

Кварцевые генераторы на специализированных микросхемах

Сергей Бирюков, Сергей Глибин (Москва)

В статье рассматриваются кварцевые генераторы Пирса, построенные на специализированных небуферизированных инверторах 74LVC1GU04 и NC7SU04. Авторы исследуют влияние сопротивления резистора обратной связи R2, напряжения питания и рабочей частоты на запуск генерации, форму выходного сигнала и потребляемый ток. На основе экспериментальных измерений для кварцевых резонаторов с частотами 32,768 кГц, 1,05 МГц и 25 МГц сформулированы рекомендации по выбору параметров схемы, обеспечивающих минимальное энергопотребление и устойчивую работу генератора.

Когда в электронных устройствах, в том числе с микроконтроллерами, требуется повышенная стабильность задающей частоты, обычно практикуется применение генераторов на кварцевом или керамическом резонаторе, называемых кварцевыми генераторами.

Для построения такого генератора на цифровых микросхемах КМОП их ранние серии имели в своём составе микросхему, содержащую (помимо счётчиков) хотя бы один небуферизированный элемент НЕ. Например, в отечественной серии К176 это были К176ИЕ5, К176ИЕ12, К176ИЕ18, а в зарубежной серии 4000В – CD4060В.

В настоящее время для этой цели выпускаются специальные микросхемы, такие как NC7SU04 (ON Semiconductor), 74LVC1GU04 (Nexperia), в миниатюрных корпусах для поверхностного монтажа и имеющие в своём составе только логический элемент

НЕ. К сожалению, в справочных данных (datasheet) они рассматриваются практически как цифровые микросхемы, и их параметры указываются как для цифровых, а применение в генераторах освещается очень кратко. Например, сведения о потребляемом генератором токе (часто немаловажные) могут отсутствовать.

Для построения генераторов на этих микросхемах в datasheet приводится стандартная широко распространённая схема, показанная на рис. 1. Она представляет собой современное решение генератора Пирса на небуферизированном элементе НЕ (DD1) с широкой линейной АФХ. Впервые вариант кварцевого генератора был предложен на выводных компонентах и ламповом триоде в роли инвертора Джорджем Пирсом более ста лет назад в 1923 г.

Номинал резистора R1 не критичен – 1 МОм и более, ёмкости конденсаторов

С1 и С2 порядка 20...30 пФ, сопротивление резистора R2 – 1 кОм.

Для генераторов указываются широкие диапазоны генерируемых частот – от десятков килоггерц до десятков мегагерц, однако экспериментальная проверка показала, что сопротивление резистора R2 хотя и может изменяться в широких пределах, но для разных частот его оптимальная величина разная.

Для проверки работы генераторов были изготовлены два макета на указанных выше микросхемах в корпусах SOT23-5. Генераторы собирались на макетных печатных платах, предназначенных для установки десятивыводных микросхем поверхностного монтажа с шагом выводов 0,95 мм [1]. Резисторы и конденсаторы типоразмера 0603. Для подключения резонатора, источника питания 1...5 В и контролирующего устройства (осциллографа) в плату впаяны штырьки диаметром 1 мм от разъёма 2РМ. Исходно в качестве R2 были установлены резисторы 510 кОм. Для уменьшения их сопротивления параллельно спаивались дополнительные резисторы МЛТ-0,25. Блокнотный конденсатор С3 подпаян с обратной стороны платы. Расстановка элементов на плате проиллюстрирована на рис. 2. Фото собранных генераторов приведено на рис. 3.

Генераторы испытывались с кварцевыми резонаторами на частоты 32,768 кГц, 1,05 и 25 МГц, в табл. 1 и 2 и на рис. 4 и 5 приведены полученные результаты.

