

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА НЕЙТРОННОГО ДЕТЕКТОРА ДЛЯ ПОРТАТИВНОЙ АППАРАТУРЫ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

П. В. Марунин, А. В. Родигин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В рамках создания на территории Российской Федерации (РФ) системы инструментального надзора за перемещением делящихся материалов и радиоактивных веществ, в институте ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) разрабатывается портативный прибор с применением ³Нейтронного детектора (НД). Прибор предназначен для обнаружения и предварительной идентификации ядерных и радиоактивных материалов по их гамма и нейтронному излучениям. Структурная схема прибора радиационного контроля изображена на рис. 1.

В состав портативного прибора радиационного контроля входят:

- встраиваемый персональный компьютер (ПК) с сенсорным экраном;
- детектор гамма-излучения;
- НД;
- источник постоянного напряжения (батарея питания).

НД содержит гелиевый счетчик нейтронов и электронный блок (ЭБ), в составе которого конструктивно объединяются:

- высоковольтный (ВВ) преобразователь;
- зарядочувствительный усилитель (ЗЧУ) с дискриминатором;
- стабилизирующий преобразователь напряжения.

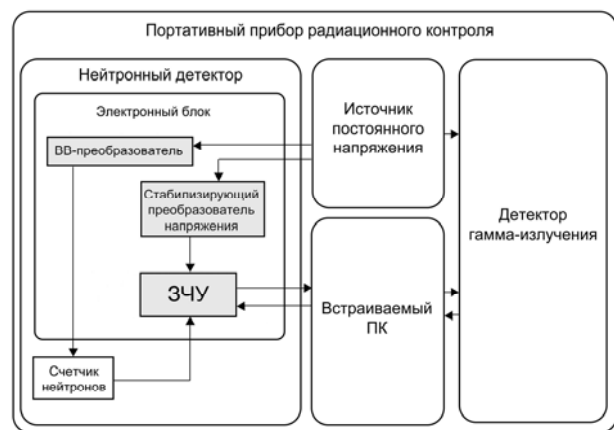


Рис. 1. Структурная схема портативного прибора радиационного контроля

По техническому заданию прибор радиационного контроля должен быть выполнен в корпусе с размерами 180 × 180 × 75 мм, аЭБ, располагающийся внутри, должен иметь габариты не более 103 × 37 × 20 мм.

К ЭБ предъявляются повышенные требования по экономичности и электромагнитной совместимости (ЭМС). ЭБ размещен в металлическом экранирующем корпусе и содержит разделенные экранирующей перегородкой секции ЗЧУ и ВВ-преобразователя. Конструкция корпуса ЭБ обеспечивает защиту ЗЧУ от электромагнитных помех, производимых как ВВ-преобразователем, так и внешними источниками помех. За прототип ЭБ был взят аналогичный блок прибора УРС-02 [1], для которого потребовалась модернизация.

ВВ преобразователь

ВВ-преобразователь должен обеспечивать быстрый (несколько секунд) и точный, с минимальным перерегулированием, выход напряжения питания счетчика нейтронов на необходимый уровень (~1000 В) и при этом быть экономичным.

Экономичные маломощные высоковольтные преобразователи находят применение в источниках питания для детекторов и счетчиков различного рода излучений, фотоэлектронных умножителей. В основном, применяются однотактные прямоходовые [2] и обратноходовые импульсные преобразователи на основе малогабаритных повышающих трансформаторов. В прямоходовых ВВ-преобразователях используется высокий коэффициент трансформации, а импульсный ток в ключе достигает нескольких десятков миллиампер из-за низкой индуктивности первичной обмотки с малым числом витков. Экономичность прямоходового ВВ-преобразователя можно обеспечить только значительным повышением периода следования импульсов. Упомянутый импульсный ток неприемлем с точки зрения ЭМС в нашем случае (из-за сильных наводок на ЗЧУ). Обратноходовые преобразователи, благодаря формированию при закрытии ключа (обратном ходе) выброса напряжения, существенно превышающего напряжение питания, позволяют использовать меньший коэффициент трансформации. Они могут иметь первичную обмотку с увеличенным количеством витков и, соответственно, с повышенной ее индуктивностью. При этом ток ключа можно снизить в несколько раз, как например это сделано в преобразователе прибора УРС-02, где коммутируемый ток составляет 15 мА при токе потребления от батареи питания менее 1 мА. Скважность при этом уменьшена до значения ~4, а накопление тока в первичной обмотке происходит в течение четверти периода. Чтобы обеспечить

