

03, март 2016

УДК 621.389

Разработка входного каскада цифрового частотомера и анализ его работы при разных уровнях гистерезиса

Казаков А. К., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

Эйвазов А. Г., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

Научный руководитель: Павлов Ю.Н., д.т.н, профессор

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

pavlov@bmstu.ru

1. Введение

Необходимость в измерении частоты возникает во многих областях науки и техники и особенно часто - в радиоэлектронике, которая охватывает обширную область электрических колебаний от инфранизких до сверхвысоких частот включительно.

Существует множество частотомеров для измерения частоты, например, резонансные частотомеры, конденсаторные частотомеры, вибрационные (язычковые) частотомеры и другие. В настоящее время применяют гетеродинные и цифровые (электронно-счётные) частотомеры. Основное назначение частотомеров - измерение частоты непрерывных и импульсных колебаний, осуществляемое в широком частотном диапазоне, и подсчёт интервала времени. В данной статье будет рассмотрен цифровой частотомер.

2. Техническое задание

Разработать входную часть схемы цифрового частотомера.

- Чувствительность - 10 мВ;
- Частота входного сигнала - 100 МГц;
- Максимальный уровень входного сигнала - 5 В;
- Точность установки порога срабатывания - 5мВ;

- Диапазон регулирования уровня гистерезиса - 0-100 мВ;
- Точность установки гистерезиса - 10 мВ;
- Управление настройками осуществляется цифровым кодом в уровнях LVCMOS (3.3 В)).

3. Теоретическая часть

3.1 Частотомеры и их классификация

Виды частотомеров:

- Гетеродинные частотомеры (Принцип действия основан на сравнении частоты входного сигнала с частотой перестраиваемого вспомогательного генератора (гетеродина));

- Цифровые (электронно-счётные) частотомеры.

Частотомеры классифицируют по:

- По методу измерения - приборы непосредственной оценки (напр. аналоговые) и приборы сравнения (напр. резонансные, гетеродинные, электронно-счетные).
- По физическому смыслу измеряемой величины — для измерения частоты синусоидальных колебаний (аналоговые), измерения частот гармонических составляющих (гетеродинные, резонансные, вибрационные) и измерения частоты дискретных событий (электронно-счетные, конденсаторные).
- По исполнению (конструкции) - щитовые, переносные и стационарные.

3.2 Цифровые (электронно-счётные) частотомеры

Цифровые частотомеры - довольно распространённые измерительные приборы, используемые в самых различных областях науки, техники и промышленности для оценки частотно-временных параметров электрических сигналов.

Электронно-счётные частотомеры по своим возможностям являются универсальными приборами. Их основное назначение - измерение частоты непрерывных и импульсных колебаний, осуществляемое в широком частотном диапазоне (примерно от 10 Гц до 100 МГц) при погрешности измерений не более 0,0005%. Кроме того, они позволяют измерять периоды низкочастотных колебаний, длительности импульсов, отношения двух частот (периодов) и т.д.

Действие электронно-счётных частотомеров основано на дискретном счёте числа импульсов, поступающих за калиброванный интервал времени на электронный счётчик с

цифровой индикацией.

Современные цифровые частотомеры обеспечивают самые высокие метрологические характеристики (точность и разрешающую способность) среди всех прочих измерительных приборов, отличается достаточно высоким быстродействием, широкими функциональными возможностями, простой эксплуатацией, высокой надёжностью.

Помимо измерения частотно-временных параметров периодических сигналов, современные цифровые частотомеры применяются для измерения различных физических величин. Для этого необходимо подключать к частотомеру вспомогательные первичные измерительные преобразователи (датчики) имеющие выходные сигналы, частота или период которых пропорциональны измеряемой величине. Например, цифровой частотомер можно использовать для измерения скорости вращения вала двигателя, или расхода жидкости в трубопроводе, или скорости потока воздуха. Цифровые частотомеры находят также применение в качестве генераторов стабильных частот и таймеров постоянных или программируемых интервалов времени.

3.3 Входной каскад частотомера

Входной каскад цифрового частотомера должен формировать на выходе логический сигнал, который будет поступать на следующий блок частотомера.

Необходимо преобразовать зашумленный входной аналоговый сигнал. Для этого преобразования будет использоваться компаратор с внешним гистерезисом.

Гистерезис используется для подавления шумов (быстрых колебаний,дребезга контактов). Разность напряжений между уровнями включения и выключения называется гистерезисом срабатывания.

4. Выбор и обоснование схемы устройства

Необходимо реализовать входную часть цифрового частотомера. В качестве основного элемента выбран компаратор.