В таблицах приведены токи потребления генераторов в зависимости от частоты резонатора, сопротивления резистора R2 и напряжения питания. Прочерки в некоторых клетках

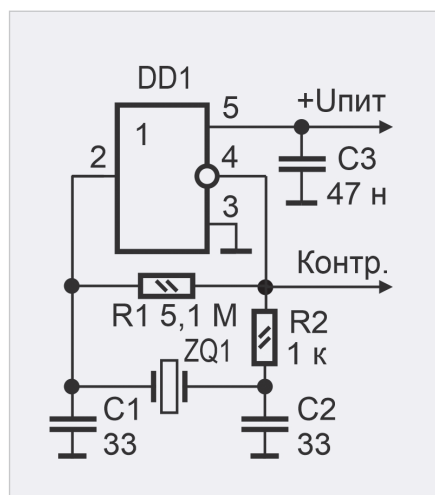


Рис. 1. Схема генератора Пирса на элементе НЕ

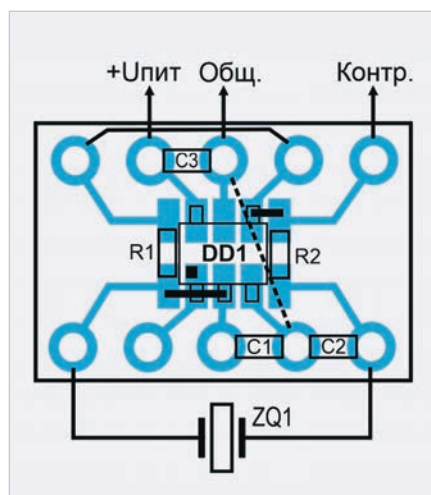


Рис. 2. Расстановка элементов генератора на макетной плате



Рис. 3. Фото собранных генераторов

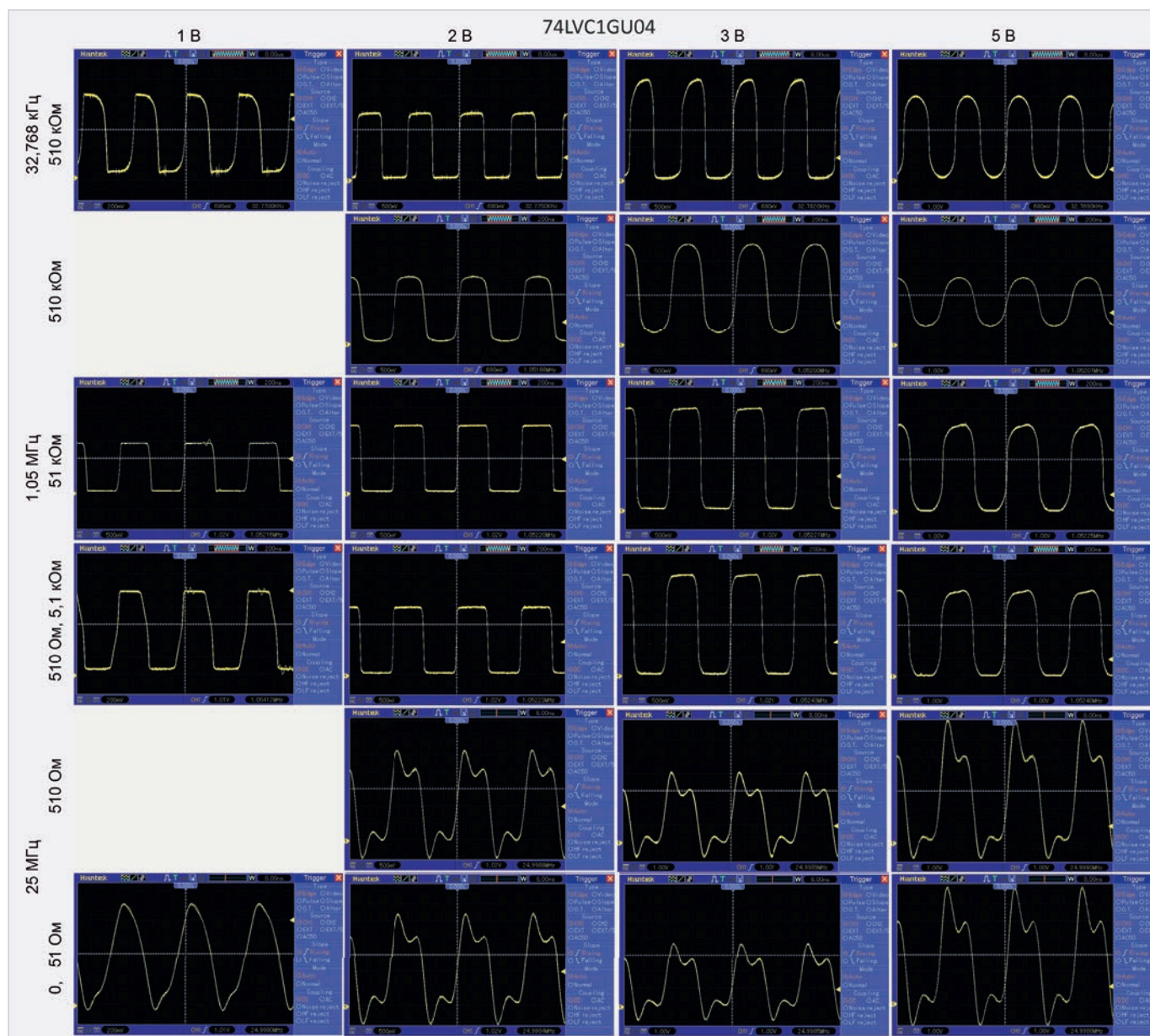


Рис. 4. Осциллограммы генератора на 74LVC1GU04

Таблица 1. Токи потребления генератора на 74LVC1GU04

74LVC1GU04					
F	R2	Ток потребления, мкА, при напряжении питания, В			
		1	2	3	5
32 768 Гц	510 кОм	0,7	210	2200	32 000
1,05 МГц	510 кОм	–	165	22 000	61 000
1,05 МГц	51 кОм	34 (1,5 В)	260	3600	21 000
1,05 МГц	5,1 кОм	16	250	2600	16 000
1,05 МГц	510 Ом	19	280	3200	18 000
25 МГц	510 Ом	–	1500	5100	26 000
25 МГц	51 Ом	410	1800	3500	15 000
25 МГц	0	367	2000	4000	14 500

Таблица 2. Токи потребления генератора на NC7SU04

NC7SU04					
F	R2	Ток потребления, мкА, при напряжении питания, В			
		1	2	3	5
32 768 Гц	510 кОм	1 (1,2 В)	15	300	2000
1,05 МГц	510 кОм	–	110	1080	6000
1,05 МГц	51 кОм	34 (1,5 В)	54	270	1600
1,05 МГц	5,1 кОм	18	52	200	1150
1,05 МГц	510 Ом	7	76	220	1150
25 МГц	510 Ом	–	1100 (2,5 В)	1800	3400
25 МГц	51 Ом	–	700	1650	3300

