

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P13 - 4899



Б.Ю. Семенов

ПОГРЕШНОСТЬ ОТ НАЛОЖЕНИЙ ИМПУЛЬСОВ
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ
И ЕЕ УМЕНЬШЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИНСПЕКТОРОВ
НАЛОЖЕНИЙ

(Обзор)

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1970

P13 - 4899

Б.Ю. Семенов

ПОГРЕШНОСТЬ ОТ НАЛОЖЕНИЙ ИМПУЛЬСОВ
ПРИ ИЗМЕРЕНИИ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ
И ЕЕ УМЕНЬШЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ИНСПЕКТОРОВ
НАЛОЖЕНИЙ
(Обзор)

ОИЯИ
БИБЛИОТЕКА

I. Общие вопросы, касающиеся проблемы наложений

Непрерывное повышение требований к точности спектрометрических измерений, равно как и необходимость или возможность проведения эксперимента при больших интенсивностях входных сигналов, требуют внимания к вопросам борьбы с погрешностью из-за наложений сигналов друг на друга.

Наложения приводят к двум явлениям, которые могут служить в дальнейшем причиной образования погрешности - к смещению начальных уровней напряжений каскадов спектрометрического тракта и к непосредственному искажению импульсов в результате суммирования.

С искажениями от смещения начальных уровней борются обычными, широко известными методами, не отличающимися существенно от методов борьбы, например, с погрешностью из-за температурного дрейфа параметров транзисторов. При корректном исполнении тракта эта погрешность может быть доведена до пренебрежимо малой величины.

Погрешность из-за непосредственного искажения импульсов в результате суммирования достаточно специфична и поэтому требует особых мер борьбы. В дальнейшем под погрешностью из-за наложений будем подразумевать именно ту погрешность, которая образуется в результате измерения не одиночных сигналов, а их сумм.

Искажения от наложений проявляются в виде (см. рис. 1) расширения пика в спектре, образования "плеч", смещения положения максимума пика. Для конкретных условий эксперимента (конкретный спектр и конкретная нагрузка) вероятность образования и величина искажений зависят от формы и длительности сигнала, подаваемого на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП). Поэтому с наложениями борются, в первую очередь, уменьшением длительности измеряемого сигнала путем использования соответствующих фильтров ^{/1/} и элемента связи между усилителем и АЦП ^{/2/}. Однако из-за необходимости сохранения высокого отношения сигнал-шум этот путь имеет предел применимости.

Второй путь - применение устройств, опознающих и отбрасывающих наложенные события (инспекторов наложений). Отметим, что применение инспекторов приводит к уменьшению погрешности из-за наложений без значительного снижения интенсивности регистрации только при надлежащем формировании импульсов на входе АЦП, т.е. в том случае, когда возможности первого пути исчерпаны. Так, например, при применении инспектора совместно с системой из RC-фильтров без коррекции ^{/2/} ($RC = CR = T_M$) и при непосредственной связи между усилителем и АЦП для устранения наложений на спад с погрешностью, большей 0,001 амплитуды максимального сигнала, потребуется время защиты, равное примерно $(3-10) \cdot 10^2 T_M$. Использование такого непомерно большого времени защиты привело бы к неприемлемому снижению интенсивности регистрации.

Следует заметить, что возможен также путь расчетной коррекции искаженного наложениями спектра, но, как указывает ряд авторов, например ^{/13,14/}, он возможен лишь при простых амплитудных распределениях исходных событий и при простых и известных передаточных функциях электронных систем. Однако даже в этом случае точность метода невысока.

Несмотря на большое количество работ, описывающих конкретные устройства, или обсуждающих отдельные общие проблемы, относящиеся к борьбе с погрешностью из-за наложений с помощью инспекторов, публикаций обобщающего и систематизирующего характера до сих пор не было ^{x/}. В настоящей работе делается попытка восполнить этот пробел.

^{x/} Настоящая работы была закончена до выхода из печати обзорной статьи В.Б. Иванова, А.М. Шиманского и В.И. Шипилова ^{/19/}.

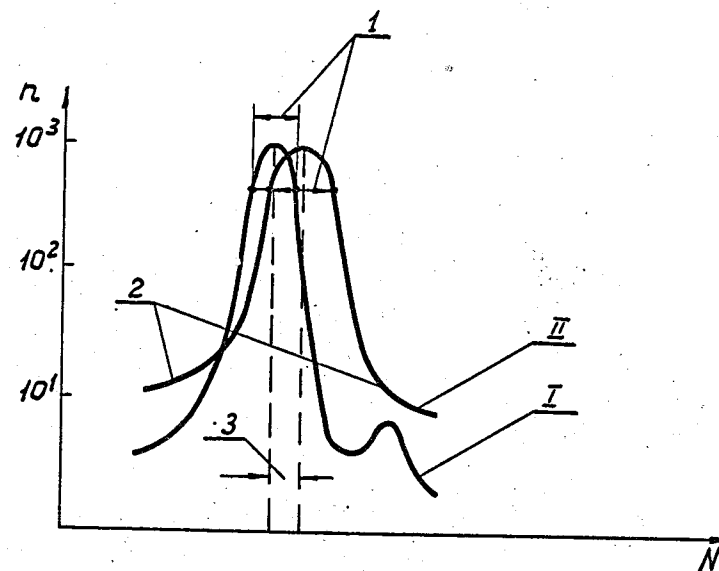


Рис.1. Искажения спектра при наложениях импульсов. I - первоначальный спектр, II - спектр, искаженный наложениями. 1 - расширение пика спектра, 2 - образование плеч, 3 - смещение положения максимума пика.

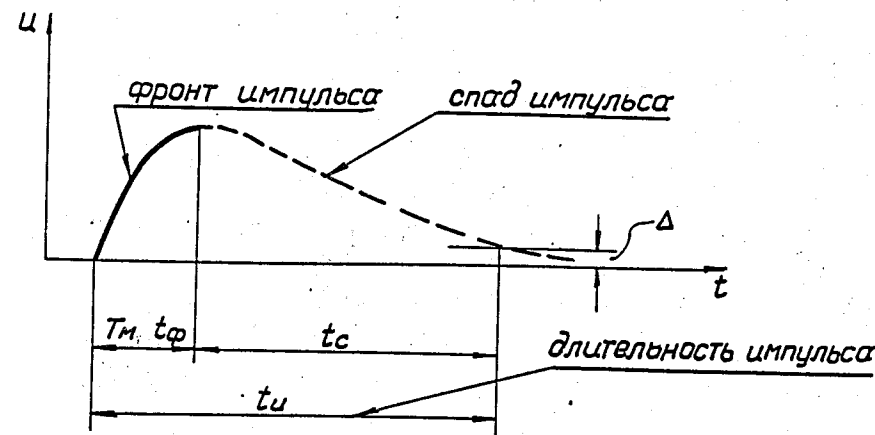


Рис.2. Фронт, спад и длительность импульсов.

Работа не затрагивает вопросов, связанных с другими способами борьбы с этой погрешностью, например, вопросов формирования сигналов оптимальной формы, так как они неоднократно и подробно освещались ранее.

Определения и терминология

Отсутствие в технической литературе, посвященной задачам борьбы с погрешностью из-за наложений, единой и полной терминологии и определений не позволяет оставить без внимания этот вопрос.

Фронт и спад импульса. С точки зрения проблемы наложений удобно рассматривать инспектируемые импульсы состоящими из двух частей (см. рис. 2):

фронт импульса - часть импульса, существенная для амплитудных измерений и занимающая интервал времени (t_{ϕ}) от начала импульса до момента достижения им максимума ($t_{\phi} = T_M$);

спад импульса - часть импульса, занимающая интервал времени (t_c) от конца фронта до некоторого момента, при котором импульс спадает до заданной величины Δ .

Длительность импульса. Естественно принять за длительность импульса интервал времени, определяемый суммой времени фронта и спада ($t_u = t_{\phi} + t_c$). Так как в системах обычно присутствуют фильтры, с бесконечным временем памяти, то длительность импульса не будет оставаться постоянной при изменении амплитуды сигнала.

Наложение импульсов. Определим наложение как событие, при котором в интервале $0, t_u$ появляется более одного импульса. Из этого определения и из определения длительности следует, что погрешность при измерении наложения будет всегда превышать по абсолютному значению величину Δ .