Выходное напряжение компаратора (рис. 1) составляет
$$U_a = \begin{cases} U_{a \max} & \text{при } U_1 > U_2 \\ U_{a \min} & \text{при } U_1 < U_2 \end{cases}.$$

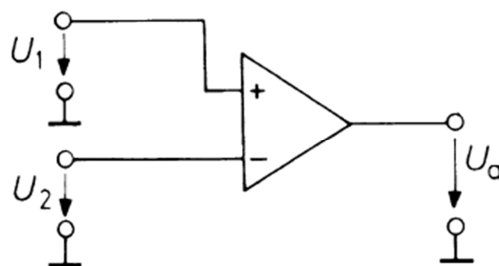


Рис. 1. Компаратор

Соответствующая передаточная характеристика приведена на рис. 2. Благодаря высокому усилению схема реагирует на весьма малое разностное напряжение $U_1 - U_2$ и потому хорошо подходит для высокоточного сравнения двух напряжений. В данной работе это сигнал и опорное напряжение, реализуемое с помощью источника опорного напряжения (ИОН) и цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

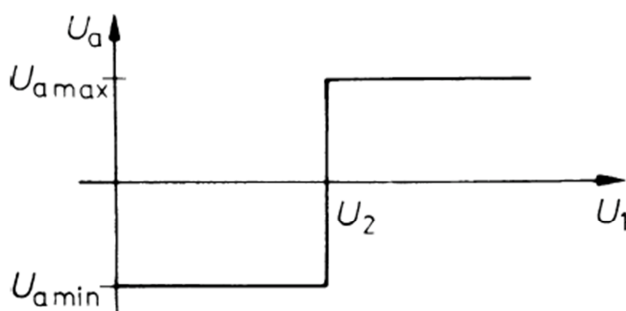


Рис. 2. Передаточная характеристика

Функциональная схема устройства представлена на рис. 3. В дальнейшем последовательно подбираются компоненты и схемотехнические решения для того, чтобы выполнить требования технического задания.

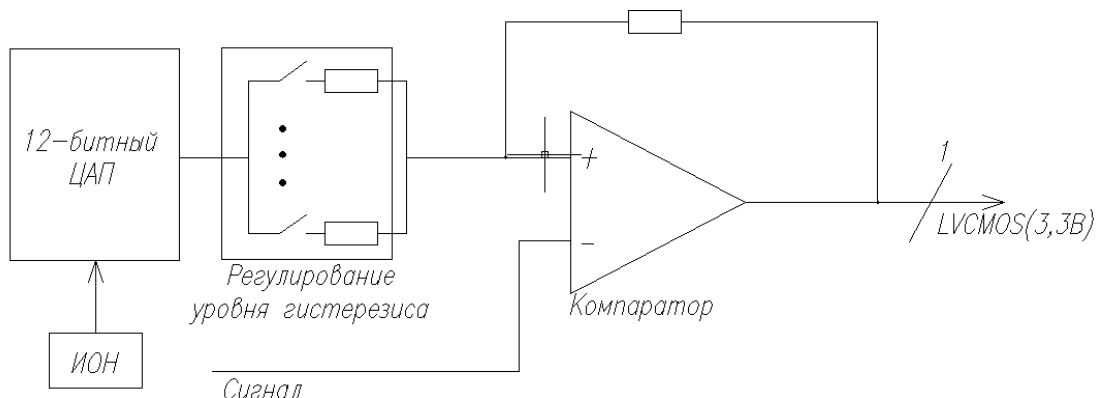


Рис. 3. Функциональная схема устройства

4.1 Выбор компаратора

Учитывая высокую частоту входного сигнала, выберем высокоскоростной компаратор, который будет работать при частоте 100 МГц.

Компаратор LTC6752-2 производства фирмы Linear Technology. LTC6752 – семейство высокоскоростных компараторов, работающих на частотах до 280 МГц, обладает КМОП выходом, который благодаря отдельным каскадам питания (входным и выходным) позволяет напрямую взаимодействовать с логическими устройствами. Основные характеристики выбранного компаратора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики компаратора LTC6752-2

Высокая скорость переключения:	280 МГц
Низкое время задержки:	2,9 нс
Диапазон питания входного каскада:	От 2,45 В до 5,25 В
Диапазон питания выходного каскада:	От 1,71 В до 3,5 В
Рабочий диапазон температур:	От -40°C до 125°C

Требуется обеспечить регулируемый диапазон гистерезиса 0-100 мВ с точностью установки 10 мВ. Было решено использовать положительную обратную связь для реализации внешнего гистерезиса (рис. 4). V_{DD} и V_{CC} – ножки питания входного и выходного каскада соответственно.