эффективную передачу импульса напряжения из первичной обмотки во вторичную обмотку, последняя должна иметь как можно меньшую межвитковую емкость, что достигается секционированием вторичной обмотки. В УРС-02 используется довольно трудоемкая в изготовлении секционированная катушка с ферритовым чашечным сердечником Б18. Несмотря на снижение коммутируемого тока, в УРС-02 наводки на ЗЧУ оставались значительными, на пределе допустимого.

Чтобы дополнительно уменьшить наводки на ЗЧУ, в модернизируемом ЭБ было предложено уменьшить коммутируемый ток обратного хода преобразователя за счет использования одиночной катушки с увеличенной индуктивностью вместо повышающего трансформатора. Принцип накопления тока непосредственно в высоковольтной обмотке позволяет избежать потерь на индуктивности рассеяния при передаче энергии из первичной обмотки во вторичную. Выброс обратного хода катушки должен быть не менее 330 В (как в УРС-02), чтобы после утروения при помощи умножителя напряжения получить требуемые 1000 В. В качестве одиночной малогабаритной катушки-накопителя целесообразно использовать секционированную катушку на ферритовом чашечном сердечнике Б18 или стандартный импульсный трансформатор ТИМ с последовательно

выброс напряжения 330 В. В табл. 1 представлены результаты испытания катушек.

Испытания показали, что оптимальным вариантом среди серийных изделий является катушка на основе ТИМ238В, обеспечивающая выброс обратного хода напряжения необходимой величины при наименьшем токе в ключе (9 мА). Катушка с меньшей индуктивностью требовала накопления большего тока, а катушки ТИМ с большей индуктивностью имели слишком большую межвитковую емкость из-за большого числа витков, из-за чего необходимый выброс обратного хода не обеспечивался. Наилучший результат был получен с секционированной катушкой на чашечном сердечнике Б18, но от нее пришлось отказаться из-за высокой трудоемкости изготовления и монтажа.

Попутно отметим, что применение ТИМ вместо Б18 позволяет снизить габаритную высоту ЭБ с 20 мм до 18 мм.

В модернизированном преобразователе с использованием высоко индуктивной катушки, работающей на малых токах, время накопления тока катушки увеличилось с 80 мкс (прототип) до ~1 мс. Появилась возможность использования более простого генератора, на триггере Шмитта, для запуска ключа со скважностью 2 (меандр). В качестве ключа использован малоомощный высоковольтный (400 В) полевой

Таблица 1

№	Тип	Индук-ть, мГн	Кол-во витков при последовательном соединении обмоток	Коммути-руемый ток, мА	Величина выбросов, В
1	ТИМ219Т	76	192	24	330
2	ТИМ238В	630	360	9	330
3	ТИМ239Т	216	320	12	330
4	ТИМ240В	203	288	15	330
5	ТИМ241В	1180	720	12	180
6	ТИМ242В	748	480	10	330
7	ТИМ250В	1800	960	15	160
8	Б18, секционированная	1170	1050	5	330

соединенными обмотками. Отметим, что пермалловый сердечник (как у ТИМ) в несколько раз превосходит ферритовый по индукции насыщения, что позволяет экономить на количестве витков. В гейгеровском приборе «ПОИСК-2» [3], разработанном в ИЯРФ, в ВВ-преобразователе использовался ТИМ-257В. Однако в ПОИСКе-2 высоко индуктивная катушка на его основе работает в неоптимальном режиме, с перенасыщением сердечника. Ток в катушке достигает 30 мА, а выброс обратного хода составляет только 200 В из-за значительной межвитковой емкости, что не подходит для наших целей. Был испытан ряд катушек с целью определения оптимального варианта: коммутируемого тока менее 10 мА, обеспечивающего

транзистор. Принципиальная электрическая схема ВВ-преобразователя изображена на рис. 2.

