

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ44.3а
И - 266

19/III-79
13 - 12019

О.В.Игнатъев, А.И.Калинин, Н.Ф.Школа

937/2-79

ВРЕМЯ-ЗАВИСИМЫЙ ФИЛЬТР
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

1978

13 - 12019

О.В.Игнатъев*, А.И.Калинин, Н.Ф.Школа*

ВРЕМЯ-ЗАВИСИМЫЙ ФИЛЬТР
ДЛЯ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ

* Уральский политехнический институт, Свердловск

Игнатьев О.В., Калинин А.И., Школа Н.Ф.

13 - 12019

Время-зависимый фильтр для спектрометрических усилителей

Рассматриваются фильтры для спектрометрических усилителей. Приводится анализ шумовых и нагрузочных свойств простого время-зависимого фильтра, состоящего из дифференциатора на линии задержки и управляемого RC-интегратора. Методом весовых функций выведены общие выражения для дисперсии параллельного и последовательного шумов. Коэффициент превышения шума для фильтра составляет 1,125, а длительность импульса $1,35\tau_0 + 0,5$ мкс, где τ_0 - оптимальная постоянная времени CR-RC-фильтра. Приведена экспериментальная зависимость энергетического разрешения от загрузки.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Ignatiev O.V., Kalinin A.I., Shkola N.F.

13 - 12019

Time-Variant Filter for Nuclear Pulse Amplifiers

Filters for nuclear pulse amplifiers are considered. Noise and count rate performances of a common time-variant filter consisting of a delay line shaper and a gated RC integrator are analyzed. By the weight function method general expressions for dispersion of parallel and series noises are derived. The filter normalized noise linewidth is 1.125, the pulse duration is $1,35\tau_0 + 0,5$ mks, where τ_0 is the noise corner time-constant of CR-RC-filter. The experimental dependence of energy resolution on count rate is given.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Основными характеристиками спектрометрических фильтров являются их фильтрующая и нагрузочная способности. Первая выражается через коэффициент превышения шума $K_{п.ш.}$ по отношению к т.н. теоретическому фильтру /cusp-фильтр, для которого $K_{п.ш.} = 1$ /. Нагрузочная способность фильтра зависит от длительности импульса на выходе фильтра. Чем короче длительность, тем меньше вероятность взаимного наложения импульсов, тем выше нагрузочная способность. Длительность импульса принято измерять в оптимальных постоянных времени τ_0 простого CR-RC-фильтра. Наибольшее пространство в серийных и лабораторных спектрометрических усилителях получили квазигауссовские фильтры с различной кратностью интегрирования /от 4 до 7/^{1,2}, характеризуемые $K_{п.ш.} = 1,8-1,13$ и $\tau_{имп. 0,1\%} = 4,3-5,3 / \tau_0$ /по уровню 0,1%/³⁻⁵/. Известен ряд спектрометрических усилителей и фильтров на основе линий задержки /ЛЗ/, обладающих лучшими характеристиками, чем гауссовские формирователи. Диапазон реализуемых с их помощью $K_{п.ш.}$ составляет $1,125 \div 1,035$ при длительностях выходных импульсов $\tau_{имп. 0,1\%} = 2,58-4,9 / \tau_0$. Одним из самых известных фильтров на основе ЛЗ является фильтр с однократным дифференцированием на линии задержки и двукратным интегрированием на RC-цепях /ЛЗ+2·RC/. Такой фильтр обладает наряду с достаточно высокими характеристиками $K_{п.ш.} = 1,11$; $\tau_{имп. 0,1\%} = 4,9 \tau_0 / 16$ / также значительной простотой реализации⁷/. Авторами⁸ /фильтр ЛЗ+RC модифицирован за счет суммирования выходного импульса фильтра ЛЗ+RC с задержанным, инвертированным и ослабленным импульсом с того же формирователя. Такой прием позволил снизить длительность импульса с $13 \tau_0$ /для простого ЛЗ+RC-фильтра/ до