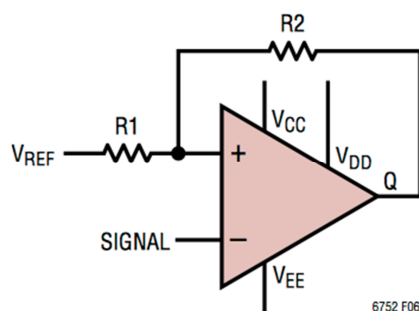


Рис. 4. Реализация гистерезиса через ПОС

С учётом точности установки гистерезиса диапазонов должно быть 10 (0-10,0-20,...,0-100). Для реализации такой системы было принято использовать демультиплексор.

4.2 Выбор демультиплексора

Для обеспечения гистерезиса используются 2 резистора. Чтобы можно было регулировать диапазон уровня гистерезиса один из резисторов должен быть переменным.

Было принято вместо регулируемого резистора или потенциометра использовать

демультиплексор, который будет транслировать входное напряжение на ножку, адрес который задаётся четырьмя ножками адреса. Каждая из выходных ножек подключена к резистору с сопротивлением, обеспечивающим определённый уровень гистерезиса. Так как диапазонов должно быть 10, то и выходных ножек соответственно будет 10.

Согласно техническому заданию был выбран высокочастотный, 16-канальный демультиплексор - ADG1206.

На адресные ножки демультиплексора A0-A3 подаётся двоичное число. Представив двоичное число в десятичном виде, получим номер ножки, на которую транслируется входное напряжение, которое подаётся на ножку D. Таблица истинности представлена на рис. 5. V_{ss} и V_{dd} – входы питания демультиплексора, EN – управляющий сигнал.

4.3 Выбор ИОН

В данной работе необходимо обеспечить опорное напряжение, которое формируется ИОН и подаётся на неинвертирующий вход компаратора. В качестве источника напряжения была выбрана микросхема LT1461BIS8-5 (Linear Technology).

Схема на выходе формирует напряжение 5 В, при входном напряжении от 5,3 В до 20 В.

4.4 Выбор ЦАП

Чтобы обеспечить точность установки порога срабатывания - 5мВ необходимо выбрать 12 - битный ЦАП, на вход которого будет подаваться опорное напряжение. Разрядность выбиралась из условия максимального значения сигнала (5 В) и из условия точности (5 мВ).

Была выбрана микросхема AD7391AR компании Analog Devices.

На ножку V_{REF} подаётся опорное напряжение, на ножку V_{DD} – питание микросхемы. V_{OUT} – выходное напряжение микросхемы. LD, CLK, SDI, CLR – управляющие сигналы. На выход транслируется напряжение, которое рассчитывается в зависимости от того, какое двоичное число подано на ножку SDI. $V_{OUT} = V_{REF} * \frac{D}{4096}$, где D – десятичное число, полученное из заданного двоичного.

4.5 Построение системы питания

Система питания для данной схемы должна строиться на основе прецизионных источников опорного напряжения, так как в данном случае крайне важными факторами

является наличие как можно более слабых шумов на выходе источника и точность опорного напряжения на ЦАП. Напряжения 3,3 В, 5 В и 5,2 В получаются из входного 6 В с помощью стабилизаторов с малым падением напряжения LT1764EQ и LT1764EQ-3.3.

Для получения напряжения 3,3 В используется стандартная микросхема (рис. 5а). Для получения напряжения 5 В и 5,2 В необходимо рассчитать значения R1 и R2 (рис. 5б).

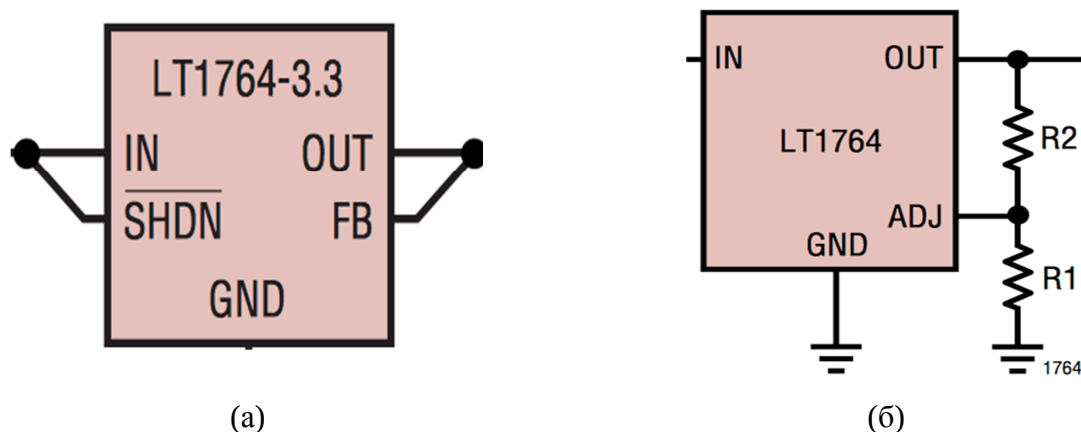


Рис. 5. Микросхема LT1764-3.3(а) и LT1764(б)