Классификация наложений. Удобно все возможные наложения разделить на две группы: наложения фронта на фронт (или, короче, наложения на фронт) и наложения фронта на спад (или, короче, наложения на спад) (см. рис. 3 и 4). Для наложений на спад независимо от величины наложенных сигналов можно выделить импульс-помеху. Для на-

ложений на фронт такое выделение имеет смысл только в том случае, если один из наложенных импульсов меньше порога анализатора, а другой больше, или если заранее известно, какой из импульсов должен был бы приниматься на анализ. При наложении на фронт оба импульса не пригодны для анализа. При наложении на спад не пригоден только последующий. К нему же, собственно, и относится сам факт наложения на спад. В работе /13/ приводится также классификация наложений по величине амплитуд суммируемых импульсов: "малые на малые", "большие на большие" и "большие на малые". При этом под "малым" понимается импульс с амплитудой, меньшей порога анализатора, а под "большим" - импульс с амплитудой, превышающей порог.

Вероятность образования наложений. Вероятность образования наложений зависит от вида функции распределения исходных импульсов, их длительности и средней частоты следования (n_0). Так как в общем случае длительность импульса зависит от его амплитуды, то определение вероятности наложений возможно лишь для конкретного амплитудного спектра.

В случае равномерного спектра, при пуассоновском распределении и при времени наложения, равном t , вероятность наложений может быть определена по формуле

$$p(N) = \int_0^t n_0 e^{-n_0 \alpha} d\alpha. \quad (1-1)$$

После интегрирования получим

$$p(N) = 1 - e^{-n_0 t}. \quad (1-2)$$

При $n_0 t \ll 1$ выражение (1-2) может быть заменено приближенным

$$p(N) \approx n_0 t. \quad (1-3)$$

Подставив в (1-2) и (1-3) вместо t величины t_{ϕ} , t_c или t_u , можно получить, соответственно, выражения для определения относительного числа наложений на фронт, на спад, тех и других совместно.

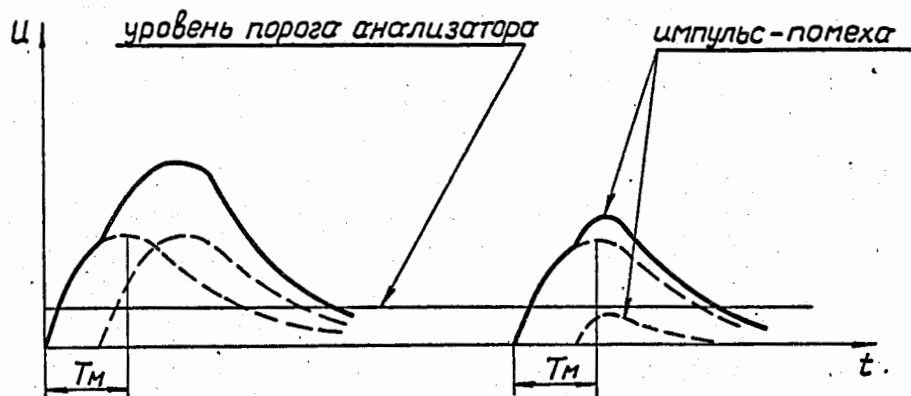


Рис.3. Наложение на фронт.

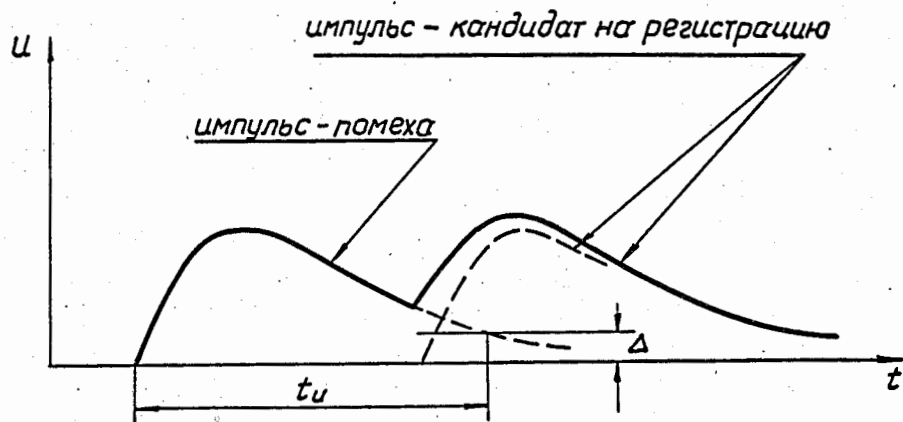


Рис.4. Наложение на спад.

При CR - RC формировании между t_c и t_f существует соотношение^{/2/}

$$t_c = (7,5 + 17,5) t_f \quad (1-4)$$

Следовательно, при CR - RC формировании основная доля в общем числе наложений принадлежит наложениям на спад.

Выбор диапазона отсекаемых наложений. Вопрос выбора диапазона не является тривиальным. Выбранный диапазон должен обеспечить: во-первых, соблюдение разумного компромисса между погрешностью из-за наложений, возрастающей с уменьшением диапазона, и интенсивностью регистрации, падающей с его увеличением, и, во-вторых, сведение к минимуму числа случаев отклонения событий, не искаженных наложениями. (В сцинтилляционном спектрометре такие случаи возможны, например, по причине сопровождения каждого импульса так называемым "послеимпульсом" /13,14/).

В связи с этим проблема отсекаемых наложений в возможно большем диапазоне только частично относится к инспекторам наложений, в основном же это более общая проблема улучшения отношения сигнал-шум (сигнал-помеха) в системе. Так, в работе /3/ для реализации возможности увеличения диапазона без увеличения числа случаев отклонения событий, не искаженных наложениями, предлагается применение нелинейных фильтров с варикапами, уменьшающих амплитуду малого сигнала, появляющегося одновременно с большим. В /13/ обращается внимание на возможность разработки электронной системы, отличающей "послеимпульс" от нормального, рабочего импульса.

Способы определения наложений. Классификация инспекторов по способам определения наложений. Наложения могут быть определены с помощью: 1) исследования формы сигнала-кандидата на анализ; 2) измерения величины сигнала в момент поступления следующего; 3) исследования величины временных интервалов между началами смежных импульсов.

В соответствии с этими способами определения наложений инспекторы могут быть разделены на следующие группы: 1) инспекторы формы; 2) инспекторы-индикаторы нуля; 3) инспекторы интервалов.

Первый способ применяется, в основном, для определения наложений на фронт, второй – на спад, третий – для тех и других наложений. Первому и второму способам присущи принципиальные ограничения по величине диапазона отсекаемых наложений. В первом это связано с тем, что форма сигнала может иметь изменение не только из-за наложений, но и по другим причинам, например, из-за флуктуаций фронта входного сигнала /4/. Несмотря на это инспекторы формы довольно часто применяются в системах с формированием на двойной линии задержки, где они допускают простое исполнение /5+10/. Во втором способе указанное ограничение диапазона связано с тем, что при увеличении диапазона увеличиваются требования к сохранению формы спада импульса в процессе преобразования сигнала и требования к точности и стабильности порога дискриминатора, определяющего момент прохождения спада импульса через заданный уровень. Оба требования непосредственно проистекают из принципа, лежащего в основе способа. Одновременное выполнение этих требований – непростая, противоречивая задача. Так, сохранение формы спада сигнала требует всюду связи только по постоянному току, в то время как отсутствие таковой облегчает выполнение требований стабильности и точности порога дискриминации. Если элемент связи между усилителем и АЦП выполнен в виде CR –цепочки с постоянной времени, примерно равной постоянной времени формирующих цепей усилителя, то этот вопрос может быть решен путем отбора сигнала на инспектор до элемента связи с последующей передачей его через аналогичную цепочку. Однако трудности, связанные с дрейфом начальных уровней напряжений каскадов, при этом не устраняются, к тому же из-за двухполярности сигнала возникает необходимость применения элементов, запрещающих поступление на анализ импульсов, которые появляются в моменты времени, близкие к времени прохождения inspected сигнала через нулевую линию. Третий способ имеет большие возможности как по величине максимального диапазона, так и по некоторым другим характеристикам, рассматриваемым в дальнейшем. В то время как приборы с использованием первого и второго способов должны иметь в качестве входных импульсы, идентичные импульсам на входе АЦП, инспекторы, использующие третий способ, наоборот, чаще имеют в качестве входных “быстрые” импульсы, резко отличающиеся по форме от анализируемых,

но привязанные к их началу. Эти импульсы могут быть сформированы из сигналов, снимаемых с какого-либо из элементов линейной части тракта. Последующее формирование проще исполнить, если снимаемый сигнал еще не подвергался интегрированию. Из-за необходимости формирования “быстрых” сигналов инспекторы интервалов часто сложнее, чем инспекторы-индикаторы нуля или инспекторы формы. Несмотря на это, из-за ряда других преимуществ они получили большее распространение. В настоящей работе в дальнейшем рассматриваются только инспекторы интервалов.

