

Формирователи импульсов

Владимир РЕНТЮК
rvk.modul@gmail.com

В статье приведен обзор ряда практических схемных решений формирователей импульсов. Область их применения — устройства для детектирования импульсов, устройства сопряжения, модернизированное оборудование, измерительная техника, оборудование специального назначения и т. п.

Формирователи импульсов — одни из наиболее часто используемых узлов различной аппаратуры. Они необходимы для сопряжения устройств, для формирования логических уровней напряжения от активных датчиков и детектирования импульсов. По назначению эти устройства можно разбить на три группы:

- формирователи некоторого произвольного по длительности импульса при поступлении на вход запускающего импульса;
- формирователи выходного импульса, максимально приближенного по длительности к входному запускающему импульсу;
- формирователи, которые в ответ на поступление на их вход запускающего импульса генерируют определенный по длительности и фазе импульс.

Как правило, для первой группы задача решается при помощи триггера Шмитта, для второй группы — компаратора или триггера Шмитта с предельно малым гистерезисом, а для третьей — за счет ждущего мультивибратора с запуском от порогового устройства.

Решение задачи усложняется, если запускающие импульсы имеют отрицательную полярность, а работа оборудования требует их сопряжения с цифровыми устройствами, которые используют импульсы положительной полярности с логическими уровнями. Имеется еще одна проблема — это выделение импульсов в условиях сильного зашумления. Именно такие задачи приходилось решать автору статьи на практике.

Одной из таких задач было найти предельно простые решения для обеспечения сопряжения нового оборудования с устаревшим, имевшимся у заказчика, поскольку переделка последнего была признана нецелесообразной. Представленные схемы были впервые опубликованы автором в [1], а их уточненные варианты — в [2]. В данной статье автор еще раз уточняет и дополняет ранее опубликованные материалы новыми практическими вариантами схемных решений, которые использовались в его последних практических работах и ранее не публиковались.

Самый простой вариант формирователя показан на рис. 1а, временная диаграмма его работы — на рис. 1б. Этот формирователь относится к первой группе.

Достоинство схемы — это однополярное напряжение питания +5 В, высокая помехоустойчивость и согласование фазы входных и выходных импульсов. Под последним здесь и далее имеется в виду то, что входной импульс отрицательной полярности приводит при его поступлении на вход преобразователя к генерации ответного импульса положительной полярности. Недостатком схемы является относительно высокий порог срабатывания (не менее 0,62 В) и высокий входной ток, который равен сумме токов коллектора и базы транзистора VT1. (Для упрощения ток базы ввиду его малости по отношению к коллекторному току можно не учитывать.)

Преобразование полярности выполняет каскад на транзисторе VT1, а для сопряжения с остальными цепями используется инвертор на ИМС 74НС132 [3]. Инвертор DD1-1 согласовывает фазы входных и выходных импульсов. (Примечание. Здесь и далее имеется в виду формирование сигнала положительной полярности в ответ на входной импульс отрицательной полярности.) Он используется и как основное пороговое устройство с гистерезисом (ИМС 74НС132 содержит триггеры Шмитта по входу), что совместно с высоким порогом реакции входного каскада обеспечивает высокую помехоустойчивость преобразователя в целом.

Порог срабатывания формирователя (V_{T-}) может быть рассчитан как:

$$V_{T-} = -((V_S - V_{II}) \times (R1/R2) + 0,6),$$

где V_S — напряжение источника питания; V_{II} — входное напряжение перехода инвертора DD1-1 в состояние логического нуля.

Порог срабатывания формирователя для элементов, указанных на рис. 1а, при $V_{II} = 1,4$ В составляет $-2,9$ В, а гистерезис по входу — 0,5 В. Диод VD1 — необязательный, он используется как защитный, если имеется вероятность подачи на формирователь напряжения положительной полярности высокого уровня (более 5 В). На рис. 1б показаны осциллограммы работы преобразователя (верхняя трасса — входной сигнал, нижняя трасса — выходной сигнал формирователя).