Номиналы резисторов подбираются по формуле:

$$V_{OUT} = 1.21 * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right);$$

$$\frac{V_{OUT}}{1.21} = 1 + \frac{R1}{R2};$$

$$\frac{V_{OUT}}{1.21} - 1 = \frac{R1}{R2};$$

$$R1 = \left(\frac{V_{OUT}}{1.21} - 1\right) * R2;$$

Для получения 5 В (значение V_{OUT}) был выбран резистор $R2=1,06$ кОм и получен резистор $R1=3,32$ кОм.

Для получения 5,2 В (значение V_{OUT}) был выбран резистор $R2=1,15$ кОм и получен резистор $R1=3,79$ кОм.

Расчёт погрешности выходного напряжения каждого из стабилизаторов приведён в пункте 4.7.

4.6 Расчёт номиналов сопротивлений

Необходимо рассчитать номиналы сопротивлений, благодаря которым будет

обеспечиваться то или иное значения уровня гистерезиса.

Диапазон регулирования 0-100 мВ с точностью 10 мВ. Таким образом должно быть 10 сопротивлений. Сопротивления R1, R2, ... , R10 обеспечивают соответственно 10 мВ, 20 мВ, ... , 100 мВ (значение гистерезиса). Как было сказано выше, один из резисторов (R11) должен быть постоянным (на рис. 4 – R2).

Значения R1, R2, ... , R10 были рассчитаны по следующей формуле:

$$V_{hyst} = (V_{DD} - V_{EE}) * \frac{R1}{R1+R11};$$

В данной работе $V_{EE} = 0$.

$$V_{hyst} = V_{DD} * \frac{R1}{R1+R11};$$

$$c_{hyst} * R1 + V_{hyst} * R11 = V_{DD} * R1;$$

$$R1 = \frac{V_{hyst} * R11}{V_{DD} - V_{hyst}};$$

Выберем R11=267 кОм. Для выбранного R11 и для $V_{DD}=3,3$ В рассчитаем R1, R2, ... , R10 для соответствующих диапазонов $V_{hyst}=10; 20; \dots ;100$. Полученные значения представлены в таблице 2. В крайней правой колонке представлены номиналы, соответствующие рассчитанным значениям, из ряда E192.

Таблица 2

Номиналы сопротивлений

$V_{Hyst}(мВ)$	R1 (кОм)	E192
10	0,811	0,816
20	1,628	1,62
30	2,449	2,46
40	3,276	3,28
50	4,1076	4,12
60	4,944	4,93
70	5,786	5,76
80	6,633	6,65
90	7,485	7,5
100	8,343	8,35

Оценка погрешностей полученных диапазонов уровней гистерезиса с учётом допуска выбранных резисторов приведена в следующем пункте.

4.7 Оценка погрешностей

Каждый из выбранных резисторов имеет свой допуск.

Рассмотрим, какова будет погрешность выходного напряжения для стабилизаторов LT1764EQ.

Для схемы с выходным напряжением 5 В были выбраны сопротивления

$R1=3,32 \text{ кОм}$ и $R2=1,06 \text{ кОм}$. Модель сопротивление $R1$: 0402-3,32 кОм $\pm 0,5\%$, а сопротивление $R2$: 0402-1,06 кОм $\pm 0,5\%$. Как видим, допуск составляет 0,5%.

Рассчитаем сопротивления $R1$ и $R2$ с учётом допуска:

$$R1 = 3,32 \text{ кОм} \pm 0,5\% = 3,32 \text{ кОм} \pm 0,0166 \text{ кОм};$$

Таким образом, $R1_{\text{MIN}}=3,3034 \text{ кОм}$ и $R1_{\text{MAX}}=3,3366 \text{ кОм}$.

$$R2 = 1,06 \text{ кОм} \pm 0,5\% = 1,06 \text{ кОм} \pm 0,0053 \text{ кОм};$$

Таким образом, $R2_{\text{MIN}}=1,0547 \text{ кОм}$ и $R2_{\text{MAX}}=1,0653 \text{ кОм}$.