Повышение качества стабилизации высокого напряжения достигалось путем оптимизации закона регулирования выходного напряжения. В модернизированном регуляторе использован пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования [4] вместо интегрального в УРС-02. Закон реализован на операционном усилителе (ОУ) D6 и цепочке R26-C15 в цепи обратной связи ОУ. Рассчитанный ПИ-регулятор обеспечил установку выходного высокого напряжения с точностью и перерегулированием, не превышающими 1 %.

Ток потребления ВВ-преобразователя от источника постоянного напряжения от 6 до 10 В составляет 1,2 мА.

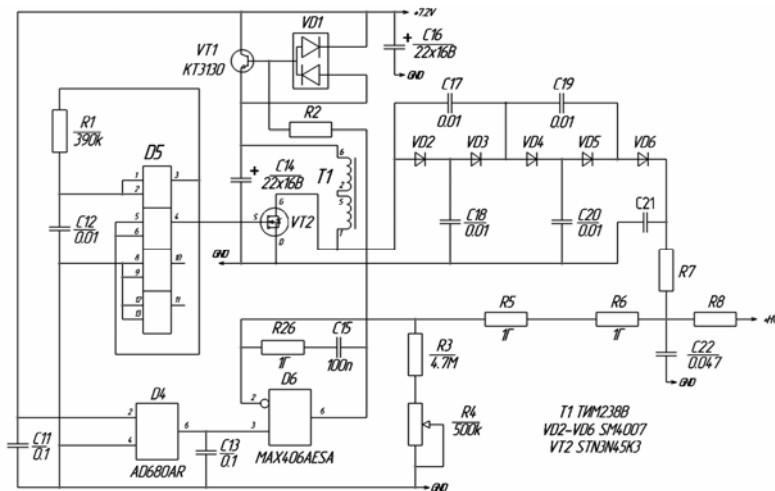


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ВВ-преобразователя

ЗЧУ-дискриминатор

ЗЧУ предназначен для усиления токовых импульсов с нейтронного счетчика, а также их фильтрации для подавления шумов усилителя и уменьшения вносимых извне помех. Для нормальной работы амплитудного дискриминатора необходимо обеспечить усиление напряжения, создаваемого токовыми импульсами счетчика на входном резисторе R10, в ~40000 раз. Принципиальная электрическая схема ЗЧУ представлена на рис. 3.

Из теории известно, что наибольший вклад в отношение сигнал/шум дает первый каскад многокаскадного усилителя. Для достижения минимального шума желательно, чтобы коэффициент усиления первого каскада был больше коэффициентов усиления других каскадов [5]. Среднеквадратичное значение суммарного шума каскада определяется по формуле:

$$E_{\text{скз}} = \sqrt{E_{\text{скзОУ}}^2 + E_{\text{скзR}}^2}$$

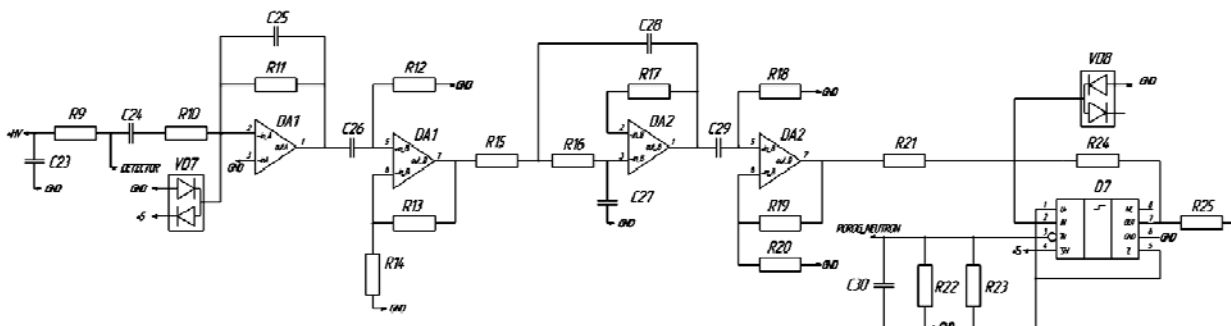


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема ЗЧУ

ЗЧУ выполнен по трехкаскадной схеме усиления на малошумящих двоянных ОУ типа AD8626 с малым потреблением по питанию (DA1 и DA2).