Для полноты картины следует сказать о возможности создания устройств, которые должны не отбрасывать наложенные события, а корректировать их. Так, в работе /19/ предложен прибор, способный осуществлять коррекцию наложенных событий при измерении высокоэнергетического пика малой интенсивности в условиях малоэнергетического фона большой интенсивности. Функционирование прибора основано на выделении в чистом виде с помощью линейных ворот импульса-помехи с последующим его формированием и вычитанием из анализируемого.

II . Инспекторы интервалов

Классификация, принцип работы, характеристики, требования

Классификация инспекторов интервалов по виду отсекаемых наложений. В соответствии с видом отсекаемых наложений инспекторы наложений (инспекторы интервалов)распадаются на группы: инспекторов наложений на фронт, инспекторов наложений на спад и инспекторов наложений, опознающих и отсекающих оба вида наложений. Эта классификация не является искусственной, ибо зачастую инспектирование наложений на фронт и на спад осуществляется отдельными приборами или отдельными устройствами одного прибора. Есть существенное различие в способах выполнения этих устройств и в требованиях к ним.

Принцип работы. Инспекторы интервалов определяют факт наложений путем сравнения временных интервалов (t) между импульсами-кандидатами на анализ с эталонными интервалами, задаваемыми в приборах тем или иным способом и равными $t_{ф}$, $t_{с}$ или $t_{н}$, при инспекти-

ровании, соответственно, наложенный на фронт, на спад, тех и других вместе взятых. При выполнении соотношения $t < (t_{\phi} t_c, t_d)$ в зависимости от принятой логики работы либо выдается сигнал "наложение", либо не выдается сигнал "нет наложений" /11-17/.

Характеристики инспекторов интервалов. Инспектор интервалов может быть охарактеризован:

1. Динамическим диапазоном, определяемым отношением максимального по амплитуде импульса-кандидата на анализ к минимальному импульсу, еще принимаемому инспектором для опознания наложений.

2. Разрешающим временем, под которым понимается минимальная величина временного интервала между двумя смежными импульсами, которые различаются инспектором как отдельные.

3. Временем защиты, т.е. временем, на которое спектрометр блокируется инспектором после определения факта наложения, а также характером зависимости времени защиты от амплитуды inspectируемых сигналов, если таковая имеется.

4. Временем защиты от наложений на фронт. (характеристика, аналогичная характеристике, рассмотренной в пункте 3, но применяемая в отношении наложений на фронт).

5. Временем защиты от наложений на спад (то же самое, что и в пункте 3, но в отношении наложений на спад).

6. Величиной (наличием или отсутствием) собственного мертвого времени инспектора.

К инспектору наложений на фронт применимы характеристики пунктов 1,2,4,6. К инспектору наложений на спад - характеристики пунктов 1,5,6.

Требования к инспекторам наложений. Инспекторы наложений должны обеспечивать максимум отклонений искаженных импульсов и минимум отклонений неискаженных. Первое требование удовлетворяется малостью разрешающего времени инспектора, большим динамическим диапазоном, определенной функциональной зависимостью времени защиты от амплитуды анализируемых сигналов, отсутствием (или малостью) собственного мертвого времени инспектора, если он настроен на выдачу сигнала "наложение". Второе - умеренным диапазоном, определенной зависимостью времени защиты от амплитуды анализируемых сигналов, от-

сутствием собственного мертвого времени, если инспектор настроен на выдачу сигнала - "наложений нет". С точки зрения удовлетворения этим требованиям и должно оцениваться качество инспекторов. Разберем некоторые из этих требований подробнее.

Требование малости (отсутствия) собственного мертвого времени инспектора. Неудовлетворение этого требования приводит к появлению просчетов, т.е. либо к поступлению на анализ наложенных событий, если инспектор настроен на выдачу сигнала "наложение", либо к отклонению приемлемых событий, если он настроен на выдачу сигнала "наложений нет".

Для инспектора наложений на спад данное требование равносильно требованию срабатывания инспектора на каждый входной сигнал, так как именно удовлетворение этому требованию создает необходимые условия отсутствия просчетов. Действительно, для того чтобы не иметь просчетов, этот инспектор должен срабатывать на каждый из сигналов, предшествующих анализируемому (принимаемому на анализ), следовательно, на каждый входной, так как заранее не известно, какой импульс будет принят на анализ.

Несколько иначе обстоит дело с инспектором наложений на фронт, так как нечувствительность его к входным импульсам во время генерации выходного сигнала не может служить причиной просчетов. С другой стороны, та же нечувствительность в отсутствии выходного сигнала такой причиной является. Поэтому для того чтобы оставить в силе ранее высказанное утверждение о мертвом времени как причине просчетов, под мертвым временем инспектора наложений на фронт следует понимать время нечувствительности его к запуску, отсчитываемой от момента окончания генерации выходного сигнала.

Требование определенной зависимости времени защиты от амплитуды анализируемых сигналов. Время защиты от наложений на фронт должно быть равно времени фронта импульса, а так как последнее постоянно и не зависит от амплитуды сигналов, то, следовательно, и время защиты от наложений на фронт должно быть постоянным и не зависеть от амплитуды анализируемых сигналов. Иначе обсто-

ит дело с временем защиты от наложений на спад. Выше указывалось, что для большинства систем из-за наличия в них фильтров с бесконечным временем памяти имеет место зависимость длительности спада импульса от его амплитуды. Вместе с тем желательно, чтобы время защиты от наложений на спад было всегда равным длительности спада импульсов, ибо отклонение его в меньшую сторону приводит к увеличению погрешности из-за наложений, а отклонение в большую - к неоправданному снижению интенсивности регистрации. Другими словами, отклонение времени защиты от длительности импульса в меньшую сторону приведет к пропускам на анализ наложений, а отклонение в большую - к недопущению на анализ приемлемых событий. Таким образом, невыполнение рассматриваемого требования приводит к нежелательным эффектам, подобным эффектам из-за наличия собственного мертвого времени. Следовательно, в инспекторах наложений на спад и инспекторах, отсекающих наложения обоих видов, время защиты должно находиться в определенной зависимости от амплитуды анализируемого сигнала. В большинстве случаев требуется зависимость логарифмического характера. Так, например, для импульсов после CR-RC формирования (см. Приложение 1) она представляется выражением (П1-4):

$$t_3 = T_M \left(1 + \ln \frac{V_0}{\Delta} \right),$$

где: V_0 - амплитуда импульса; Δ - максимально допустимая погрешность из-за наложения; T_M - время максимума импульса, ($V(T_M) = V_0$).

III. Варианты исполнения инспекторов интервалов

Инспекторы с использованием одновибраторов. Первые из появившихся инспекторов, построенных по способу инспекции временных интервалов, использовали в качестве элемента, запоминающего факт появления импульса, и элемента, задающего эталонный временной интервал, - одновибратор. Простейший инспектор этого типа изображен на рис. 5 /11/.

Короткий импульс, соответствующий по времени началу анализируемого, запускает одновибратор с длительностью выходного сигнала, пример-