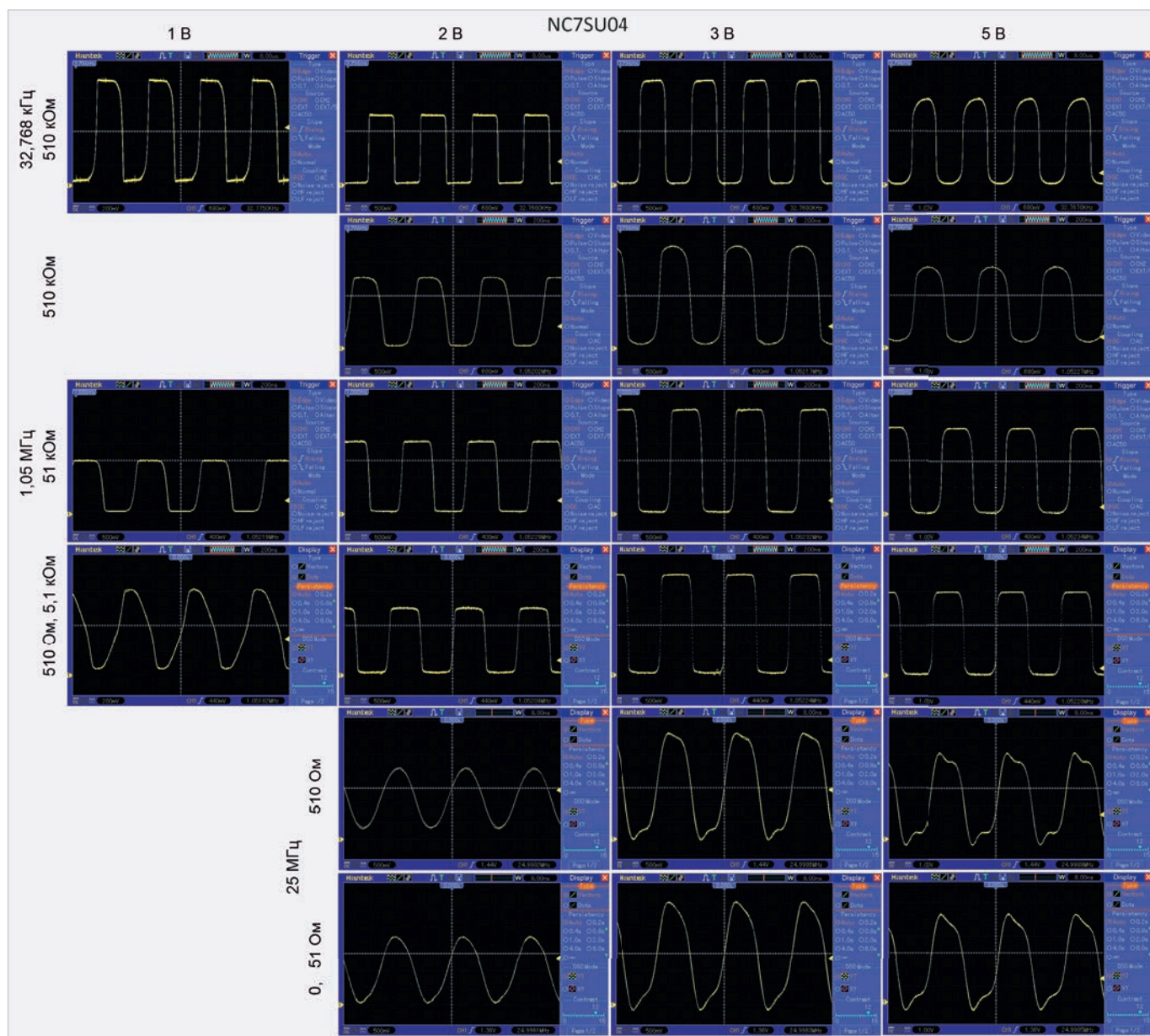


Рис. 5. Осциллограммы генератора на NC7SU04

таблицы для напряжения питания 1 В означают, что генератор не возбуждался, а в скобках указано минимальное напряжение для данного сочетания параметров, при котором начиналась генерация.

Расположение осциллограмм выходных сигналов на рис. 4 и рис. 5 соответствует положению значения измеренного тока потребления в табл. 1 и 2. В тех случаях, когда осциллограммы для некоторых сопротивлений R2 были практически идентичны, строки для уменьшения объема исключены.

Размах сигналов на выходах генераторов от пика до пика почти во всех случаях близок к напряжению питания, визуальное различие амплитуд вызвано изменением масштаба по вертикали при смене напряжения питания.

Отметим, что на частоте 32,768 кГц при сопротивлении R2, равном 51 кОм, генерация сохранялась для всех напряжений питания, а при 5,1 кОм генераторы не работали. Можно считать, что для такой частоты оптимально сопротивление резистора R2 порядка нескольких сотен кОм.