На выходе усилителя имеется пороговое устройство на компараторе D7 с задаваемым от ПК порогом дискриминации. С выхода компаратора счетные импульсы ТТЛ-уровня поступают в ПК.

Для обеспечения необходимой верхней граничной частоты усиления потребовались три последовательно включенных широкополосных усилительных каскада с относительно малым усилением (100, 20 и 20). Для этих каскадов из ряда малопотребляющих ОУ выбраны AD8626 с полевыми транзисторами на входе, как лучшие по шумовым характеристикам. Шумовое напряжение данных ОУ составляет $e_n = 17,5 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$.

где $E_{\text{скзR}} = E_{nR} \cdot \sqrt{F}$ – среднеквадратичные значения тепловых шумов, а $E_{\text{скзОУ}} = E_{nОУ} \cdot \sqrt{F}$ – среднеквадратичные значения внутренних шумов операционного усилителя, F – полоса пропускания.

Значение тепловых шумов определяется следующим образом:

$$E_{nR} = \sqrt{4kTR_{11} \left(\frac{R_{11}}{R_{10}} + 1 \right)},$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура, К.

Значение внутренних шумов ОУ определяется как:

$$E_{nОУ} = \sqrt{\left(e_n \frac{R_{10} + R_{11}}{R_{10}} \right)^2 + (i_n R_{11})^2},$$

где e_n – шумовое напряжение ОУ; i_n – шумовой ток ОУ.

При последующем усилении величина шума усилится. Таким образом, максимальное значение шума на выходе будет определяться следующим образом:

$$E = K_2 \cdot K_4 \cdot E_{\text{СКЗ}},$$

где $K_2 = 20$ – коэффициент усиления второго каскада, а $K_4 = 20$ – коэффициент усиления четвертого каскада.

При $R_{10} = 10$ МОм, $R_{11} = 100$ кОм и полосе $F = 750$ кГц имеем $E_{\text{СКЗ}} = 38,49$ мкВ, получаем:

$E = 20 \cdot 20 \cdot 38,49 \cdot 10^{-6} = 15,4$ мВ (влиянием корректирующего $C_{25} = 3$ пФ пренебрегаем из-за малости значения).

Чтобы дополнительно снизить напряжение шумов на выходе ЗЧУ а также уменьшить влияние внешних электромагнитных помех, в схему ЗЧУ

введены: фильтр верхних частот (разделительные конденсаторы C_{26} и C_{29} с соответствующими резисторами R_{12} и R_{18}) и фильтр нижних частот (ФНЧ) второго порядка, построенный на ОУ и R_{15} , R_{16} , R_{17} , C_{27} и C_{28} . Используемый ^3He -нейтронный счетчик имеет время сбора заряда ~ 4 мкс. Фильтры должны хорошо пропускать усиленные сигналы с нейтронного счетчика, максимально отсеивая шумы и помехи.

ФНЧ по схеме Салена – Кея, примененный в раннее прототипе ЗЧУ, не был оптимизирован по шумовым параметрам.

Для оптимизации ФНЧ использовано схемотехническое моделирование. По построенной модели ЗЧУ были получены формы сигналов на выходе (см. рис. 4) и шумовой спектр (см. рис. 5) при различных номиналах фильтровых емкостей C_{27} и C_{28} .

Соответствующая рис. 4 и 5 информация была занесена в табл. 2.

