

J — вход переключения Q из состояния 0 в состояние 1, K — вход переключения Q из состояния 1 в состояние 0.

В соответствии с классификацией по функциональному признаку триггерные устройства можно разделить на RS , D , T , JK , DV и другие типы.

В настоящее время самое широкое распространение в импульсной и цифровой технике получили триггерные устройства, выполненные на основе логических ИМС.

Триггеры на дискретных элементах, в частности на транзисторах, используются значительно реже. Они находят применение в нестандартной аппаратуре систем автоматического управления и контроля производственными процессами, в ядерной физике и других областях науки и техники, где требуются повышенные значения напряжений и токов. Триггеры на дискретных элементах чаще всего используют в качестве электронных реле для преобразования импульсов чередующейся полярности в прямоугольные перепады напряжений.

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

10.1. Привести временные диаграммы работы устройства и составить таблицу переходов простейшего асинхронного RS -триггера, выполненного: а) на элементах ИЛИ — НЕ (рис. 10.2, а), на элементах И — НЕ (рис. 10.2, б). Сравнить полученные результаты и сделать вывод.

Решение

а) Условимся символами R^n , S^n , Q^n обозначать информационные значения входных и выходных сигналов триггера, действующих в интервале времени $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ (на n -м такте), после поступления управляющих сигналов. Очевидно, что Q^{n-1} — состояние триггера, предшествующее поступлению управляющих сигналов.

При $R^n = 0$, $S^n = 1$ либо сохраняется предыдущее состояние триггера, если $Q^{n-1} = 1$, либо триггер переключается в состояние $Q^n = 1$, если $Q^{n-1} = 0$. При $R^n = 1$, $S^n = 0$ либо сохраняется предыдущее состояние триггера, если $Q^{n-1} = 0$, либо триггер переключается в состояние $Q^n = 0$, если $Q^{n-1} = 1$.

При $R^n = 0$, $S^n = 0$ состояние триггера не изменится, т. е. при любом предыдущем состоянии его будем иметь $Q^n = Q^{n-1}$. После окончания действия сигналов $R^n = 1$ и $S^n = 1$ триггер оказывается в неопределенном состоянии, т. е. с равной вероятностью может перейти в любое из двух устойчивых состояний: $Q^n = 1$ или $Q^n = 0$. Поэтому комбинация входных сигналов $R^n = 1$, $S^n = 1$ для RS -триггера (рис. 10.2, а) является запрещенной.

На основании вышеизложенного таблица переходов RS -триггера на элементах ИЛИ – НЕ будет иметь вид

S^n	R^n	Q^n
0	0	Q^{n-1}
0	1	0
1	0	1
1	1	\times

б) Асинхронный триггер на элементах И – НЕ (рис. 10.2, б) не изменяет своего первоначального состояния при единичных уровнях информационных сигналов на входах устройства, а комбинация сигналов $R^n = 0, S^n = 0$ является запрещенной. Это означает, что для данного триггера управляющими являются нулевые уровни входных сигналов, а не единичные, как в предыдущем случае. Поэтому схему, изображенную на рис. 10.2, б, можно рассматривать как схему RS -триггера, представленную на рис. 10.2, а, с инверсными входами \bar{R}, \bar{S} . Таблица переходов рассмотренной схемы имеет вид

S^n	R^n	Q^n
0	0	\times
0	1	1
1	0	0
1	1	Q^{n-1}

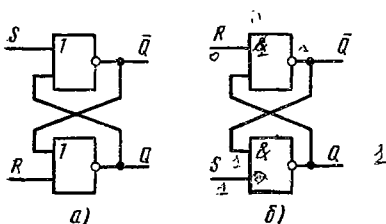


Рис. 10.2

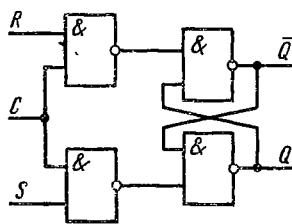


Рис. 10.3

10.2. В соответствии со схемой синхронного RS -триггера (рис. 10.3) составить и объяснить таблицу переходов, привести временные диаграммы работы и записать логическую формулу.

Ответ:

C^n	S^n	R^n	Q^n
0	0	0	Q^{n-1}
0	0	1	Q^{n-1}
0	1	0	Q^{n-1}
0	1	1	Q^{n-1}
1	0	0	Q^{n-1}
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	\times

Логическая формула: $Q^n = C^n (S^n + \bar{R}^n Q^{n-1})$.