2,58 τ_0 при одновременном изменении $K_{п,ш.}$ с величины 1,096 до 1,125. Недостатком фильтра⁸ следует считать вдвое большее число линий задержки, требующихся для реализации набора постоянных формирования, по сравнению с фильтрами типа ЛЗ+RC и ЛЗ+2·RC. Известен фильтр, обеспечивающий $K_{п,ш.}$, отличающийся всего лишь на 7,5% от теоретического предела⁹. Тип формирования - 2·ЛЗ+/идеальный интегратор/, $\tau_{имп.} = 3,46\tau_0$. Однако практическая реализация такого фильтра чрезвычайно затруднена из-за отсутствия стабилизации по постоянному току идеального интегратора. Попытка избежать этого с помощью стробируемого идеального интегратора приводит к возрастанию $K_{п,ш.}$ до 1,565¹⁰. Фильтр, относящийся к числу т.н. трансверсальных¹¹ характеризуется $K_{п,ш.} = 1,035$ при приемлемой длительности импульса. Такой фильтр содержит "белящий" CR-фильтр верхних частот и линию задержки с отводами, сигнал с которых снимается на буферные усилители и затем суммируется с весом, возрастающим к концу линии по экспоненциальному закону¹². Такой фильтр довольно сложный и обычно имеет одну постоянную формирования, что исключает возможность согласования фильтра с разными блоками детектирования.

Большими возможностями для улучшения нагрузочных характеристик обладают время-зависимые фильтры, т.к. они позволяют получать значительно меньшую длительность выходного импульса при сохранении формы весовой функции, близкой к оптимальной. Особенно интересны время-зависимые фильтры, построенные на основе формирователей с линиями задержки. Так, в работе¹³ описан спектрометрический усилитель, фильтр которого содержит дифференцирующую линию задержки, включенную в мостовую схему, и стробируемый "идеальный" интегратор. При условии, что постоянная спада входного импульса на несколько порядков превышает время формирования на линии задержки, такой фильтр обеспечивает: $K_{п,ш.} = 1,075$, $\tau_{имп.} = 1,73\tau_0$ /против $\tau_{имп.} = 3,46\tau_0$ фильтра /ЛЗ/² + "идеальный" интегратор, имеющего ту же треугольную форму весовой функции/. Основные трудности реализации устройства¹³ связаны с построением качественного стробируемого интегратора и схемы точной временной привязки. В значительной мере от этих недостатков свободно устройство¹⁴. Оно содержит узел дифференцирования на линии задержки с изодромным интеграто-

ром¹⁴ и простой RC-интегратор с электронным ключом, который кратковременно замыкается после достижения максимального значения напряжения на емкости. Точной временной привязки в этом фильтре не требуется.

Целью настоящей работы является анализ шумовых свойств такого время-зависимого фильтра. Структурная схема фильтра приведена на рис. 1а. В исходном состоянии ключ К разомкнут, а параметры ЛЗ+RC-фильтра выбраны оптимальными по отношению к спектральному составу шума. При достижении спектрометрическим импульсом максимального значения электронный ключ замыкается и происходит быстрый разряд конденсатора C_ϕ через параллельно включенные сопротивления R_ϕ и внутреннее сопротивление электронного ключа R_K . Величина R_K выб-