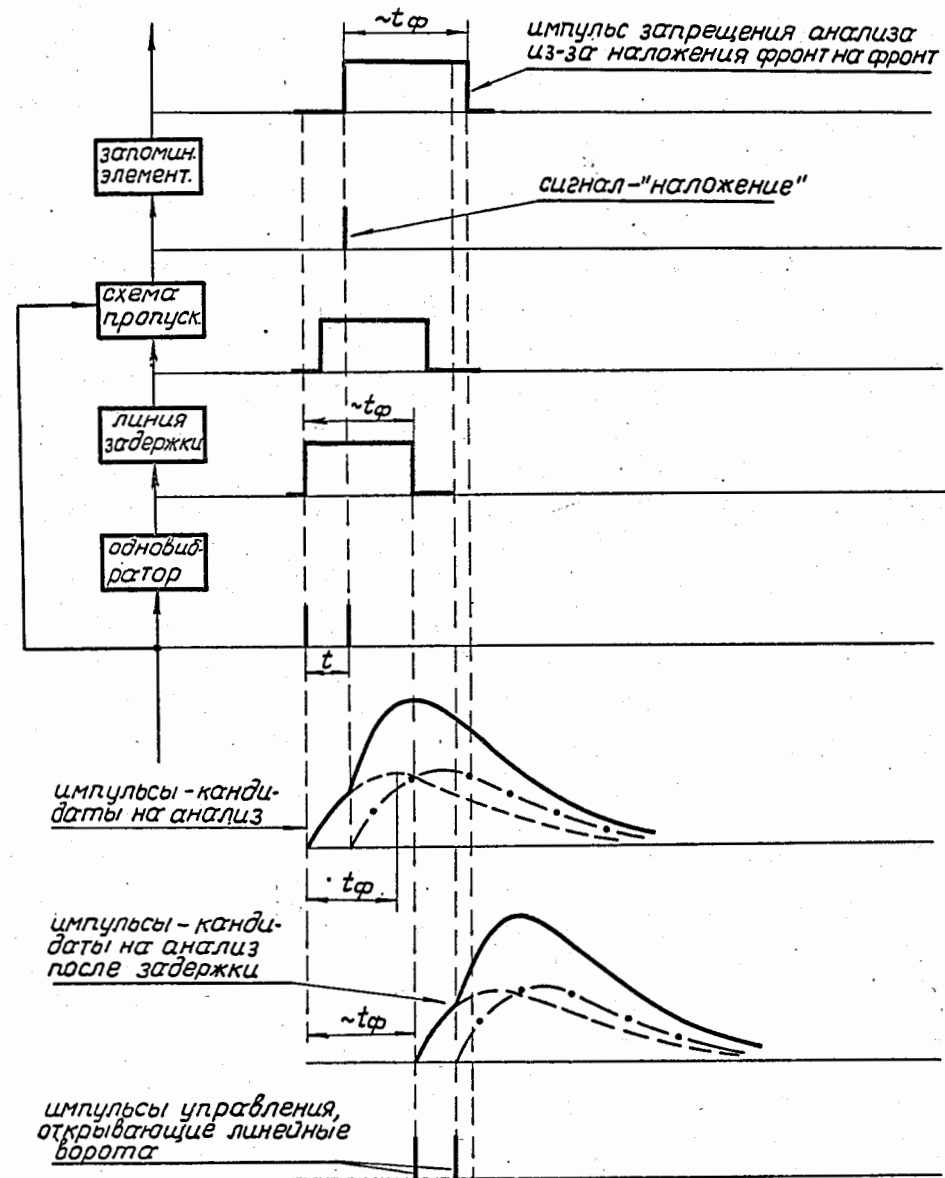


Рис.5. Простейший вариант построения инспектора наложений на фронт.

но равной t_{ϕ} . Импульс одновибратора, пройдя линию задержки, открывает схему пропускания. Если в течение интервала t_{ϕ} появляется еще хотя бы один импульс (т.е. если имеет место наложение на фронт), то он проходит схему пропускания и вызывает на выходе прибора появление сигнала "наложение". Задержка на некоторое время сигнала одновибратора перед подачей на схему пропускания предотвращает выдачу ложных сигналов из-за самосовпадений.

Крупный недостаток инспектора - наличие мертвого времени, обусловленного нечувствительностью одновибратора к запуску в течение некоторого времени τ , отсчитываемого от момента окончания предыдущего импульса. По этой причине с определенной вероятностью p_1 наложенное событие может быть пропущено на анализ.

Принцип работы схемы /12/, изображенной на рис. 6, практически тот же самый, что и у предыдущей. Однако наличие в ней счетного элемента (триггера) приводит к уменьшению вдвое средней интенсивности сигналов запуска одновибратора и к статистическому разравниванию их. В связи с этим вероятность пропуска наложения на анализ (p_2) снижается. Этот эффект количественно может быть охарактеризован отношением p_1 / p_2 (см. Приложение 2) и вычислен при $T n_0 \ll 1$ и $\tau < T$ по приближенной формуле (П2-1):

$$\frac{p_1}{p_2} = (T n_0)^{-1},$$

где n_0 - средняя интенсивность поступления входных сигналов, T - длительность импульса одновибратора. При $T n_0 = 0,1$ вероятность пропуска наложений на анализ снижается примерно в 10 раз.

На рис. 8 приведена схема инспектора наложений на фронт, предложенная автором настоящей работы, вероятность пропуска наложений в которой значительно ниже, чем у предыдущей. Действительно, определение отношения p_1 / p_3 по приближенной формуле (П2-2)

$$\frac{p_1}{p_3} = 2 (T n_0)^{-2}$$

указывает на уменьшение этой вероятности в условиях, аналогичных ранее рассмотренным, в 200 раз.

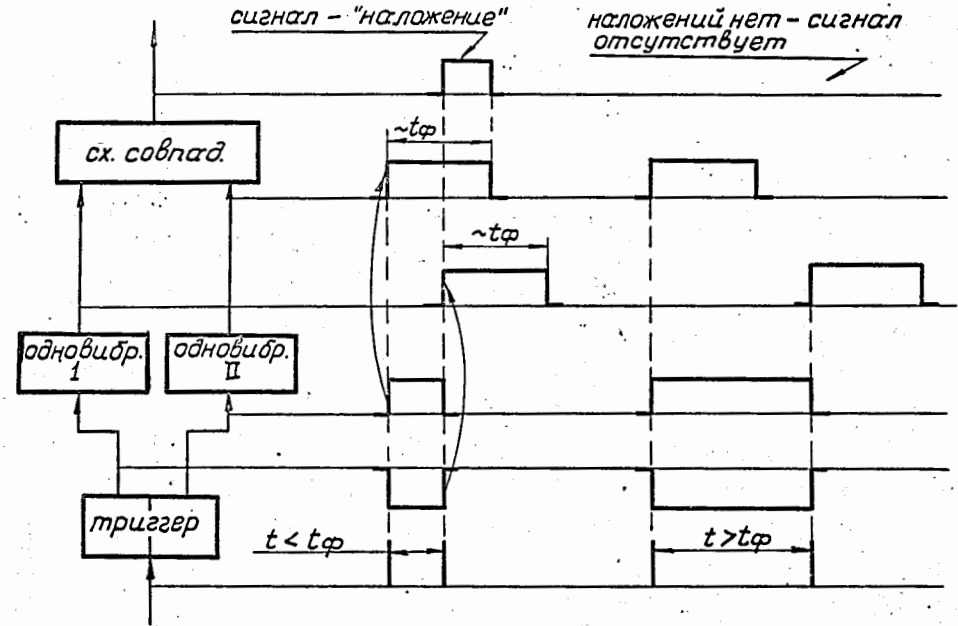


Рис.6. Простой инспектор наложений на фронт с уменьшенной вероятностью пропуска наложенных событий.

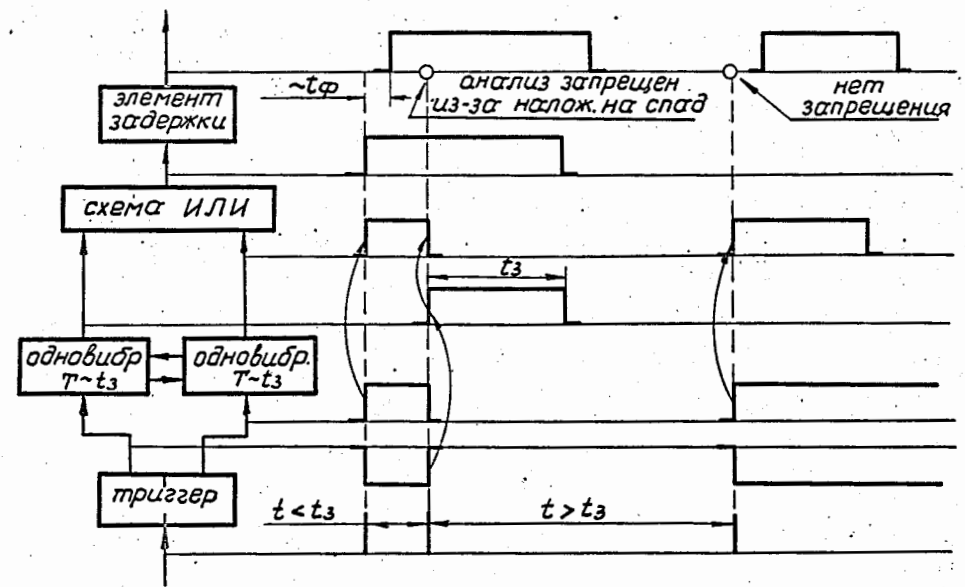


Рис.7. Инспектор наложений на спад с использованием двух взаимосвязанных одновибраторов с принудительным сбросом.