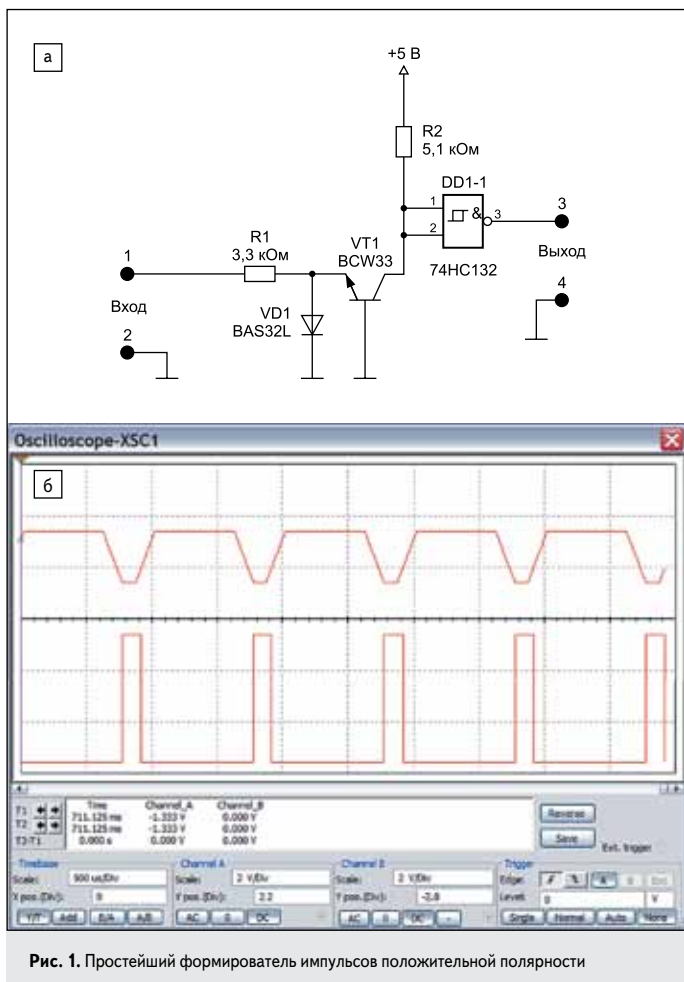


Рис. 1. Простейший формирователь импульсов положительной полярности

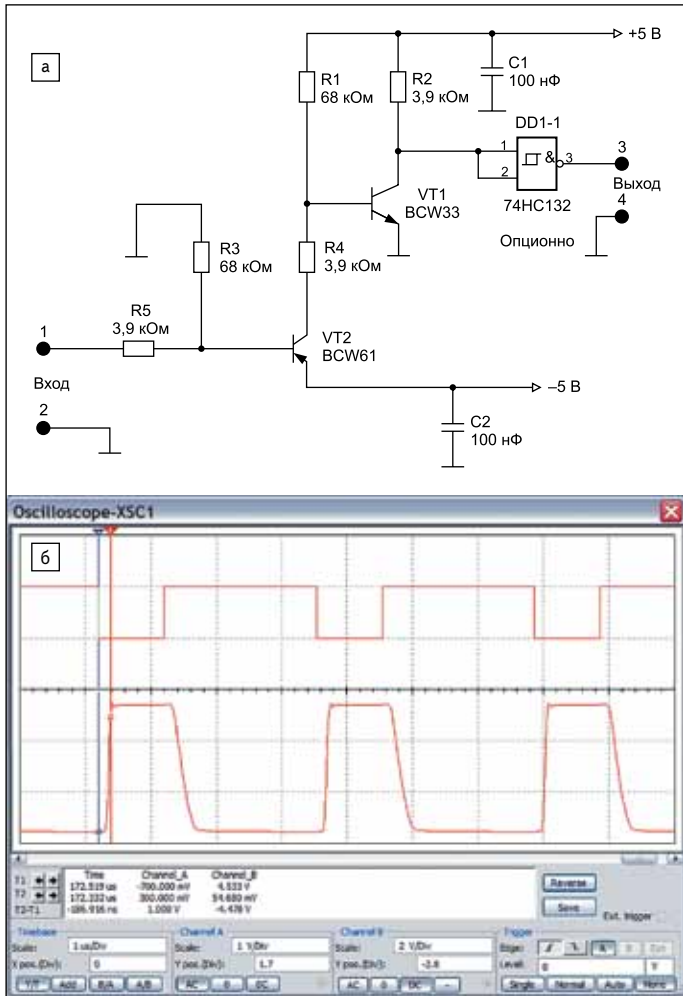


Рис. 2. Формирователь импульсов с высокой чувствительностью

Более сложный, но и более чувствительный формирователь, разработанный при помощи симулятора Multisim (National Instruments), представлен на рис. 2а.

Его достоинства — малый по сравнению с формирователем, представленным на рис. 1, входной ток и порог срабатывания, формирование выходных импульсов с длительностью, близкой к длительности запускающего импульса, работа с сигналами малой длительности, малый фазовый сдвиг (задержка). Этот формирователь может работать с импульсами длительностью менее микросекунды. (На рис. 2 показан процесс преобразования импульса длительностью 1 мкс.) Недостатки — двухполярное напряжение питания и тот факт, что высокие характеристики этого формирователя достигаются лишь при реакции на входные сигналы, превышающие пороговое напряжение не менее чем в 3 раза.