Рассчитаем выходное напряжение по формуле: $V_{\text{OUT}} = 1,21 * \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$;

$$V_{\text{OUT_MIN}} = 1,21 * \left(1 + \frac{R1_{\text{MIN}}}{R2_{\text{MAX}}}\right) = 1,21 * \left(1 + \frac{3,3034}{1,0653}\right) = 4,9621 \text{ В};$$

$$V_{\text{OUT_MAX}} = 1,21 * \left(1 + \frac{R1_{\text{MAX}}}{R2_{\text{MIN}}}\right) = 1,21 * \left(1 + \frac{3,3366}{1,0547}\right) = 5,0378 \text{ В}.$$

Аналогично для схемы с выходным напряжением 5.2 В аналогично рассчитаны $V_{\text{OUT_MIN}}$ и $V_{\text{OUT_MAX}}$:

$$V_{\text{OUT_MIN}} = 1,21 * \left(1 + \frac{R1_{\text{MIN}}}{R2_{\text{MAX}}}\right) = 1,21 * \left(1 + \frac{3,77105}{1,15575}\right) = 5,158 \text{ В};$$

$$V_{\text{OUT_MAX}} = 1,21 * \left(1 + \frac{R1_{\text{MAX}}}{R2_{\text{MIN}}}\right) = 1,21 * \left(1 + \frac{3,80895}{1,14425}\right) = 5,237 \text{ В}.$$

Полученные выходные напряжения микросхем LT1764EQ удовлетворяют напряжению питания демультиплексора и ЦАП (5 В) и компаратора (5,2 В).

Рассмотрим, как изменятся значения диапазонов гистерезиса (только для 10 мВ и 100 мВ) с учётом допуска выбранных резисторов.

Были выбраны сопротивления $R1=0,816 \text{ кОм}$, $R10=8,35$ и $R11=267 \text{ кОм}$. Модель сопротивление $R1$: 0402-0,816 кОм $\pm 0,5\%$, сопротивления $R10$: 0402-8,35 кОм $\pm 0,5\%$ и сопротивления $R11$: 0402-267 кОм $\pm 0,5\%$. Как видим, допуск составляет 0,5%.

Рассчитаем сопротивления $R1$, $R10$ и $R11$ с учётом допуска:

$$R1 = 0,816 \text{ кОм} \pm 0,5\% = 0,816 \text{ кОм} \pm 0,00408 \text{ кОм};$$

Таким образом, $R1_{MIN}=0,81192 \text{ кОм}$ и $R1_{MAX}=0,82008 \text{ кОм}$.

$$R10 = 8,35 \text{ кОм} \pm 0,5\% = 8,35 \text{ кОм} \pm 0,004175 \text{ кОм};$$

Таким образом, $R10_{MIN}=8,30825 \text{ кОм}$ и $R10_{MAX}=8,39175 \text{ кОм}$.

$$R11 = 267 \text{ кОм} \pm 0,5\% = 267 \text{ кОм} \pm 1,335 \text{ кОм};$$

Таким образом, $R11_{MIN}=265,665 \text{ кОм}$ и $R11_{MAX}=268,335 \text{ кОм}$.

Рассчитаем выходное напряжение по формуле:

$$V_{hyst} = (V_{DD} - V_{EE}) * \frac{R1}{R1 + R11};$$

Для диапазон 10 мВ:

$$V_{hyst_MIN} = 3,3 * \frac{R1_{MIN}}{R1_{MIN} + R11_{MAX}} = 3,3 * \frac{0,81192}{0,81192 + 268,335} = 9,95492 \text{ мВ};$$

$$\begin{aligned} V_{hyst_MAX} &= 3,3 * \frac{R1_{MAX}}{R1_{MAX} + R11_{MIN}} = 3,3 * \frac{0,82008}{0,82008 + 265,665} \\ &= 10,1554 \text{ мВ}; \end{aligned}$$

Для диапазон 100 мВ:

$$\begin{aligned} V_{hyst_MIN} &= 3,3 * \frac{R10_{MIN}}{R10_{MIN} + R11_{MAX}} = 3,3 * \frac{8,30825}{8,30825 + 268,335} \\ &= 99,1097 \text{ мВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{hyst_MAX} &= 3,3 * \frac{R10_{MAX}}{R10_{MAX} + R11_{MIN}} = 3,3 * \frac{8,39175}{8,39175 + 265,665} \\ &= 101,0475 \text{ мВ}; \end{aligned}$$

Мы получили, что выбранные модели резисторов подходят для использования в данной работе, т.к. разница между идеальным и реальным значением не превышает половины шага (10 мВ).

