Расчет компаратора с гистерезисом

Схема с компаратором напряжений на основе микросхемы компаратора является эффективным решением многих задач сравнения напряжений и сопряжения аналоговых и цифровых сигналов. Подтверждает это тот факт, что всеми ведущими производителями ИМС выпускается богатый ассортимент компараторов, позволяющий добиться разработчику оптимального решения.
Например, Maxim Integrated (www.maxim-ic.com) предоставляет компараторы с током потреблением от 1,2 мкА, задержка 22мкс (max920) до 26 мА, задержка 1,2 нс (max9691).

Очень часто схема компаратора должна обеспечивать гистерезис с заданными в разрабатываемой схеме порогами включения V_{THR} и выключения V_{THF} и полосой гистерезиса V_{HB}. Среди ИМС компараторов имеются образцы со встроенным гистерезисом, например, max920H обеспечивает встроенный гистерезис 4 мВ. Однако, величина встроенного гистерезиса фиксирована и часто неудовлетворяет требованиям схемы. Ниже приводится описание расчета схемы компаратора с гистерезисом для заданных порогов переключения. Расчет взят из документации на компаратор MAX917-MAX920. Дополнительно приводятся пояснения к выводу формул для порогов, а также оценка влияния отклонения применяемых резисторов на отклонения порогов срабатывания.

Схема компаратора и обозначение элементов представлено на рис. 1.

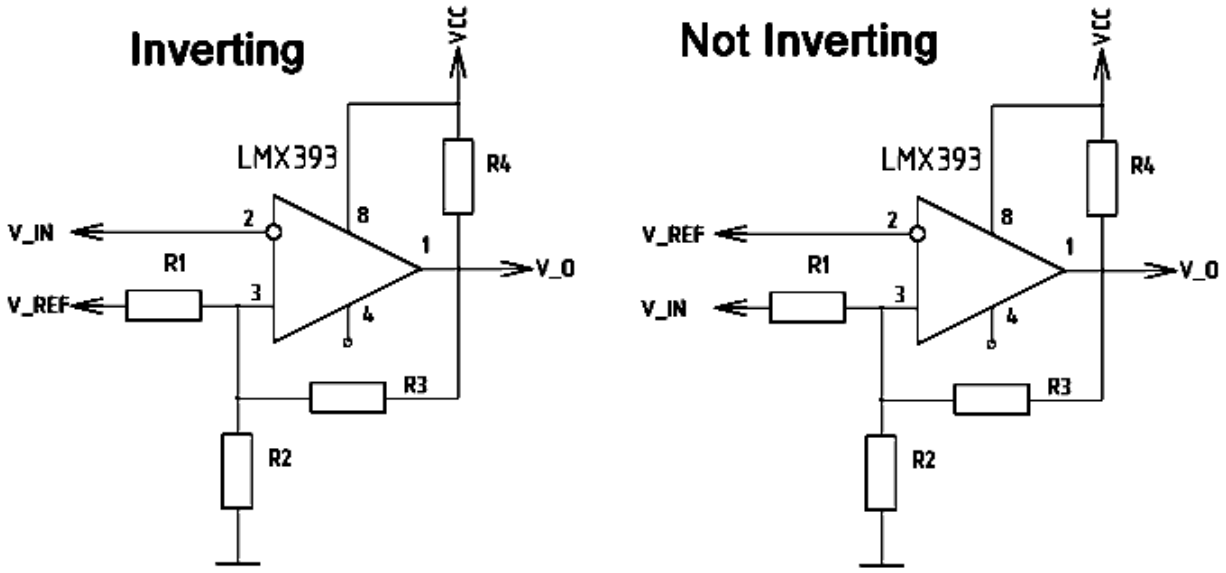

Рис. 1.

Гистерезис формируется тремя резисторами с использованием положительной обратной связи для ИМС компаратора. Такая схема может быть инверсной (выход переходит в низкое состояние при превышении входным сигналом порога), так и без инверсии. Это достигается сменой точек подачи входного Vin и опорного Vref напряжений.

Эквивалентная схема компаратора представляет собой двухузловую схему, приведенную на рис. 2. Источник E1 моделирует источник входного напряжения Vin, а E2 – напряжение питания компаратора Vcc.