Порог срабатывания формирователя с номиналами элементов, приведенными на рис. 2, не превышает $-0,1$ В, гистерезис при подключении внешнего инвертора на ИМС типа 74НС132 (при этом необходимо будет учесть инверсию) находится на уровне 10 мВ. Задержка импульса длительностью 1 мкс со-

ставляет не более 200 нс. На рис. 2б показаны осциллограммы работы преобразователя (верхняя трасса — входной сигнал, нижняя трасса — сигнал на коллекторе VT1).

Формирователь с повышенной устойчивостью и возможностью установки порога срабатывания представлен на рис. 3а (в предлагаемом варианте ранее не публиковался).

В устройстве используется недорогая ИМС компаратора напряжения LM211 [4]. Формирователь выдает выходные импульсы положительной полярности с длительностью, которая соответствует ширине входного импульса на заданном уровне порога срабатывания. Для устойчивости работы схемы при зашумленном сигнале и, как следствие, дрейбже на фронтах выходного сигнала в схеме имеется возможность установки гистерезиса (резистор R5). Фазы входных и выходных импульсов согласованы. Задержка отклика определяется в основном параметрами компаратора и в рассматриваемом случае не превышает 150 нс.

Выход формирователя — это транзистор с открытым коллектором, поэтому нагрузочный резистор R1 обязателен. При высоких значениях номинала резистора R1 будет иметь место затягивание заднего фронта вы-

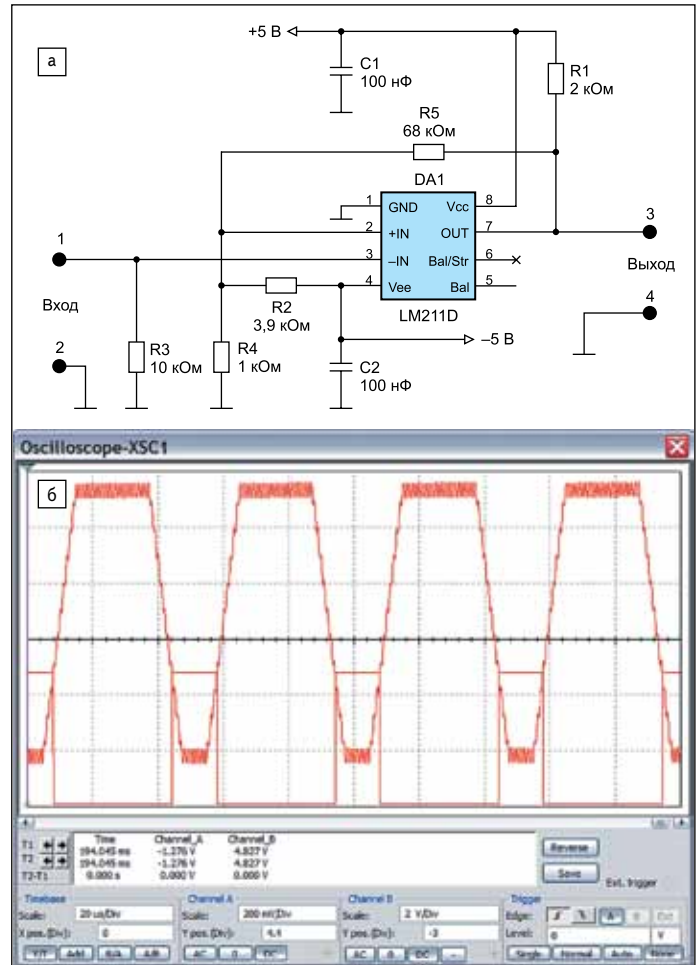


Рис. 3. Формирователь импульсов с гистерезисом и установкой необходимого порога срабатывания

ходного импульса из-за влияния емкости нагрузки. Порог компаратора устанавливается путем выбора номиналов сопротивлений R2, R4 и R5. Естественно, что он будет зависеть от величины питающего напряжения. Это необходимо принимать во внимание при его использовании.

Без учета влияния R5 порог срабатывания (V_T) схемы (рис. 3) рассчитывается по формуле:

$$V_{T-} = V_e \times [R4 / (R2 + R4)],$$

где V_e — напряжение минусового источника питания.

При использовании гистерезиса вместо резистора R4 в эту формулу подставляется значение $R4 \times [R5 / (R4 + R5)]$. Величину гистерезиса можно рассчитать по удобной в использовании приближенной формуле:

$$\Delta V_T \approx V_3 \times [R4 / (R4 + R3 + R5)].$$

Для элементов схемы, приведенных на рис. 3а, гистерезис по факту равен 66 мВ, а расчетный составляет примерно 70 мВ.