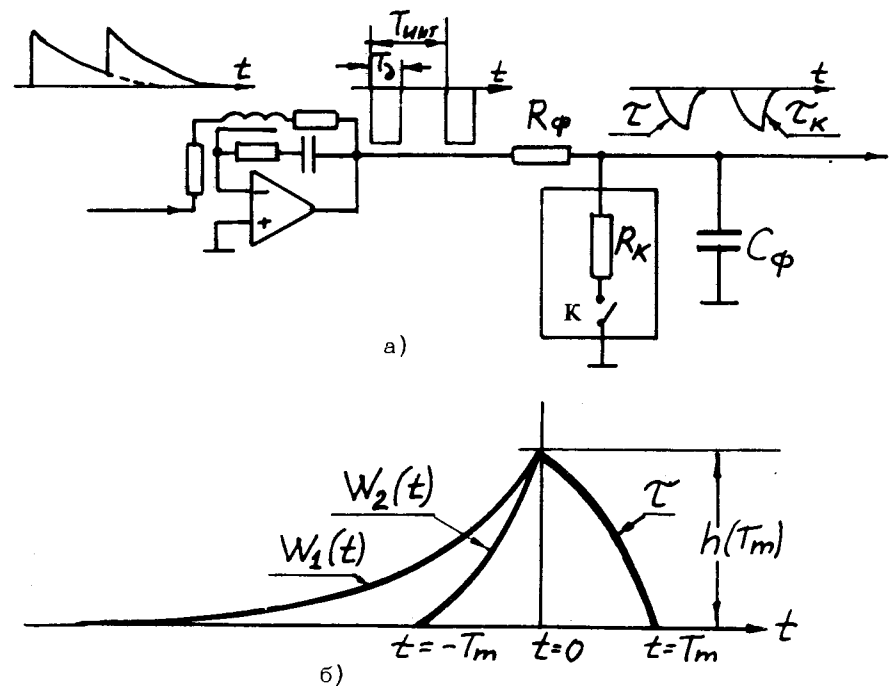


Рис. 1. а/ Упрощенная схема время-зависимого фильтра. б/ Форма весовой функции ($T_{инт} = \infty$). $W_1(t)$ - весовая функция для случая одиночного импульса, $W_2(t)$ - весовая функция для случая, когда два импульса "примыкают" друг к другу ($T_{инт} = T_D = T_M$, $R_K = 0$).

рана равной $0,1R_{\phi}$. Тем самым в значительной мере сокращается длительность выходного спектрометрического импульса. По достижении выходным импульсом уровня, незначительно отличающегося от нулевого, электронный ключ возвращается в исходное состояние.

Такой фильтр относится к классу время-зависимых фильтров с памятью /вид его весовой функции определяется средним временным интервалом между регистрируемыми сигналами/. На рис. 16 приведены весовые функции, рассчитанные для двух крайних случаев: $W_1(t)$ - весовая функция для одиночного импульса, $W_2(t)$ - весовая функция для загрузки, при которой средний интервал равен длительности сформированного на ЛЗ прямоугольного импульса. Как видно из рис.16, влияние предыдущего срабатывания сказывается в укорочении весовой функции фильтра. Это приводит к тому, что уменьшается дисперсия параллельного шума и возрастает дисперсия последовательного. Общее выражение весовой функции для произвольных параметров электронного ключа и интервала между импульсами дается формулой /1/:

$$W(t') = \left\{ \left[1 - e^{-t'/\tau} \right] - e^{-T_{\text{инт}}/\tau} \left[1 - e^{-(t'-T_{\text{инт}})/\tau} \right] - \right. \\ \left. - \left[1 - e^{-(t'-T_{\text{д}})/\tau} \right] + e^{-T_{\text{инт}}/\tau} \left[1 - e^{-(t'-T_{\text{д}}-T_{\text{инт}})/\tau} \right] + \right. \\ \left. + K \cdot e^{-T_{\text{инт}}/\tau_K} \left[1 - e^{-(t'-T_{\text{инт}})/\tau_K} \right] - \right. \\ \left. - K \cdot e^{-T_{\text{инт}}/\tau_K} \left[1 - e^{-(t'-T_{\text{д}}-T_{\text{инт}})/\tau_K} \right] \right\} \cdot \frac{1}{h(T_M)}, \quad /1/$$

где t' - время, отсчитываемое от момента достижения максимального значения выходного импульса; τ - постоянная интегрирования, $\tau = R_{\phi} \cdot C_{\phi}$; $T_{\text{инт}}$ - средний интервал между импульсами $T_{\text{инт}} \geq T_{\text{д}}$; $T_{\text{д}}$ - постоянная дифференцирования на линии задержки; K - коэффициент передачи RC-интегратора при замкнутом электронном ключе; τ_K - постоянная интегрирования при замкнутом ключе; $h(T_M)$ - значение импульсного сигнала в момент максимума.