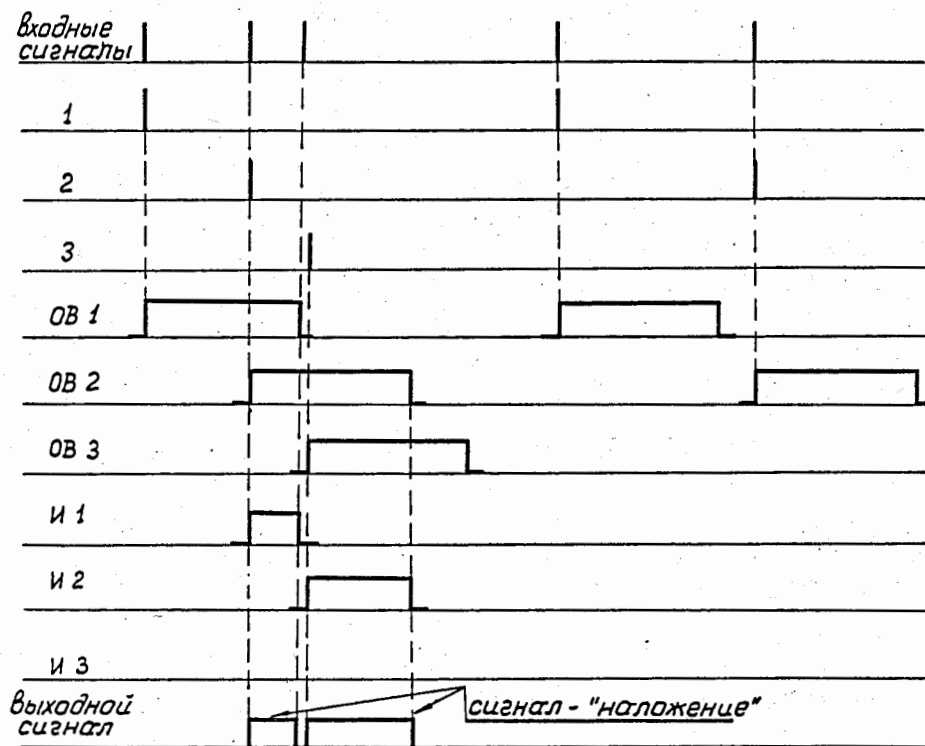
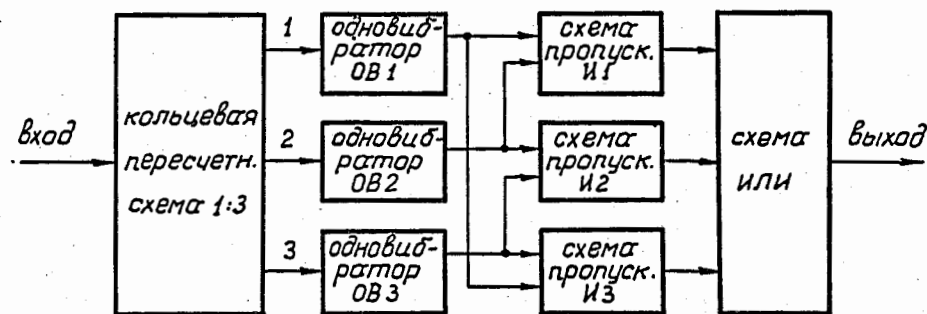


Рис.8. Инспектор наложений на фронт с малой вероятностью пропуска наложенных событий, построенный полностью на стандартных схемах.

Нечувствительность одновибраторов к запуску во время генерации выходного сигнала не нарушает правильного функционирования рассмотренных приборов, но создает препятствия к использованию подобных схем в качестве инспекторов наложений на спад, так как для этого случая требуется реакция схемы на каждый входной сигнал. Одно из возможных решений - применение одновибраторов с принудительным сбросом, как это сделано в работе /12/ (см. рис. 7). Прибор выдает сигнал, запрещающий анализ импульса, если этому импульсу в интервале меньшем, чем время защиты инспектора (t_3), предшествовал другой. Время защиты инспектора t_3 постоянно и равно длительности импульса одновибратора, поэтому он мало пригоден для применений в системе с RC-фильтрами. Из-за нечувствительности одновибраторов к запуску после окончания генерации выходного сигнала в этой схеме, также как и в предыдущих, возможен пропуск на анализ наложенных событий.

Разрешающее время рассмотренной группы инспекторов зависит, в основном, от длительности сигналов, поступающих на вход инспектора, и времени фронта импульса одновибратора. В принципе оно может быть сделано достаточно малым.

На рис. 9 изображен инспектор наложений, описанный в работе /13/. Особенность прибора - определение нижнего порогового уровня анализируемых импульсов не непосредственной их дискриминацией, а с помощью дискриминации соответствующих им "быстрых" импульсов, выполняемое дискриминатором верхнего уровня. Благодаря этому автоматически отбрасываются наложения допороговых импульсов друг на друга (наложения "малые" на "малые"), при этом загрузка тракта и инспектора уменьшается.

Функционирование прибора легко проследить непосредственно по блок-схеме и временным диаграммам рис. 9. При этом следует учесть, что одновибратор выдает сигнал на выходе 1 (сигнал - "нет наложения") только в том случае, если он не сброшен принудительно.

Время защиты от наложений на спад в этом приборе, так же как и в предыдущих, постоянно и равно времени задержки в линии. Время защиты от наложений на фронт определяется разностью длительности импульса одновибратора и времени задержки в линии ($t_{з.ф.} = t_0 - t_3$). Схема

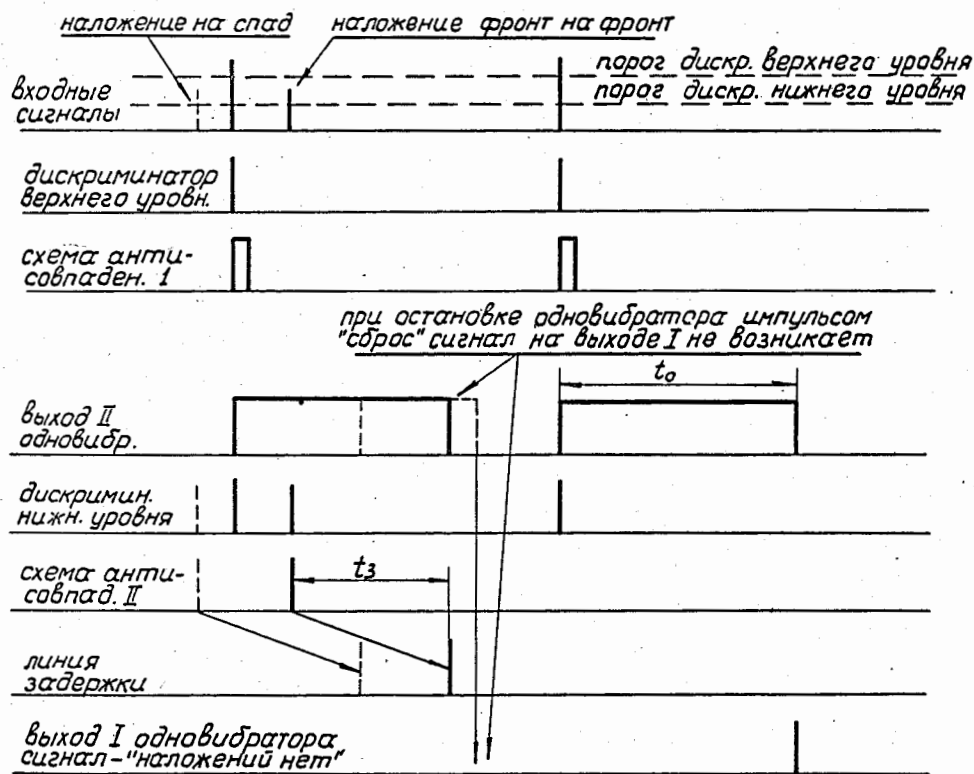
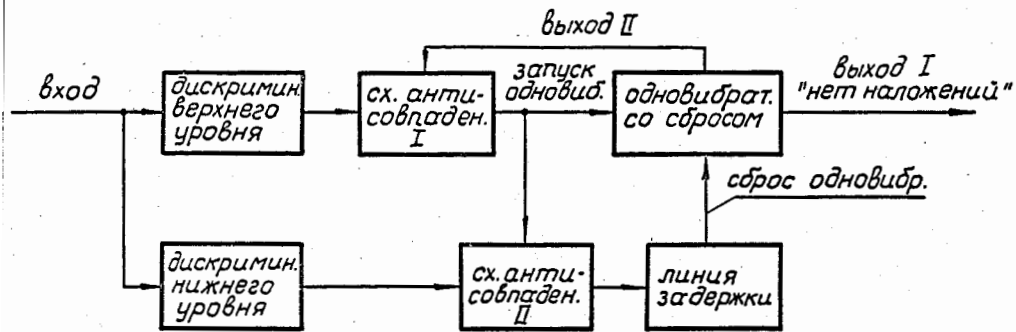


Рис.9. Инспектор для отсекаания наложений на фронт и на спад с использованием одновибратора с принудительным сбросом.