Если ширина импульса менее 0,5 мкс, то необходимо использовать более быстро-

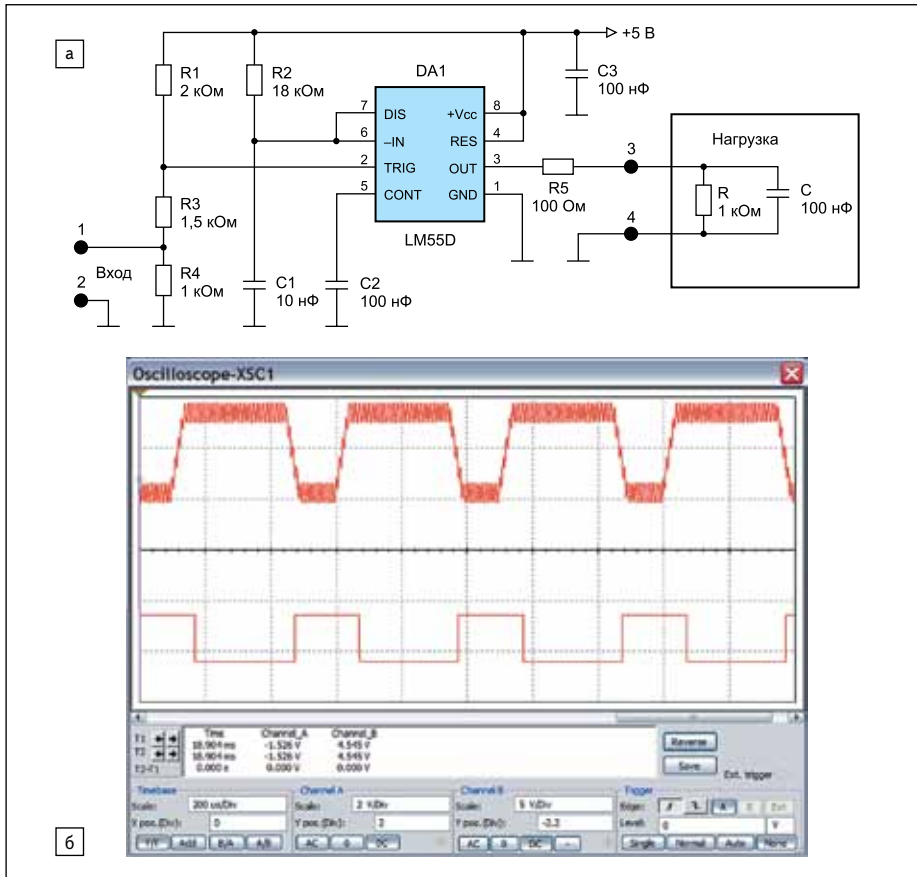


Рис. 4. Нечувствительный к шумам формирователь импульсов с заданной длительностью

действующий компаратор. На рис. 3б показаны осциллограммы работы преобразователя в условиях зашумления входного сигнала шумом с двойной амплитудой $V_{p-p} = 60$ мВ (верхняя трасса — входной сигнал, нижняя трасса — сигнал на выходе преобразователя).

Возникает вопрос, что можно предпринять, если шумовой сигнал превышает разумный гистерезис, а применение фильтров на входе приводит к недопустимой задержке реакции формирователя? На этот вопрос можно ответить с помощью схемы, представленной на рис. 4а.

Здесь показан вариант формирователя, который позволяет преобразовывать импульсы отрицательной полярности заданного уровня в импульсы положительной полярности заданной длительности и амплитуды. Шумы, наложенные на входной импульс, не оказывают никакого воздействия на параметры выходных импульсов. (На рис. 4б верхняя трасса — размах амплитуды шумов $V_{p-p} = 800$ мВ, нижняя трасса — сигнал на выходе преобразователя.)

Формирователь, представленный на рис. 4а, не требует двухполярного питающего напряжения. Он выполнен на популярной недорогой ИМС интегрального таймера серии 555 (российский аналог 1006 ВИ1) [5]. Формирователь при воздействии запускающего импульса отрицательной полярности генерирует выходной импульс положитель-

ной полярности заданной длительности. Фазы импульсов согласованы. Порог срабатывания формирователя (V_{T-}) установлен сопротивлениями R1 и R3.

Этот порог можно рассчитать как:

$$V_{T-} = V_S / 3(1 - 2R3/R1),$$

где V_S — напряжение источника питания ИМС.

Длительность выходного импульса (t) рассчитывается как $t = 1,1 \times R2 \times C2$.