Для частоты 1,05 МГц сопротивление R2, равное 510 кОм, – неоптимальное, вершины импульсов сильно закруглены, а вот при сопротивлениях от 510 Ом до 51 кОм форма выходного сигнала близка к прямоугольной. Для генератора на микросхеме NC7SU04 при напряжении питания менее 2 В на этой частоте желательно сопротивление около 51 кОм.

Интересна форма сигналов генератора на микросхеме 74LVC1GU04 на частоте 25 МГц. Для снятия осцилло-

грамм использовался осциллограф HantekDSO5102P с полосой пропускания 100 МГц. Как известно, спектр прямоугольных сигналов (меандра) состоит из убывающих по амплитуде нечетных гармоник, для данного случая 25, 75, 125 МГц и так далее. Осциллограф оставляет только две первые гармоники – 25 и 75 МГц, их и видно на осциллограммах генератора на микросхеме 74LVC1GU04 (при напряжении питания 2 В и выше). Это может означать, что сигнал имеет неплохую форму, близкую к прямоугольной.

Для генератора на микросхеме NC7SU04 форма сигнала на частоте 25 МГц, индицируемая осциллографом, сглажена, следы третьей гармоники едва заметны, по-видимому, она реально такая.

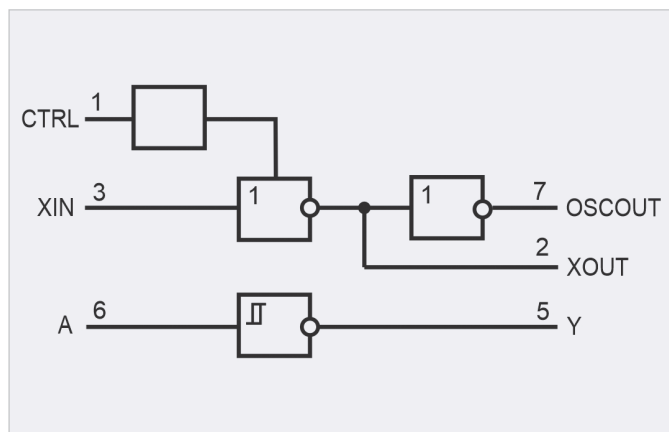


Рис. 6. Схема микросхемы SN74LVC1404

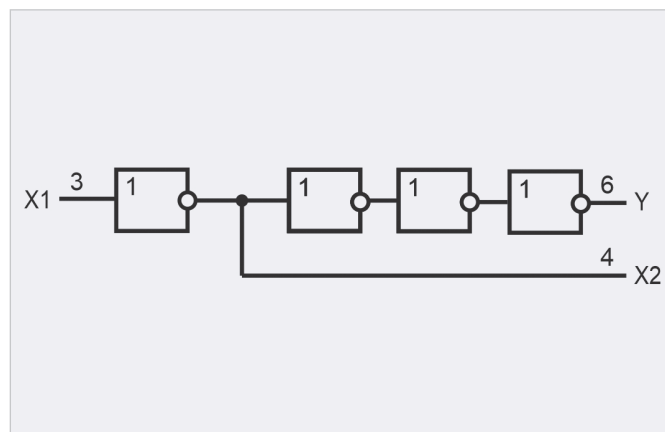


Рис. 7. Схема микросхемы SN74LVC1GX04

Выводы по результатам проведённых экспериментов

1. Генераторы Пирса на микросхеме 74LVC1GU04 более широкополосны и обеспечивают лучшую форму колебаний на высоких частотах, однако потребляют значительно больший ток, поэтому на относительно низких частотах (скажем, менее 30 МГц) рациональнее использовать NC7SU04, и только на более высоких – 74LVC1GU04.

2. Сопротивление резистора R2 для генераторов частотой порядка нескольких десятков килогерц, как указывалось выше, должно быть несколько сотен килоом. На частоте 1 МГц – порядка 5 кОм, но это практически с десятикратным запасом в любую сторону, а минимальный потребляемый ток получается именно при 5 кОм. На частоте 25 МГц форма сигнала практически не меняется при сопротивлении R2 от 510 Ом до нуля, минимальный потребляемый ток достигается при сопротивлении R2 51 Ом или при его нулевом значении.