антисовпадений II запрещает поступление на линию задержки импульса, вызвавшего запуск одновибратора, т.е. играет роль, подобную роли линии задержки в ранее рассмотренной схеме на рис. 6. Схема антисовпадений I предотвращает поступление сигналов на запуск одновибратора в период генерации им выходного сигнала. Дискриминатор нижнего уровня определяет нижний уровень сигнала-помехи, принимаемого инспектором для опознавания наложений, т.е. определяет динамический диапазон инспектора.

Авторами отмечается высокая эффективность прибора и сохранение ее при увеличении частоты следования событий вплоть до $7 \cdot 10^5$ событий/сек. Динамический диапазон инспектора - 60. Разрешающее время

20 нсек и определяется, в основном, мертвым временем дискриминатора нижнего уровня. В [13] приводится блок-схема инспектора, в котором с помощью линейных ворот предполагается устранить зависимость разрешающего времени инспектора от мертвого времени дискриминатора нижнего уровня.

Использование в рассмотренных инспекторах только широко распространенных стандартных схем можно считать их большим достоинством. Однако возможности инспекторов с одновибраторами довольно ограничены. Так, например, на их основе нельзя построить систему, отклоняющую наложения не по абсолютной величине погрешности, а по относительной, нельзя построить инспектор с определенной зависимостью времени защиты от амплитуды анализируемого сигнала и т.д.

Инспекторы наложений с использованием схем формирования пилообразного напряжения. В отличие от одновибраторов схемы формирования пилообразного напряжения (называемые в дальнейшем для краткости интеграторами) способны осуществлять линейное преобразование сигнала. Поэтому при их использовании появляется возможность построения инспекторов с необходимой функциональной зависимостью времени защиты от амплитуды анализируемых импульсов, инспекторов с отклонением наложений по относительной величине погрешности, возможность простого исполнения устройств, отсекающих оба вида наложений. В инспекторах наложений, использующих интеграторы, облегчается выполнение требований в отношении отсутствия собственного мертвого времени.

На рис. 10 изображен инспектор, выполненный на базе интегратора и схемы пропускания /14/. Устройство выполняет функции инспектора наложений на фронт и на спад. Факт появления импульса запоминается на время защиты интегратором, в течение которого его выходное напряжение держит в открытом состоянии схему пропускания. Если в этот интервал времени приходит еще хотя бы один импульс, то он поступает на вход одновибратора и вызывает его срабатывание. При этом на выходе устройства появляется сигнал "наложение".

Разрешающее время инспектора определяется, в основном, длительностью входных сигналов и может быть сделано достаточно малым. Недостаток прибора - наличие собственного мертвого времени, обусловленного присутствием в нем одновибратора, так что возможности интегратора в этой схеме полностью не реализованы.

В /14/ описаны два инспектора, выполненные по приведенной блок-схеме, с разрешающим временем порядка 60-100 нсек. Один из них применялся при амплитудных измерениях, другой - при временных.

В работе /15/ описан прибор, имеющий два отдельных канала, для инспектирования наложений на фронт и на спад (см. рис. 11). Канал инспектирования наложений на фронт подобен рассмотренному выше инспектору, поэтому пояснений не требует. Канал инспектирования наложений на спад построен на базе интегратора и дифференциального усилителя, играющего роль схемы сравнения. Входной импульс запоминается на интеграторе, напряжение которого подается на дифференциальный усилитель, где оно сравнивается с опорным и в случае его превышения инициирует выходной сигнал - "наложение на спад". Устройство не содержит элементов, обладающих мертвым временем, поэтому требование равенства нулю его собственного мертвого времени полностью удовлетворяется. Схемы инспекторов, подобные только что рассмотренным, приведены также в работе /16/.

На рис. 12 представлены блок-схема и временные диаграммы инспектора, описанного в работе /17/. Короткие импульсы, соответствующие по времени началу анализируемых, распределяются в два канала: в одном из них они задерживаются, усиливаются и инвертируются, в другом ис-

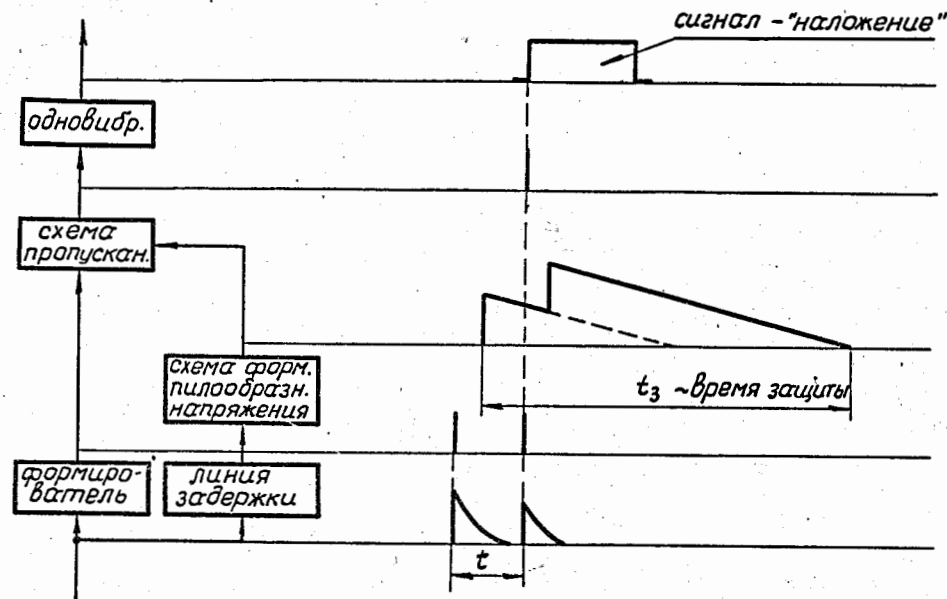


Рис.10. Инспектор, использующий схемы формирования пилообразного напряжения, с отдельными каналами инспектирования на фронт и на спад.

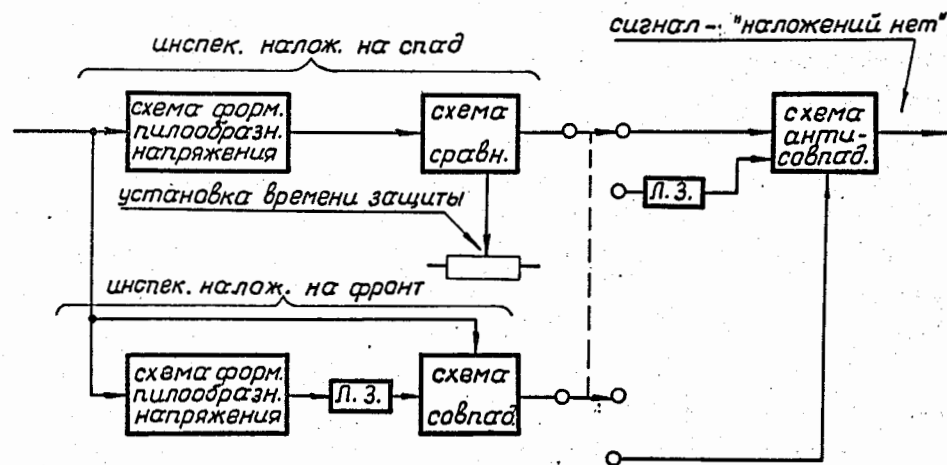


Рис.11. Инспектор наложений с использованием схемы формирования пилообразного напряжения.

пользуются для формирования пилообразного напряжения. Сигналы с выходов обоих каналов поступают на схему суммирования, а затем на дискриминатор пересечения нулевого уровня. Усилитель-инвертор настраивается так, что при отсутствии наложений сумма напряжений должна пересечь нулевую линию, при этом с дискриминатора выдается сигнал - "наложение нет". В противном случае сигнал отсутствует.

Каскады инспектора осуществляют лишь линейные преобразования сигналов, поэтому устройство, в целом, не имеет мертвого времени.

Если амплитуды входных сигналов инспектора пропорциональны амплитудам анализируемых сигналов, то отсеечение наложений будет происходить при определенном процентном отношении между наложенными импульсами. Действительно, в этом приборе будет иметь место отсеечение наложений на фронт, если удовлетворяется неравенство (аналогично и на спад, но при других K):

$$\frac{V_2}{V_1} > \frac{K_2 - K_1}{K_3} = \text{const},$$

где V_1 и V_2 , соответственно, амплитуда 1-го и 2-го импульса, K_1 , K_2 и K_3 - коэффициенты передачи каскадов прибора. (Смысл этих коэффициентов легко уяснить при рассмотрении рис. 12). Рассмотренное свойство инспектора может быть полезно для реализации большего динамического диапазона при наличии "последимпульса". Естественно, что при стандартизации входных сигналов по амплитуде это свойство инспектора утрачивается.