Примечание. Для правильной работы формирователя (рис. 4а) необходимо соблюдение следующих условий:

- 1) Длительность запускающего импульса по порогу срабатывания должна быть меньше установленной длительности выходного импульса.
- 2) Период следования запускающих импульсов должен быть больше, чем t .
- 3) Величина сопротивления R3 должна быть больше, чем $0,5R1$.

В отличие от всех схем, представленных выше, схема, представленная на рис. 4, может работать непосредственно на низкоомную нагрузку (при выходном токе ИМС таймера LM555 до 200 мА), на длинную линию (при соответствующем согласовании) или на емкостную нагрузку относительно большой емкости. При этом дополнительного драйвера при использовании этого формирователя не требуется. Сопротивление R5 предо-

хранит ИМС от коротких замыканий по ее выходу, если формирователь удален от нагрузки. Резистор R4 является опциональным. Основные недостатки такого формирователя — его низкочастотность и, что особенно важно, ограничения по периоду следования импульсов запуска.

Для решения проблемы выделения (детектирования) импульсов малой длительности (менее 1 мкс) из сильно зашумленных последовательностей импульсов можно использовать схемное решение, представленное на рис. 5а (ранее не публиковалось).

Входная часть детектора импульсов малой длительности выполнена по принципу, описанному выше (рис. 3а), на компараторе DA1, но включенном без гистерезиса и с инвертированной полярностью выходного импульса. Порог срабатывания установлен относительно сложным делителем с хорошей фильтрацией, это позволяет минимизировать технологические трудности в настройке формирователя, как при серийном изготовлении, так и в месте эксплуатации.

Первый делитель, выполненный на резисторах R10 и R11, понижает напряжение от шины питания -5 В до напряжения -150 мВ. Второй делитель на резисторах R9, R7 и R8 понижает это напряжение до уровня $-(13-60)$ мВ. Резистором R7 устанавливается порог чувствительности формирователя. Порог чувствительности определяет минимальный уровень сигнала, на который будет реагировать формирователь. Такая регулировка необходима, так как выставление минимально допустимого уровня напряжения срабатывания уменьшает общее время задержки формирователя. Этот параметр становится важен, если усилитель используется как составная часть измерительного устройства.

Например, рассматриваемая схема в ее модифицированном варианте (о нем будет сказано далее) предназначалась для формирователя отклика на радиолокационный запрос. По времени отклика определяется расстояние до объекта. Нетрудно подсчитать, что каждые 100 нс задержки — это ошибка в 15 м при измерении расстояния радиолокационным методом. Таким образом, при проектировании устройства ставилось требование по обеспечению минимальной и, главное, постоянной по времени задержки в формировании отклика. Поэтому при разработке схемного решения формирователя пришлось отказаться от использования фильтра низкой частоты (интегратора) по входу, да и сам характер принимаемого сигнала не позволял использовать такое решение.

Схема, приведенная на рис. 5а, в ответ на обнаружение импульса в структуре входного сигнала генерирует на выходе импульс строго определенной длительности. Рассматриваемый формирователь однозначно реагирует на любые импульсы. Это могут быть, например, затухающие гармонические колебания, пачки импульсов (радиоимпульс),

