundlich, E. P. Hincks, W. I. Ozeroff, Rev. Sci. Instr. **18**, 90 (1947).
7. G. H. Westcott, G. C. Hanna, Rev. Sci. Instr. **20**, 181 (1949).
8. N. J. Moody, W. I. Battell, R. H. Taplin, Rev Sci. Instr. **22**, 551 (1951).
9. C. Hammock, Radiation Lab. Rept. **469** (1943).
10. E. H. Gooke-Iarborough, J. Inst. Elec. Engrs. **97**, III, 108 (1950).
11. W. E. Glenn, Nucleonics **4**, № 6, 50 (1949).
12. W. E. Glenn, Nucleonics **9**, № 6, 24 (1951).
13. P. A. Watkins, Rev. Sci. Inst. **20**, 495 (1949); G. Kelley, Nucleonics **10**, № 4, 34 (1952).
14. A. B. Van Rennes, Nucleonics **10**, № 10, 50 (1952); C. W. Johnstone, Nucleonics **11**, № 1, 36 (1953).
15. А. А. Санин и Н. Н. Суханова, Вестник Московск. университ. № 8 105 (1953).
16. D. H. Wilkinson, Proc. Cambridge Phil. Mag. **46**, 508 (1950); D. H. Wilkinson, J. Sci. Instr. **27**, 36 (1950); УФН **43**, 148 (1951).
17. G. W. Hutchinson, G. G. Scarrott, Phil. Mag. **42**, 792 (1951); G. W. Hutchinson, Nucleonics **11**, № 2, 24 (1953).