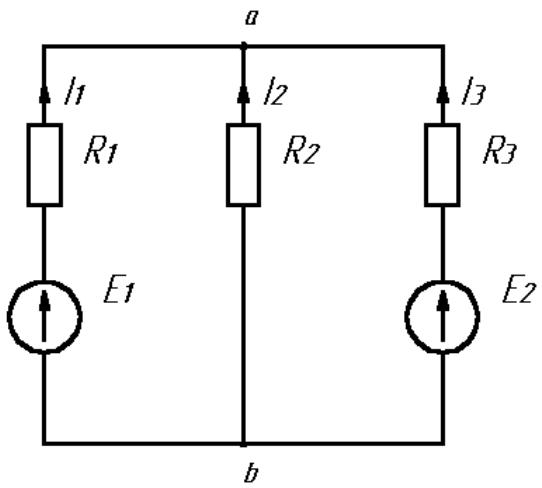

Рис.2.

Для двухузловой схемы напряжение между узлами a–b определяется как [1, с. 29]

$$U_{ab} = \frac{\sum E_k g_k}{\sum g_k}, \qquad (1)$$

где k – номера ветвей, Ek – ЭДС ветвей, gk – проводимости ветвей.

Напряжение порога переключения для нарастающего входного напряжения V_{THR} в неинвертирующей схеме определяется как входное напряжение при котором напряжение на R2 достигает опорного (Vref см. рис. 3).

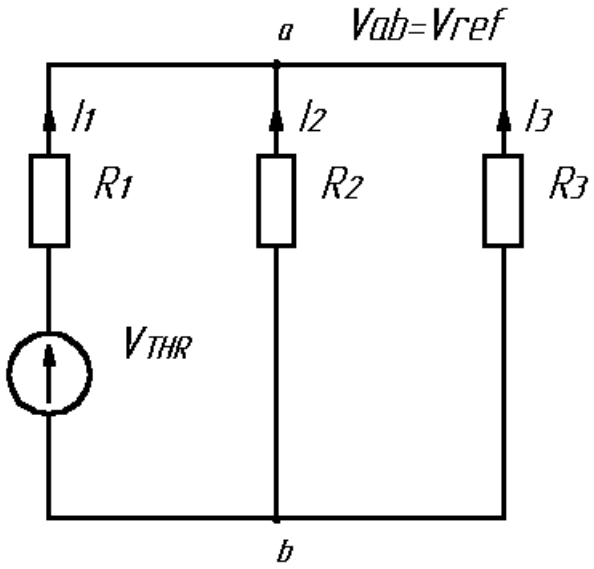

Рис. 3.

Если подставить в формулу напряжения между узлами (1) значение опорного напряжения можно получить выражение для порога переключения для нарастающего входного сигнала

$$V_{REF} = \frac{V_{THR}\, g_1}{g_1 + g_2 + g_3}.$$

$$V_{THR} = V_{REF} R_1 \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right]. \qquad (2)$$

Напряжение порога переключения для спадающего входного напряжения V_{THF} в неинвертирующей схеме определяется как входное напряжение при котором напряжение на R2 упадет до опорного Vref см. рис. 4.

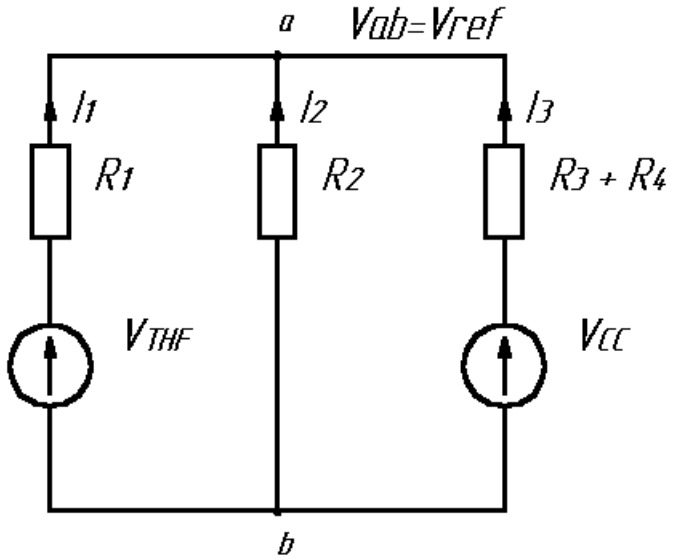

Рис. 4.