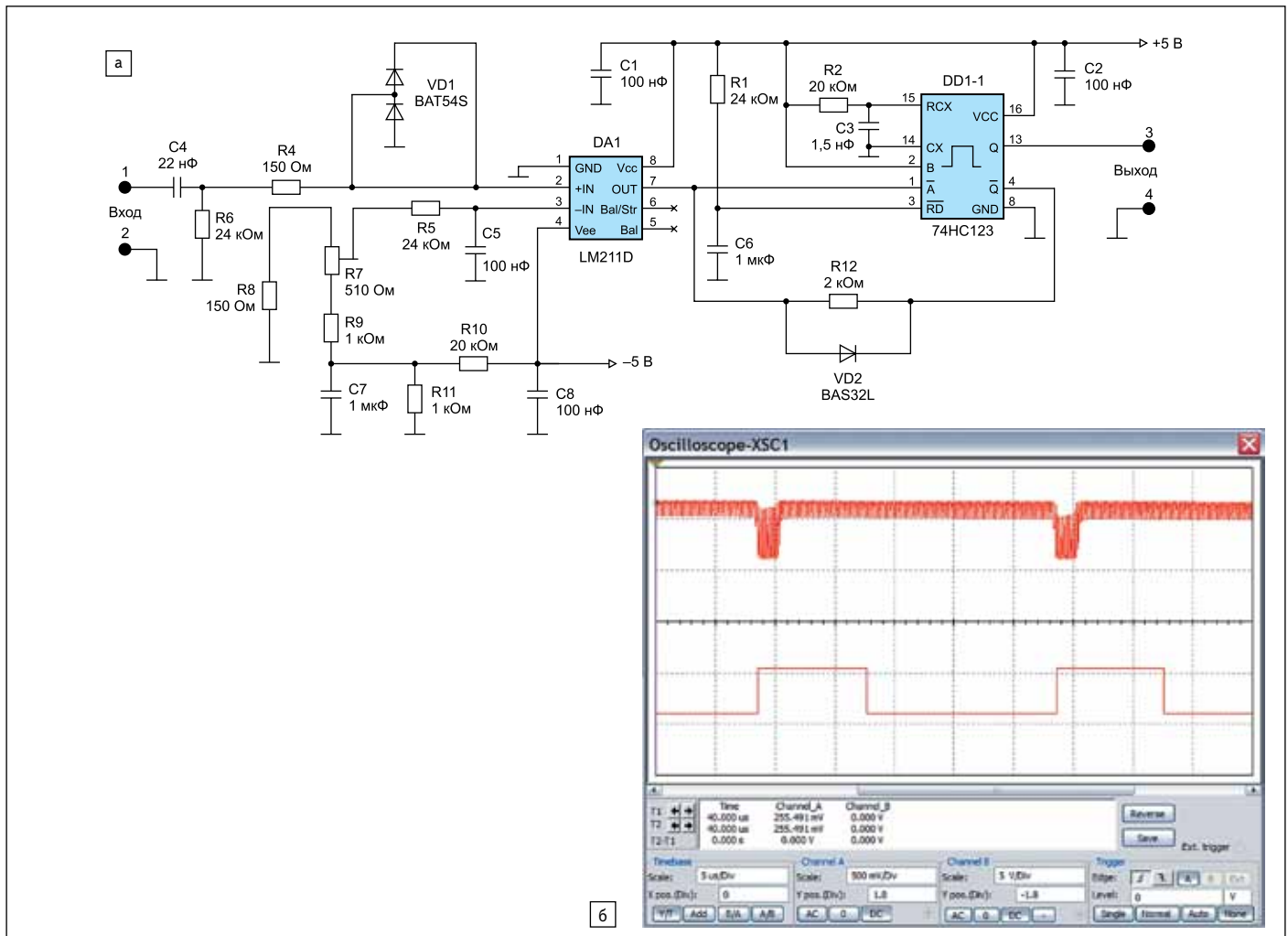


Рис. 5. Детектор импульсов малой длительности с заданной длительностью выходного импульса

импульсы неопределенной формы и длительности и т. п. Формирователь работает в широком динамическом диапазоне входных сигналов. При номиналах элементов, приведенных на рис. 4а, схема устойчиво преобразовывает входные «грязные» импульсы отрицательной полярности с амплитудой от 15 мВ до 5 В в положительные импульсы заданной длительности, совместимые по уровням с TTL и CMOS логическими микросхемами.

Входной сигнал поступает на положительный вход компаратора DA1. Если предыдущий каскад (например, видеоусилитель) имеет смещение по постоянному напряжению относительно нуля, то сигнал подается через дифференциальную цепочку C4, R6. Постоянная времени дифференциальной цепочки выбирается исходя из параметров входного сигнала. При отсутствии на входе сигнала ниже порога срабатывания на выходе DA1 присутствует высокий уровень напряжения. Если на вход поступит отрицательный импульс, то по его спадающему фронту (после пересечения порога срабатывания) выход компаратора переключается на низкий уровень и запускает ждущий мультивибратор, выполненный на ИМС типа 74HC123 [6] (DD1-1).

Ждущий мультивибратор начнет генерацию выходного импульса с длительностью, заданной элементами R2 и C3. Одновременно с началом генерации выходного импульса инверсный выход ждущего мультивибратора переведет выход компаратора DA1 на низкий логический уровень (с резистора нагрузки R12 будет снято напряжение). Таким образом, на время генерации ждущим мультивибратором выходного импульса никакие новые импульсы на вход запуска ждущего мультивибратора уже не поступают. Такое решение позволило повысить устойчивость схемы при наличии в структуре входного сигнала высокочастотных помех и отказаться от использования фильтра низкой частоты на входе.

Если резистор R12 будет подключен, как это обычно принято, к шине +5 В, то при поступлении на вход схемы пачек коротких импульсов (радиоимпульсов) с длительностью такой пачки более, чем заданная длительность выходного импульса, или длительного шумового сигнала с амплитудой более порогового значения на время действия такого входного сигнала формирователь будет находиться в состоянии логической единицы

по выходу. При выбранном подключении формирователь будет генерировать импульсы с длительностью, заданной постоянной времени ждущего мультивибратора DD1-1, с интервалом, зависящим от частоты заполнения входного импульса. Какой из вариантов — более приемлемый, решается при рассмотрении конкретной проблемы.