В соответствии с $^{10/}$ рассчитана нормализованная по сигналу дисперсия параллельного шума:

$$\langle N_S^2 \rangle = \int_0^{\infty} [W(t')]^2 dt' = \\ = \frac{1}{h^2(T_M)} \left\{ T_{\text{д}} \left[1 + e^{-2T_{\text{инт}}/\tau} - 2K \cdot e^{-(\tau_K + \tau)T_{\text{инт}}/\tau_K \cdot \tau} + K^2 \cdot e^{-2T_{\text{инт}}/\tau_K} \right] + \right. \\ \left. + \tau \left[e^{-T_{\text{д}}/\tau} + e^{-2T_{\text{инт}}/\tau} \left(1 - e^{-T_{\text{д}}/\tau} \right) - 1 + 2K \cdot e^{-(\tau_K + \tau)T_{\text{инт}}/\tau_K \cdot \tau} \left(1 + e^{-T_{\text{д}}/\tau_K} \right) \right] + \right. \\ \left. + K \tau \left[2e^{-(\tau_K + \tau)T_{\text{инт}}/\tau_K \cdot \tau} \left(1 - e^{-T_{\text{д}}/\tau_K} \right) - K \cdot e^{-2T_{\text{инт}}/\tau_K} \left(1 - e^{-T_{\text{д}}/\tau_K} \right) \right] + \right. \\ \left. + \frac{2K \tau_K \cdot \tau}{\tau_K + \tau} \cdot e^{-T_{\text{д}}/\tau_K} \left(1 - e^{-2T_{\text{инт}}/\tau_K} \right) \cdot e^{-(T_{\text{д}} + T_{\text{инт}})/\tau} \right\}, \quad /2/$$

Формула /3/ описывает нормализованную по сигналу дисперсию последовательного шума:

$$\langle N_{\Delta}^2 \rangle = \int_0^{\infty} [W'(t')]^2 dt' = \\ = \frac{1}{h^2(T_M)} \left\{ \frac{1}{\tau} \left[\frac{e^{-T_{\text{д}}/\tau}}{\tau} + \frac{e^{-2T_{\text{инт}}/\tau}}{\tau} + \frac{(T_{\text{д}} - 2T_{\text{инт}})^2/\tau}{\tau} \right] + \right. \\ \left. + \frac{2K}{\tau_K + \tau} \cdot e^{-(\tau_K + \tau)T_{\text{инт}}/\tau_K \cdot \tau} \left(e^{-T_{\text{д}}/\tau} - e^{-T_{\text{д}}/\tau_K} \right) + \right. \\ \left. + \frac{K^2}{\tau_K} \left(\frac{e^{-(2T_{\text{д}} + 2T_{\text{инт}})/\tau_K}}{2} - e^{-(T_{\text{д}} + 2T_{\text{инт}})/\tau_K} + \frac{e^{-2T_{\text{инт}}/\tau_K}}{2} \right) \right\}, \quad /3/$$

Используя формулы /2/ и /3/, можно рассчитать в соответствии с $^{10/}$ $K_{\text{п.ш.}}$, описываемого фильтра.

Представляют интерес следующие частные случаи:

1. Одиночный спектрометрический импульс $T_{\text{д}} = 1,04 \tau$, $T_{\text{инт}} = \infty$ /.

$$\langle N_S^2 \rangle = 0,941 \tau, \quad \langle N_{\Delta}^2 \rangle = 1,547/\tau, \quad K_{\text{п.ш.}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \langle N_S^2 \rangle \cdot \langle N_{\Delta}^2 \rangle}{\langle N_S^2 \rangle \cdot \langle N_{\Delta}^2 \rangle}} = 1,098,$$

$$\tau_{\text{орт}} = \sqrt{\langle N_{\Delta}^2 \rangle / \langle N_s^2 \rangle} = 1,282\tau.$$