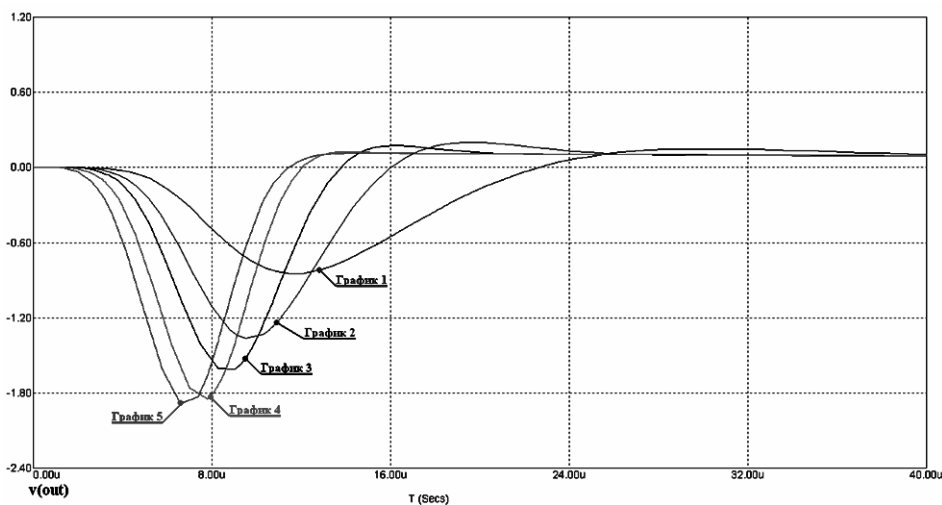


Рис. 4. Выходной сигнал модели ЗЧУ при различных параметрах ФНЧ

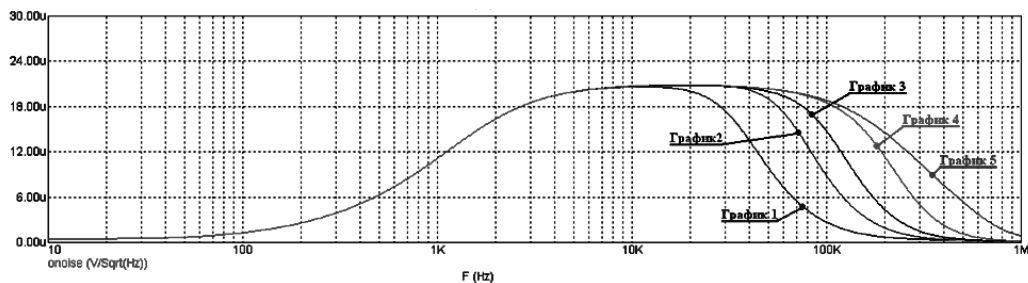


Рис. 5. Шумовой спектр модели ЗЧУ при различных параметрах ФНЧ

Таблица 2

Параметр	Фильтр	График 1 ($C_{27} = 300\text{пФ}$, $C_{28} = 600\text{пФ}$)	График 2 ($C_{27} = 150\text{пФ}$, $C_{28} = 330\text{пФ}$)	График 3 ($C_{27} = 100\text{пФ}$, $C_{28} = 200\text{пФ}$)	График 4 ($C_{27} = 50\text{пФ}$, $C_{28} = 100\text{пФ}$)	График 5 ($C_{27} = 16\text{пФ}$, $C_{28} = 32\text{пФ}$)
Полоса пропускания F, кГц		41,5	79	128	251	780
ШумN, мВ		4,2	5,8	7,4	10,4	18,3
Амплитуда сигнала U, В		0,855	1,37	1,6	1,85	1,89
Отношение сигнал/шум U/N		203	236	216	177	103

По данным табл. 2 выбрано оптимальное по отношению сигнал/шум сочетание: $C_{27} = 50$ пФ и $C_{28} = 330$ пФ (ширина полосы пропускания $F = 79$ кГц).

Для организации двуполярного питания ЗЧУ от батареи использованы непрерывные стабилизаторы и преобразователь типа «charge-pump». Для защиты от помех, производимых «charge-pump»-микросхемой ICL7660, установлен экранирующий козырек над микросхемой и переключаемым конденсатором. Для устранения токовых помех, производимых ключами микросхемы «charge-pump», использован дроссель повышенной индуктивности (1 мГн).

Экспериментальная часть

Для проверки работы ЭБ к нему был подключен ^3He -нейтронный счетчик с полиэтиленовым замедлителем, рядом с последним был размещен калифорниевый источник нейтронов.

На рис. 6 приведена типовая форма отклика нейтронного импульса, зарегистрированная цифровым осциллографом TDS3052 на выходе ЗЧУ.