5. Моделирование схемы

Для моделирования схемы используется программа LTSpice, разработанная компанией Linear Technology. LTSpice позволяет моделировать схемы, используя элементы, разработанные данной компанией. В этой части работы проводится исследование выходных характеристик схемы в зависимости от поданного на неё напряжения.

Для наглядной работы срабатывания гистерезиса промоделируем схему без ПОС (рис. 6). График зависимости и приближенный график зависимости времени от

напряжения изображены на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

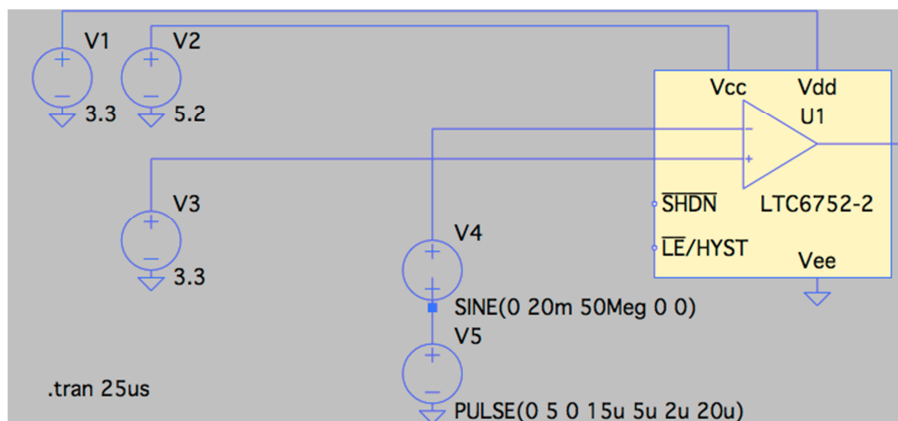


Рис. 6. Схема без ПОС

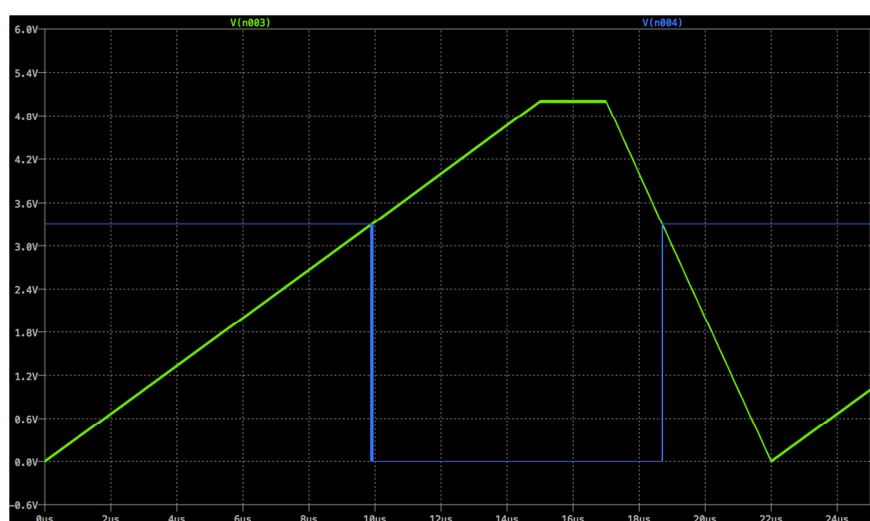


Рис. 7. График зависимости времени от напряжения для входного сигнала (зелёный) и выходного сигнала (синий)

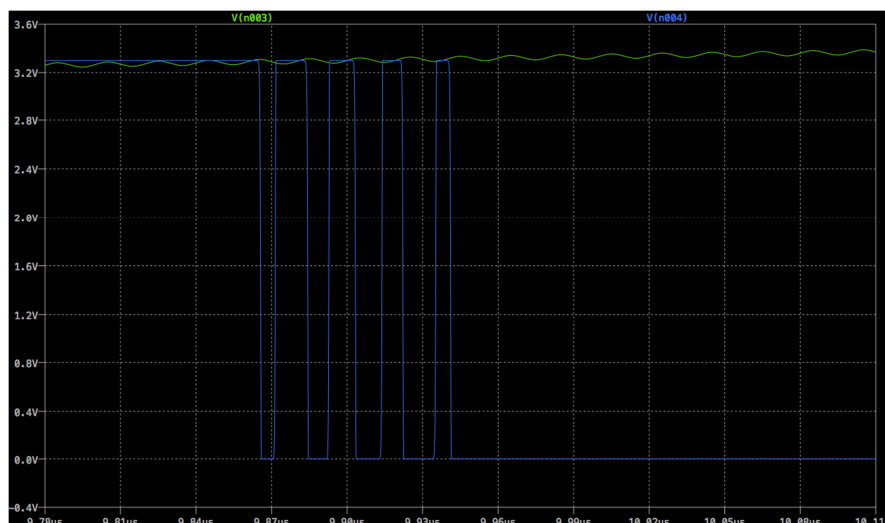


Рис. 8. Приближенный график зависимости времени от напряжения для входного сигнала