В общем случае при выборе значения сопротивления резистора R2 можно руководствоваться статьёй [2] с описанием работы генераторов на небуферизированных инверторах. Сопротивление этого резистора должно быть близко к импедансу конденсатора C2 на частоте генерации.

Для типовой ёмкости C2 = 33 пФ формула расчёта сопротивления резистора R2 будет выглядеть так:

$$R2 = 1/(2\pi fC) = 1/(6,28 \times 33 \times 10^{-12} \times f) \approx 5/f \text{ (МГц, кОм)}.$$

Для частоты 32,768 кГц сопротивление резистора R2 должно составлять 150 кОм, для 1 МГц – 5 кОм, для 25 МГц – 200 Ом. Результаты расчё-

та по этой формуле не противоречат полученным экспериментальным данным.

3. При оптимальном выборе сопротивления R2 характерна слабая зависимость тока потребления генераторов от частоты. Это объясняется тем, что с ростом частоты растёт крутизна фронтов сигналов на входе генератора, и продолжительность сквозных токов (присущих микросхемам КМОП) в пределах порогов переключения по отношению к периоду сигналов остаётся величиной постоянной. Это замечено и у микросхем низкочастотных серий. Так, в генераторе на микросхеме HEF4060B при смене резонатора со 100 кГц на 32,768 кГц ток не изменился и был около 50 мкА при напряжении питания 5 В [3].

4. В случае необходимости минимизации тока потребления генератором кроме выбора сопротивления R2 следует обратить внимание на выбор ёмкости конденсаторов C1, C2. Совместно с резонатором ZQ1 они, как известно, образуют параллельный резонансный LC-контур с частичным подключением к выходу генератора. Суммарная ёмкость, при их последовательном соединении с учётом ёмкостей монтажа, должна быть равна нагрузочной ёмкости резонатора, указанной его производителем. Коэффициент передачи сигнала с выхода на вход генератора зависит от соотношения C1 с C2. При C1 = C2 он меньше единицы, а при C2 > C1 – больше единицы, что приводит к улучшению прямоугольности импульсов на выходе (напряжение на входе инвертора увеличивается) и к уменьшению тока потребления [3]. В более ранних сериях КМОП, например, для

«часовой» микросхемы K176IE18, при питании 5 В ток потребления генератора с резонатором 32,768 кГц удавалось снизить до 11,5 мкА при соотношении C1 с C2 примерно 1/3 (10 пФ и 30 пФ).

5. Форма выходного сигнала рассмотренных генераторов позволяет, как правило, подавать их непосредственно на входы типовых КМОП-микросхем, однако в ответственных случаях следует использовать триггеры Шмитта, как это сделано, например, в конструкции [4].

Существуют также микросхемы, включающие в свой состав, кроме небуферизированного инвертора, второй такой же инвертор и триггер Шмитта – SN74LVC1404. Её схема приведена на рис. 6.

Микросхема SN74LVC1GX04 содержит цепочку из трёх инверторов, формирующую выходной сигнал с крутыми фронтами. Её схема приведена на рис. 7.

Параметры небуферизированных инверторов, входящих в их состав, близки к параметрам 74LVC1GU04, поэтому можно пользоваться приведёнными выше рекомендациями.

Литература

1. Комплект адаптеров SMD-DIP. URL: <https://ali.click/aowk61p>.
2. Use of the CMOS Unbuffered Inverter in Oscillator Circuits. Texas Instruments. Application Report. SZZA043 – January 2004.
3. Глибин С. Настольный цифровой вольтметр 4½ разряда с ЖК-индикатором // Современная электроника. 2025. № 8. С. 18–21.
4. Бирюков С. Цифровой измеритель ёмкости, индуктивности и ЭПС // Радио. 2026. № 4. С. 31–35; № 5. С. 21–25.