При большем наклоне пилообразного напряжения прибор отсекает, в основном, наложения на фронт, при малом - оба вида наложений. В этом случае величина наклона пилообразного напряжения определяет время защиты на спад инспектора. Схема формирования пилообразного напряжения должна запускаться строго однополярным сигналом. В противном случае амплитуда пилообразного напряжения не будет пропорциональна амплитуде входного сигнала, что приведет к нарушению правильного функционирования устройства. Известно, что однополярность сигнала может быть достигнута: введением всюду связи по постоянному току, компенсацией

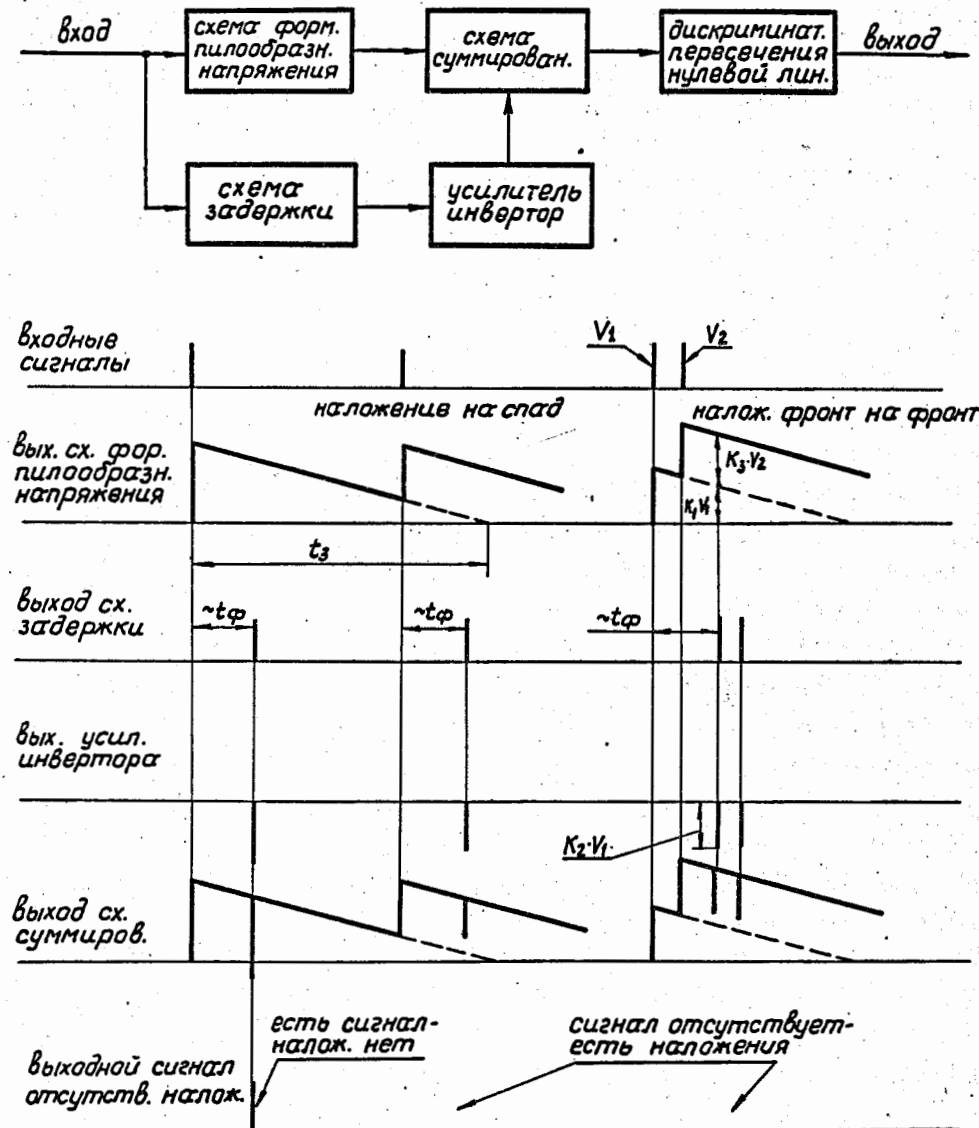


Рис.12. Инспектор, отклоняющий наложения по относительной величине погрешности.

действия предшествующих постоянных времен (метод исключения полюса нулем) или введением нелинейности в систему. В рассматриваемом устройстве избран последний путь. Схема формирования пилообразного напряжения имеет в своем составе усилитель тока и зарядную емкость. Между усилителем тока и зарядной емкостью установлен диод с небольшим обратным смещением. Порог такой системы достаточно мал, так как он определяется не только величиной обратного смещения диода, но и коэффициентом передачи усилительного каскада по напряжению, ибо при закрытом диоде каскад работает в режиме усиления напряжения.

Прибор испытывался и применялся во временных и амплитудных измерениях при средних скоростях счета до $5,5 \cdot 10^4$ имп/сек с динамическим диапазоном до 50. Разрешающее время инспектора - порядка единиц нсек (определяется длительностью входных импульсов).

Все рассмотренные выше инспекторы с использованием интеграторов могут иметь режим работы, при котором время защиты на спад будет линейно зависеть от амплитуды анализируемых импульсов. Для этого необходимо обеспечить пропорциональность амплитуд входных сигналов инспектора амплитудам анализируемых импульсов. При стандартизации входных сигналов по амплитуде время защиты на спад будет постоянным. Оба режима мало подходят для системы с RC формированием, так как в этом случае оптимальной будет зависимость логарифмического вида.

На рис. 13 изображен инспектор наложений на спад, разработанный для использования в амплитудном спектрометре с RC-фильтрами. Несмотря на сходство в построении и функционировании с прибором, схема которого дана на рис. 11, он существенно отличается от последнего (да и от всех других ранее рассмотренных) характером зависимости времени защиты от амплитуды анализируемого сигнала. В данном приборе эта зависимость имеет логарифмический характер, аналогичный характеру зависимости длительности импульса от амплитуды $t_{II} = \phi(\ln V)$, имеющему место в системах с RC-фильтрами. Исполнение прибора позволяет обеспечить хорошее совпадение этих зависимостей друг с другом в динамическом диапазоне амплитуд входных сигналов вплоть до 500-1000 при различных значениях постоянных времени фильтров и допустимой ве-

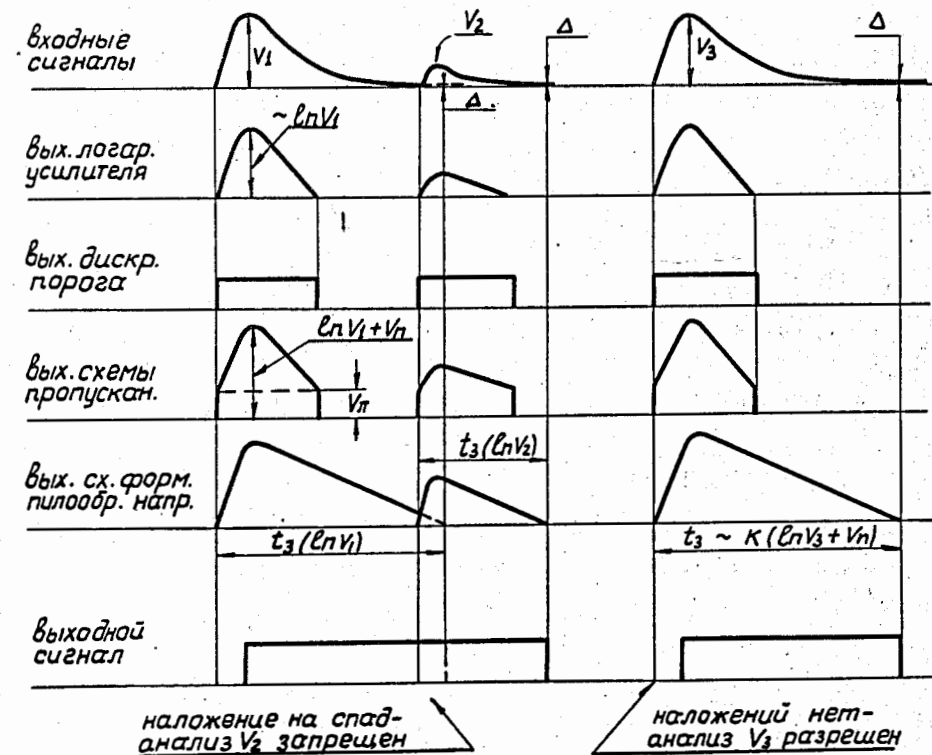
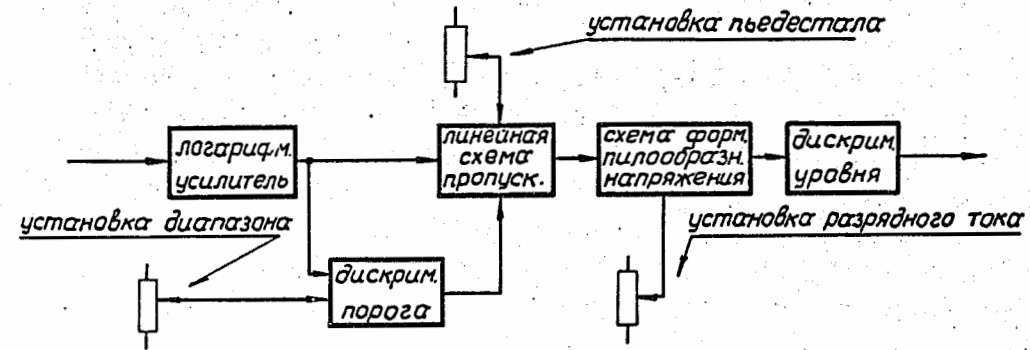