(зелёный) и выходного сигнала (синий)

Теперь добавим ПОС (рис. 9) и промоделируем с учётом диапазона уровня гистерезиса 10 мВ ($R1=0,816$ кОм), 50 мВ ($R5=4,12$ кОм) и 100 мВ ($R1=8,34$ кОм). Далее приводятся графики в приближении.

Для диапазона гистерезиса 10 мВ получим график, изображенный на рис. 10.

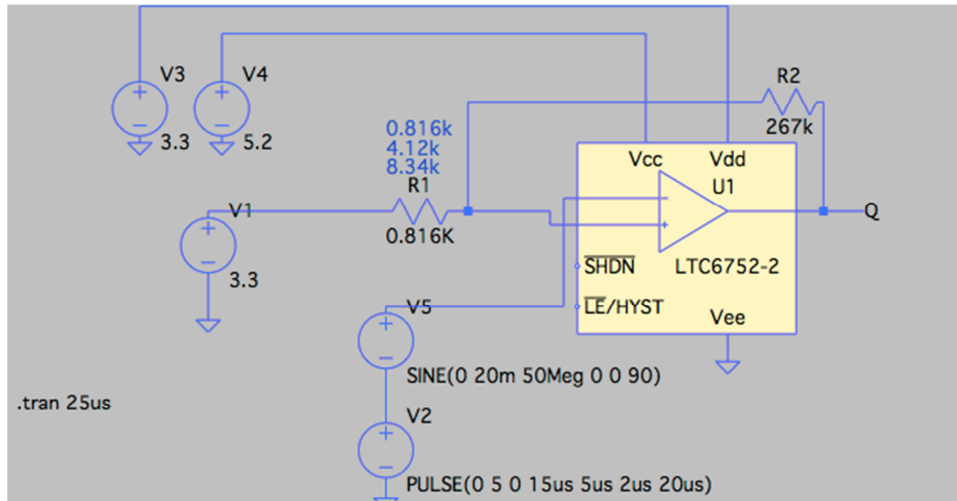


Рис. 9. Схема, обеспечивающая гистерезис 10 мВ

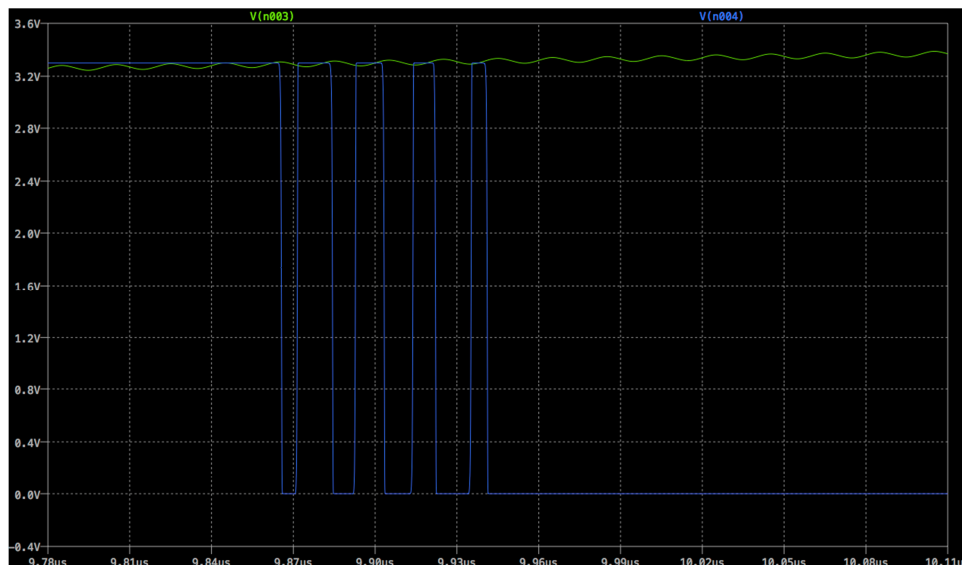


Рис. 10. Приближенный график зависимости времени от напряжения для входного сигнала (зелёный) и выходного сигнала (синий)

Для диапазона гистерезиса 50 мВ получим график, изображенный на рис. 11.