Стабильность запуска формирователя обеспечивает тот факт, что необходимое время удержания импульса запуска на входе 74HC123 согласно [6] меньше, чем время задержки генерации импульса на ее инверсном выходе. Предлагаемое техническое решение из-за отсутствия в схеме фильтров низкой частоты по входу позволяет минимизировать время задержки генерации импульса. Оно практически равно суммарному времени задержки компаратора и времени задержки генерации импульса ждущим мультивибратором. При этом, что особенно важно, обе эти задержки практически постоянны и могут быть учтены вычислителем. Временная диаграмма, иллюстрирующая работу схемы на рис. 5а, представлена на рис. 5б.

В качестве компаратора использована ИМС LM211D [4] производства

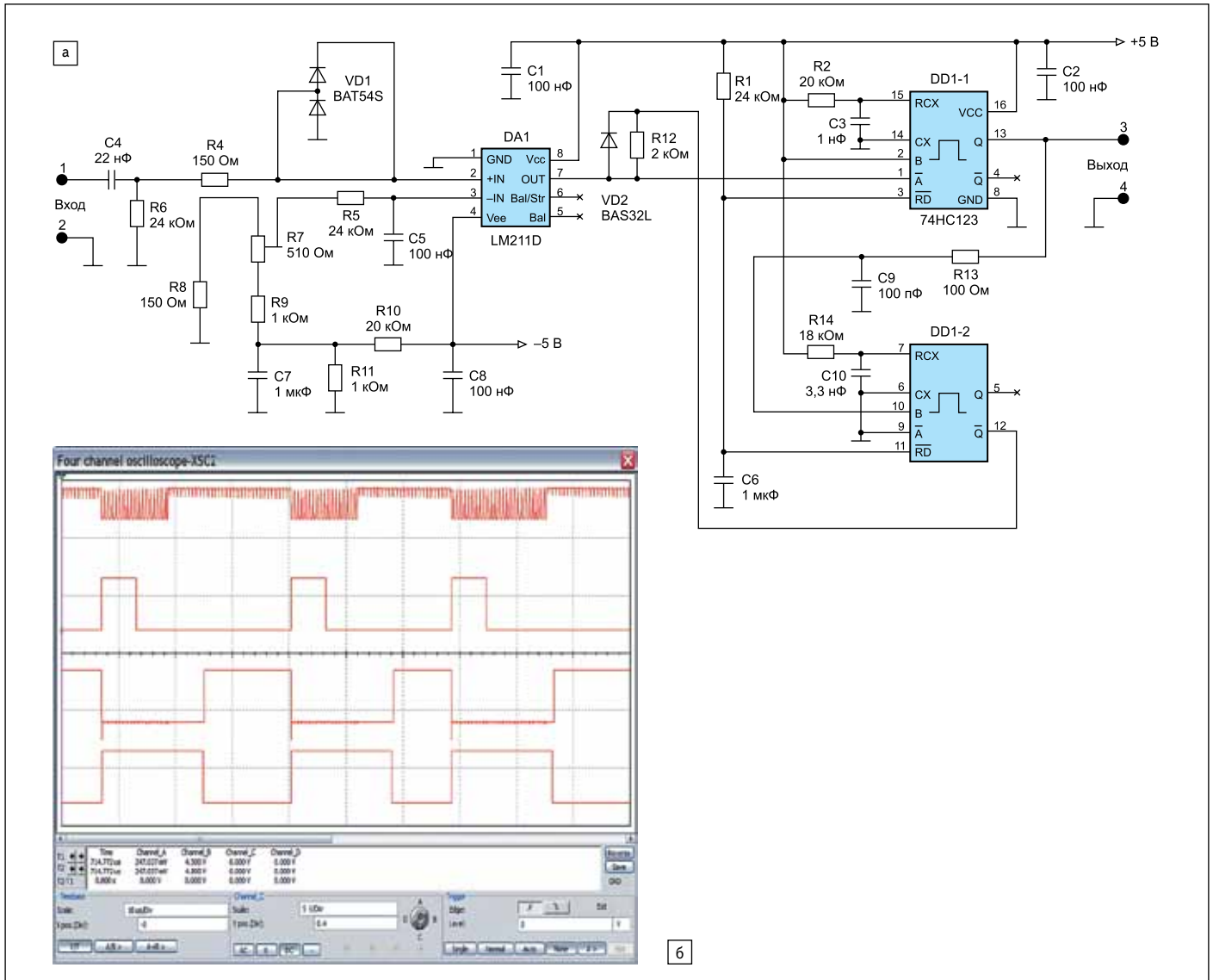


Рис. 6. Детектор импульсов малой длительности с заданной длительностью выходного импульса и защитным интервалом