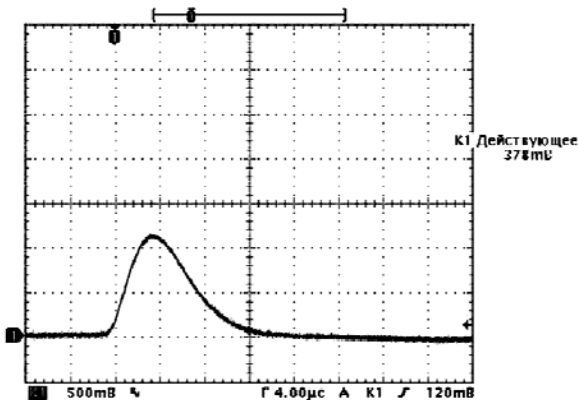


Рис. 6. Типовая форма импульса нейтронов

С помощью амплитудного спектрометра фирмы «Canberra» с программным обеспечением Genie-2000 была снята амплитудная спектральная характеристика (см. рис. 7) выходных импульсов ЗЧУ.

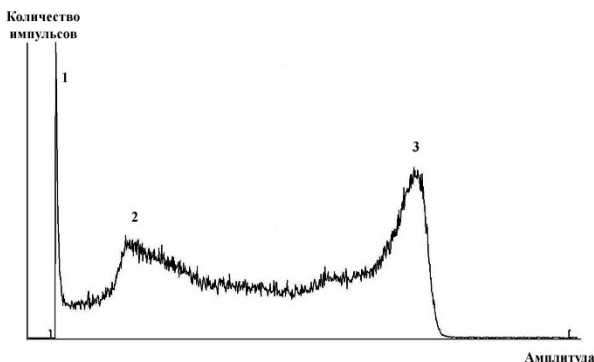


Рис. 7. Амплитудная спектральная характеристика нейтронного детектора: 1 – шумы, 2 – пик обратного рассеяния, 3 – пик протонов отдачи (пик тепловых нейтронов)

На характеристике хорошо различимы пики: 1 – шумы, 2 – пик обратного рассеяния, 3 – пик протонов отдачи (пик тепловых нейтронов), полученные с НД. Модернизированный ЭБ обеспечивает существенное превышение полезного сигнала над шумом. Пик 2 превышает уровень шумов в несколько раз, поэтому гарантирована надежная регистрация нейтронных откликов с разной амплитудой. Потери при регистрации нейтронов практически исключаются.

Заключение

В результате проведенной модернизации ЭБ ^3He НД существенно (более, чем в два раза) улучшены его шумовые характеристики и параметры ЭМС благодаря:

- тщательному экранированию конструктивных элементов ЭБ;
- снижению тока ключа ВВ-преобразователя при использовании высоко индуктивной накопительной катушки индуктивности вместо повышающего трансформатора;
- выбору наименее шумящих ОУ для ЗЧУ;
- оптимизации полосового фильтра в ЗЧУ.

Характеристики ЭБ после модернизации:

- габариты ЭБ, объединяющего ВВ-преобразователь и ЗЧУ со стабилизирующим преобразователем – $103 \times 37 \times 18$ мм (снижена высота на 2 мм);
- потребление тока от батареи питания с напряжением от 6 до 10 В снижено с 9 мА до 7,2 мА;
- действующее напряжение шумов и наводок на выходе ЗЧУ – 7,6 мВ;
- задаваемый извне порог дискриминации (по умолчанию порог равен 110 мВ);
- плавное установление высокого напряжения НД – выброс не более 1 %;
- максимальная скорость счета – до 1000 импульсов в секунду.

В модернизированном ЭБ использованы только покупные радиоэлементы.

Литература

1. Пикарь В. А., Родигин А. В. и др. Портативные приборы для поиска и идентификации радиоактивных материалов // Молодежь в науке: сборник докладов 11-й научно-технической конференции. 2013. № 11. С. 342–346.
2. Виноградов Ю. А. Ионизирующая радиация: обнаружение, контроль, защита. – М.: СОЛОН-Р, 2002. 224 с.
3. Дозиметр-индикатор ПОИСК-2. Руководство по эксплуатации. – ВНИИЭФ, 1989.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. С. 512.
5. Денисов Г. Шумы в электрических схемах с операционными усилителями // Электронные компоненты. 2003. № 3. С. 38–40.