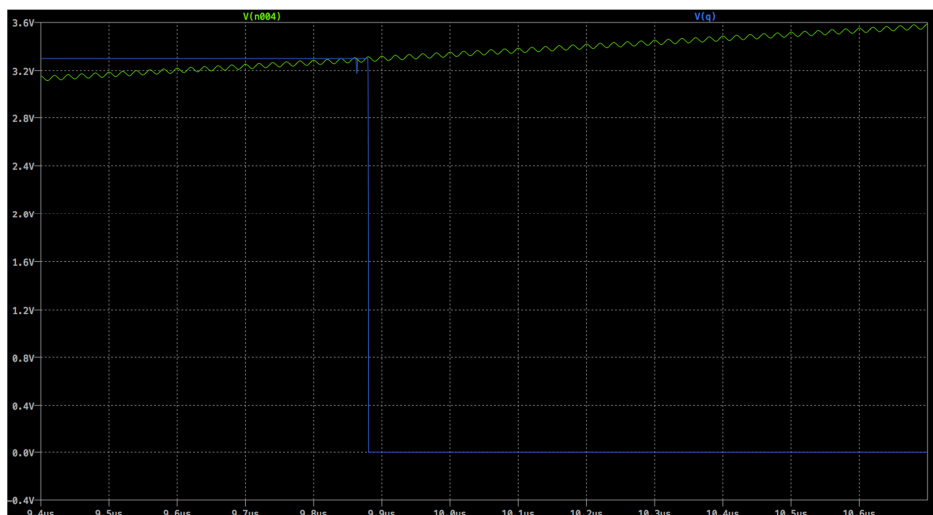


Рис. 11. Приближенный график зависимости времени от напряжения для входного сигнала (зелёный) и выходного сигнала (синий)

Для диапазона гистерезиса 100 мВ получим график, изображенный на рис. 12.

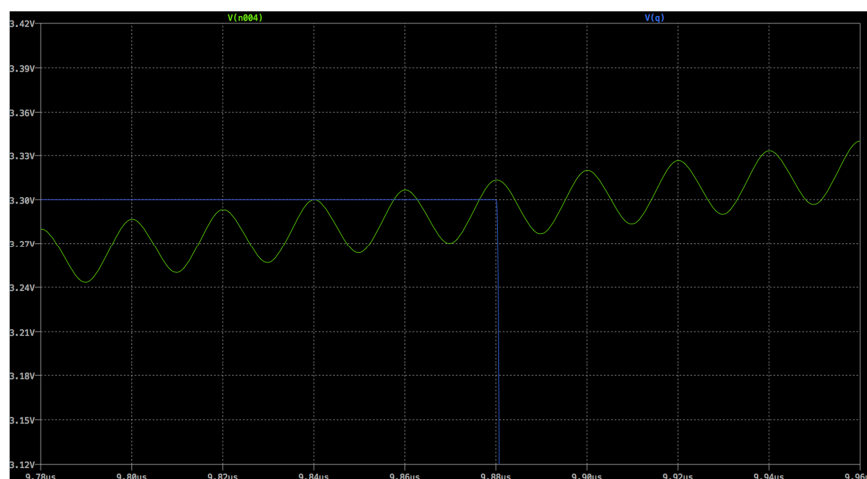


Рис. 12. Приближенный график зависимости времени от напряжения для входного сигнала (зелёный) и выходного сигнала (синий)

6. Заключение

Были разработаны функциональная и электрическая принципиальная схемы. Проведено моделирование, результаты которого показывают, что выбранные схемотехнические решения удовлетворяют требованиям ТЗ, в частности: регулируемый диапазон уровня гистерезиса с заданной точностью, работоспособность от заданного напряжения питания. Работоспособность разработанной схемы со всеми номиналами элементов и выбранными моделями микросхемы подтверждается расчетами (погрешности) и гарантиями производителей компонентов (официальная техническая документация). Также посредством выбранного ЦАП, удовлетворено требование в части

точности установки порога срабатывания.

Список литературы

- [1].** Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб., и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 816 с.: ил., табл.
- [2].** Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. В 2 Т. Т. 1.: пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2008. 832 с.: ил. [U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter Schaltungstechnik].
- [3].** Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. В 2 Т. Т. 2.: пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2007. 942 с.: ил. [U. Tietze, Ch. Schenk. Halbleiter Schaltungstechnik].