2. Средний интервал равен времени достижения максимума ($T_d = 1,04\tau$, $T_{\text{инт}} = T$, $K = 0,1$, $\tau_K = 0,1\tau$).

$$\langle N_s^2 \rangle = 0,7055\tau, \quad \langle N_{\Delta}^2 \rangle = 2,093/\tau, \quad K_{\text{п.ш.}} = 1,022 \sqrt{\langle N_s^2 \rangle \langle N_{\Delta}^2 \rangle} = 1,126.$$

3. Условия аналогичны случаю 2, но $R_K = 0$, $K = 0$.

$$\langle N_s^2 \rangle = 0,7054\tau, \quad \langle N_{\Delta}^2 \rangle = 2,0933/\tau, \quad K_{\text{п.ш.}} = 1,1260.$$

Из анализа приведенных данных следует, что нестационарный шум, зависящий от скорости счета, несколько ухудшает шумовые характеристики фильтра /случаи 1 и 2/, тем не менее величина $K_{\text{п.ш.}}$ остается более низкой, чем для гауссовских фильтров, и примерно равной величине $K_{\text{п.ш.}}$ фильтра 8 / $K_{\text{п.ш.}} = 1,125$ /. Одновременно длительность импульса составила в практической схеме $1,35\tau_0 + 0,5$ мкс /против $2,66\tau_0$ в 8 /. Сравнение случаев 2 и 3 показывает, что к параметрам ключа жесткие требования не предъявляются.

На основе ранее опубликованной работы 7 с применением описанного принципа время-зависимого формирования была разработана система спектрометрических блоков для прецизионной спектрометрии в условиях повышенных нагрузок 14 . Результаты измерения зависимости энергетического разрешения по линии MnK_{α} от частоты следования входных сигналов для данной системы представлены в таблице. В разработанном устройстве

Таблица

$n \frac{\text{ИМП}}{C}$	500	1200	2800	5300	8600	1200	15000	20000	30000	40000
$\frac{1}{2} \Delta \text{Si} \text{ } ^9\text{B}$	251	257	258	270	275	280	300	309	338	384

была установлена постоянная формирования, равная 5 мкс. Измерения проведены с Si(Li) - блоком детектирования, в преусилителе которого используется непрерывная стоковая обратная связь. Скорость ухудшения энергетического разрешения с ростом частоты улучшается при использовании блока детектирования с импульсной связью.

Авторы выражают свою признательность Д.А.Гаганову и В.П.Гиманову за организацию испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ortec. Catalog 1004, 1976.
2. Spectroscopy Amplifier CANBERRA, Model 1414, Operating Manual.
3. Зубарев А.М., Субботин В.Г. ОИЯИ, 13-4458, Дубна, 1969.
4. Sluifers J.E. Proc. of Intern.Symp. on Nucl.Electr., Paris, 1968, Report, No 78.
5. Андерт К., Габриель Ф., Калинин А.И. ОИЯИ, 13-7125, Дубна, 1973.
6. Акимов Ю.К. и др. Полупроводниковые детекторы ядерных частиц и их применение. Атомиздат, М., 1967.
7. Игнатъев О.В., Школа Н.Ф. ПТЭ, 1977, № 4, с. 133.
8. Tacetti N., Vocciolini M. Nucl.Instr. & Meth., 1973, v. 113, p. 69.
9. Nowlin C.H. et al. RSI 36, 1965, No. 7, p. 1063-1064.
10. Goulding F. Nucl.Instr. & Meth., 1972, 100, p. 493-504.
11. Miller G.L., Robinson D.A. IEEE Trans. on Nucl.Sci., v. NS-22, 1975, No. 5, p. 2022-2032.
12. Рубинштейн И.А., Рашкован Р.С. ПТЭ, 1975, № 6, с. 123.
13. Karlosac N. IEEE Trans. on Nucl.Sci., v. NS-22, 1975, No. 1, p. 452-456.
14. Школа Н.Ф., Игнатъев О.В., Мокобоцкий М.Я. Измерительная техника. 1978, № 2, с. 33.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 ноября 1978 года.