Рис.13. Инспектор наложений на спад с логарифмической зависимостью времени защиты от амплитуды входного сигнала.

личины погрешности из-за наложений. В этом случае, как это уже отмечалось ранее, создаются необходимые условия для отсутствия пропусков на анализ событий, искаженных наложениями. Эквивалентность зависимостей $t_3 = \phi(\ln V)$ и $t_u = \phi(\ln V)$ (совпадение графиков зависимостей) достигается установкой надлежащего тока разряда схемы формирования пилообразного напряжения, определяющего наклон графика зависимости $t_3 = \phi(\ln V)$ в плоскости $t_3, \ln V$ и установкой надлежащего пьедестала линейных ворот (линейной схемы пропускания), определяющего положение графика на плоскости.

В этом приборе, так же как и в ряде других с использованием интеграторов, нет каскадов, обладающих собственным мертвым временем, поэтому и прибор в целом его не имеет.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить благодарность А.Н. Синаеву за детальное обсуждение работы и ценные советы.

Приложение 1

Зависимость длительности импульса от его амплитуды для сигналов после CR-RC формирования

В первом разделе настоящей работы изложены требования к инспектору наложений на спад, в том числе обоснована необходимость равенства времени защиты (t_3) этого инспектора длительности импульса (t_u) в определенном диапазоне амплитуд входных сигналов, т.е. обосновано требование эквивалентности зависимостей $t_3 = \phi(V_0)$ и $t_u = \phi(V_0)$.

Найдем зависимость $t_u = \phi(V_0)$ для импульсов на входе амплитудно-цифрового преобразователя (АЦП) в системе с $(CR)_K$ -RC-фильтром и при непосредственной связи между последним каскадом усилителя и АЦП /14/. Для этого случая сигнал представляется выражением /2/:

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{T}} e^{-t/\tau} \quad (\text{П1-1})$$

Интересующая нас зависимость может быть определена из (П1-1), если положить $V(t) = \Delta$ (Δ - мгновенное значение $V(t)$ в точке t_u , при

котором можно считать импульс закончившимся), а $t = t_u$, т.е. из выражения:

$$\Delta = V_0 e^{-\frac{t_u}{T}} e^{-t_u/\tau} \quad (\text{П1-2})$$

После логарифмирования получим:

$$\frac{t_u}{T} + \ln \frac{t_u}{T} = \ln \frac{V_0}{\Delta} + 1, \quad (\text{П1-3})$$

или с учетом того, что в интересующем нас диапазоне $\frac{t_u}{T} > 1$, приближенно:

$$t_u(t_3) = T \left(1 + \ln \frac{V_0}{\Delta} \right). \quad (\text{П1-4})$$

Выражение (П1-4) свидетельствует о том, что время защиты должно для этого случая находиться в логарифмической зависимости от амплитуды анализируемого сигнала. Погрешность из-за пренебрежения членом $\ln \frac{t_u}{T}$ даже в неблагоприятном случае ($\frac{V_0}{\Delta} = 1,25$) составляет не более 30%. В большинстве наиболее распространенных амплитудных спектрометров с использованием RC-фильтров зависимость длительности импульса от амплитуды имеет характер, подобный характеру полученной зависимости (П1-4).

Приложение 2

Просчеты в инспекторах наложений, построенных на основе одновибраторов и счетных элементов

Функция плотности распределения временных интервалов между событиями на выходе пересчетной схемы с коэффициентом пересчета при пуассоновском распределении исходных событий имеет вид /18/:

$$F_1(m=1) = n_0 e^{-n_0 t}$$

$$F_2(m=2) = t n_0^2 e^{-n_0 t}$$

$$F_3(m=3) = \frac{1}{2} t^2 n_0^3 e^{-n_0 t}$$

Вероятность появления на выходе пересчетной схемы временных интервалов между событиями величиной от T до $T+\tau$ при выполнении соотношений $T n_0 \ll 1$ и $\tau < T$ может быть представлена приближенно в виде:

$$p_1(T, T+\tau, m=1) \approx \tau n_0 e^{-n_0 T}$$

$$p_2(T, T+\tau, m=2) \approx \tau T n_0^2 e^{-n_0 T}$$

$$p_3(T, T+\tau, m=3) \approx \frac{1}{2} \tau T^2 n_0^3 e^{-n_0 T}$$

Если T и τ , соответственно, длительность и мертвое время обновителя, установленного на выходе пересчетной схемы, подобно тому, как это выполнено в инспекторах наложений на рис. 5, 6 и 8, то $p_1 \cdot p_2 \cdot p_3$ будут пропорциональны вероятности просчетов в инспекторах, следовательно, эффект от применения пересчетных схем может быть оценен при рассмотрении отношений p_1/p_2 и p_1/p_3

$$p_1/p_2 = (T n_0)^{-1} \quad (\text{П2-1})$$

$$p_2/p_3 = 2 (T n_0)^{-2} \quad (\text{П2-2})$$

Л и т е р а т у р а

1. J.E. Sluifers. *Int.Symp. on Nucl. Electronics, Versailles, 1968, 1, 78.*
2. Б.Ю. Семенов, В.А. Антюхов. Препринт ОИЯИ P13-3813, Дубна, 1968.
3. E.Nadav, D.Salzmann. *Int.Symp. on Nucl. Electronics, Versailles, 1968, 1, 72.*

4. Б.Ю. Семенов, В.А. Антюхов. Препринт ОИЯИ P13-3812, Дубна, 1968.
5. L.F.Monier, G.E.Tripard. *Rev.Sci.Instr., 1966, 37, 316.*
6. E.Fuschini, C.Maroni and P.Veronesi. *Nucl. Instr. and Meth., 1966, 41, 153.*
7. J.D.McGervey, V.F.Walters. *Nucl.Instr. and Meth., 1964, 25, 219.*
8. S.Gracovetsky, J.F.Londe. *Nucl. Instr. and Meth., 1968, 63, 349.*
9. C.W.Williams, H.W.Schmitt, F.J.Walter and J.H.Heiler. *Nucl.Instr. and Meth., 1964, 29, 205.*
- 10.Gy Mathe. *Nucl. Instr. and Meth., 1963, 23, 261.*
- 11.S.Rozen. *Nucl.Instr. and Meth., 1961, 11, 316.*
- 12.J.Grunberg, A.Seidman. *Int.Symp. on Nucl. Electr, Versailles, 1968, 1, 68.*
- 13.S.L.Blatt, J.Mahieux, D.Kohler. *Nucl.Instr. and Meth., 1968, 60, 221.*
- 14.M.Moszynski, J.Jastrebski and B.Bengston. *Nucl. Instr. and Meth., 1967, 47, 61.*
- 15.G.Bertolini, V.Mandl, G.Melandrone. *Nucl.Instr. and Meth., 1964, 29, 357.*
- 16.H.Weisberg. *Nucl.Instr. and Meth., 1965, 32, 138.*
- 17.M.Bertollacini, S.Cova, E.Gatti. *Int.Symp. on Nucl. Electr., Versailles, 1968, 1, 65.*
18. А.П. Цыгович, *Ядерная электроника, "Наука", 1967.*
19. В.Б. Иванов, А.М. Шиманский, В.И. Шипилов. *ПТЭ, №6, 5, 1969.*

Рукопись поступила в издательский отдел
30 января 1970 года.