Texas Instruments. Ее время задержки при переходе с высокого на низкий уровень находится на уровне 165 нс, и что особенно важно для ИМС этого изготовителя, оно мало зависит от величины скачка напряжения на входе по отношению к пороговому напряжению. Это очень удобно, так как, повторим, все стационарные задержки могут быть учтены в вычислителе. ИМС LM211D других изготовителей имеют худшие характеристики. Так, аналогичные ИМС производства ON Semiconductor имеют задержку 200 нс, и она сильно зависит от величины скачка входного напряжения.

Схема содержит ряд дополнительных элементов. Начальная установка при включении питания обеспечивается элементами R1 и C6. По этому входу можно осуществлять также внешнее управление включением формирователя. Защиту схемы по входу от бросков напряжения обеспечивают диод VD1 и токоограничивающий резистор R4. Они дополняют имеющуюся на входе ИМС LM211D соб-

ственную защиту. Диод VD2 типа BAS32L — опционный, его назначение — ускорить разряд паразитных емкостей на выходе компаратора DA1. Для этого можно использовать и маломощный диод Шоттки.

На рис. 6а приведен вариант детектора импульсов малой длительности (рис. 5а) с защитным интервалом от воздействия импульсов, период следования которых менее заданного, и при поступлении на вход схемы пачек коротких импульсов (радиоимпульсов) с длительностью такой пачки более, чем заданная длительность выходного импульса, или длительного шумового сигнала с амплитудами более порогового значения. Именно такая схема использовалась автором статьи на практике.

Формирователь, представленный на рис. 6а, в отличие от схемы на рис. 5а позволяет исключить нежелательный повторный запуск формирователя при воздействии на его вход высокочастотных помех, длительность которых превышает длительность

импульса, генерируемого ждущим мультивибратором на DD1-1.

Необходимый защитный интервал формируется дополнительным мультивибратором, выполненным на второй половине ИМС 74HC123 (DD1-2). Длительность защитного интервала задается элементами R14 и C10. Длительность защитного интервала выбирают согласно двум условиям. Во-первых, она должна превышать длительность импульса, формируемого ждущим мультивибратором на DD1-1. И во-вторых, она должна быть менее, чем ожидаемое время поступления следующего «полезного» импульса. Например, в проектируемом устройстве период их следования был заранее известен.

Схема работает аналогично схеме, описанной выше (рис. 5а), но с рядом изменений. Блокирование работы компаратора осуществляется так же: путем снятия напряжения с резистора R12, но ждущим мультивибратором на ИМС DD1-2. Мультивибратор

на ИМС DD1-2 запускается по переднему фронту выходного импульса. (Как и ранее, его генерирует ждущий мультивибратор на ИМС DD1-1.) Таким образом, компаратор DA1 будет заблокирован, но уже на заданный интервал времени, не зависящий от длительности выходного импульса, а основной мультивибратор на ИМС DD1-1 не будет блокироваться или перезапускаться во время действия этого защитного интервала.

Временная диаграмма работы такого варианта схемного решения формирователя представлена на рис. 6б. Верхняя трасса — это входной сигнал в виде радиоимпульса, ниже — выходной импульс с заданной дли-

тельностью. Как видно на диаграмме, входной импульс превышает выходной по длительности, но его перезапуск не происходит, так как выход компаратора находится в низком состоянии (трасса 3). Этот низкий уровень формируется мультивибратором DD1-2 (трасса 4, показан неинвертирующий выход).

Естественно, что схемы формирователей, приведенные на рис. 5а и 6а, могут быть адаптированы и для сигналов положительной полярности. Но питание компаратора DA1 необходимо осуществлять от двухполярного напряжения. Это особенно важно, если формирователь должен детектировать сигналы малых уровней. ■

Литература

1. Rentyuk V. Form positive pulses from negative pulses // EDN. July 14, 2011.
2. Рентюк В. Формирователи импульсов // Электрик. 2013. № 6.
3. 74HC132; 74HCT132 Quad 2-input NAND Schmitt trigger, NXP Rev. 3. Aug. 30, 2012.
4. LM111, LM211, LM311. Differential comparators with strobes. Texas Instruments, Inc. Revised Aug. 2003.
5. LM555 Timer. National Semiconductor Corp. July 2006.
6. 74HC123; 74HCT123. Dual retriggerable monostable multivibrator with reset. NXP B. V. 2011.