Подстановка в формулу напряжения мд узлами (1) значения опорного напряжения дает выражение для порога переключения для спадающего входного сигнала

$$V_{REF} = \frac{V_{THF}\ g_1 + V_{CC}\ \langle g_3 | g_4 \rangle}{g_1 + g_2 + \langle g_3 | g_4 \rangle}.$$

$$V_{THF} = V_{REF} R_1 \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \right] - \frac{R_1}{R_3 + R_4} V_{CC}. \qquad (3)$$

Используется следующая процедура для расчета величин резисторов.
1) Выбор R3. Это сопротивление выбирается так, чтобы ток смещения компаратора мало влиял на расчет гистерезиса. В данных на компаратор необходимо посмотреть максимальную величину тока смещения при котором выход компаратора находится в линейном режиме. Например, для LM2903 это 0,5uA. Ток через R3 должен быть в 50 -100 раз больше тока смещения. Примем его 50 x 0.5uA = 25uA.

Ток через R3 в момент переключения (Vin=Vref) будет Ir3 = (Vref – Vo)/R3. Рассматривая два состояния выхода компаратора (Vo = Vcc и Vo = 0), получаем два выражения для R3:

R3 = Vref/Ir3 и
R3 = (Vcc-Vref)/Ir3 – R4.

Необходимо использовать меньшее из этих значений. Например, для Vref =2,5V и Vcc = 5V эти сопротивления составят 100 кОм, без учета сравнительно небольшого сопротивления R4.

2). Выбираем требуемую полосу гистерезиса. Например, V_{HB} = 2,5V.

3). Рассчитываем сопротивление R1 по следующей формуле, исходя из требуемой полосы гистерезиса

$$R_1 = R_3 \frac{V_{HB}}{V_{CC}}.$$

Для рассматриваемого примера $R_1 = 100k\Omega \frac{2{,}5V}{5V} = 50k\Omega$.

4) Выбираем напряжение переключения для нарастающего входного напряжения (threshold rising) V_{THR}. V_{THR} - это пороговое напряжение при котором компаратор переключает свой выход с низкого на высокое напряжение при нарастающем входном напряжении. Причем, V_{THR} должно быть больше, того что формируется делителем R1R3 (отсутствует R2)

$$V_{THR} > V_{REF} \frac{R_1 + R_3}{R_3}.$$

5) Вычисляем R2 как

$$R_2 = 1 / \left[\frac{V_{THR}}{V_{REF} R_1} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_3} \right].$$

Для рассматриваемого примера

$$R_2 = 1 / \left[\frac{50V}{2.5V\, 50k\Omega} - \frac{1}{50k\Omega} - \frac{1}{100k\Omega} \right] = 2.7k\Omega.$$

6) Проверяем напряжения переключения и гистерезис.
Для нарастающего входного напряжения:

$$V_{THR} = V_{REF} \left[1 + R_1 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \right].$$

В приводимом примере

$$V_{THR} = 2.5V \left[1 + 47k\Omega \left(\frac{1}{2.4k\Omega} + \frac{1}{100k\Omega} \right) \right] = 52.6V.$$

Для спадающего входного напряжения:

$$V_{THF} = V_{REF} \left[1 + R_1 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \right) \right] - \frac{R_1}{R_3 + R_4} V_{cc}.$$

Для примера

$$V_{THF} = 2.5V\left[1 + 47k\Omega\left(\frac{1}{2.4k\Omega} + \frac{1}{103k\Omega}\right)\right] - \frac{47k\Omega}{103k\Omega}5V = 50.3V\ .$$

Рассмотрим зависимость на порог V_{THR} отклонений используемых резисторов δ_R для создания гистерезиса. Падение порога V_{THR} достигнет максимума при уменьшении R_1 и увеличении R_2 и R_3

$$\frac{V_{THR,\delta}}{V_{THR}} = \frac{1 + (1-\delta_R)R_1\left(\frac{1}{(1+\delta_R)R_2} + \frac{1}{(1+\delta_R)R_3}\right)}{1 + R_1\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)}$$

При использовании резисторов с отклонением δ_R в 5% и номинальных значениях из рассматриваемого примера относительное падение порога при нарастании входного напряжения составит $\frac{V_{THR,\delta}}{V_{THR}} = 0.91$, при 1% - 0,95. Если дополнительно учесть отклонение сопротивления вследствие температуры, то можно говорить о снижении порога, вызванного допуском резисторов не менее 10%.

Ссылки:

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники: электрические цепи – М.: Высш шк., 1984, 559с.,
2. Приемы и трюки использования встроенного компаратора в контроллерах Microchip// Алексей Сафронов, Компоненты и технологии, № 7’2004.
(http://www.compel.ru/catalog/microcontrollers/microchip/articles/a004)