10.3. Проанализировать работу асинхронного Т-триггера, функциональная схема которого приведена на рис. 10.4. Составить и объяснить таблицу переходов.

Решение

Предположим, что триггер находится в состоянии 1, т. е. $Q^{n-1} = 1$, $\bar{Q}^{n-1} = 0$. Тогда при $T^{n-1} = 0$ на входах асинхронного RS-триггера, выполненного на ИМС₃ и ИМС₄ типа И-НЕ и являющегося составной частью Т-триггера, будем иметь $R^{n-1} = 1$, $S^{n-1} = 1$.

При поступлении счетного импульса $T^n = 1$ срабатывает ИМС₂. Следовательно, $\bar{R}^n = 0$ и триггер переключается в состояние 0, когда $Q^n = 0$, $\bar{R}^n = 1$.

Сигнал обратной связи задержан с помощью цепей задержки на время $t_{\text{зад}}$, больше времени действия входного импульса T^n , поэтому обратного срабатывания триггера не происходит.

После окончания действия импульса T^n на входах асинхронного RS-триггера снова устанавливается комбинация $R = 1$, $S = 1$, С приходом следующего счетного импульса срабатывает схема ИМС₁, так как $R^n = 1$, $Q^n = 0$, и триггер переключается. Таблица переходов такова:

T^n	Q^n
1	\bar{Q}^{n-1}
0	Q^{n-1}

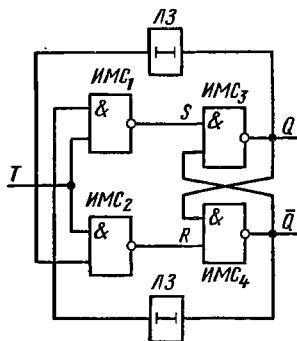


Рис. 10.4

10.4. Составить и объяснить таблицу переходов, привести временные диаграммы переключения синхронного Т-триггера, выполненного по способу «основной — вспомогательный» (О-В) (рис. 10.5).

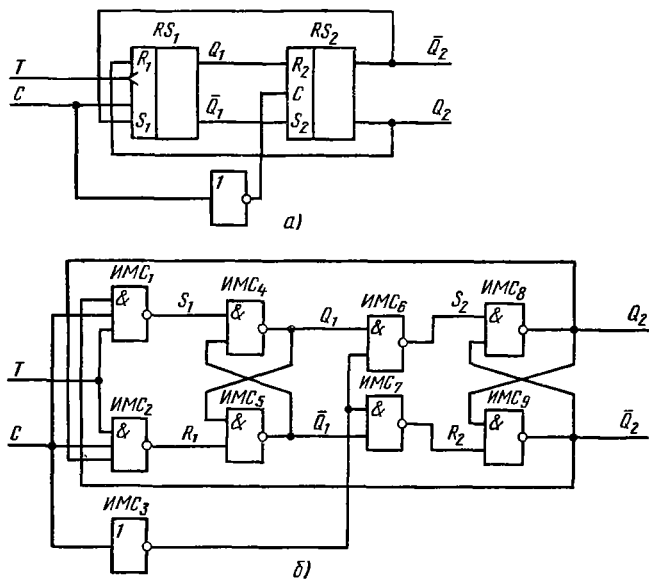


Рис. 10.5

Решение

Синхронный Т-триггер, выполненный по способу О-В (рис. 10.5, а), состоит из двух синхронных RS-триггеров и инвертора, через который тактовый импульс подается на триггер RS_2 (рис. 10.5, а). Триггер RS_1 называется основным (О). Его назначение — прием входной информации ($T = 1$) при наличии тактового импульса ($C = 1$). По окончании действия импульса C информация с основного триггера RS_1 поступает на триггер RS_2 , который называется вспомогательным (В) и считывается на выходах триггера. Таблица переходов такова:

C^n	T^n	Q^n
1	1	\bar{Q}^{n-1}
1	0	Q^{n-1}
0	1	Q^{n-1}
0	0	Q^{n-1}

Предположим, что Т-триггер (рис. 10.5, б) находится в состоянии 1, т. е. $\bar{Q}_2^{n-1} = 0$, $Q_2^{n-1} = 1$, а сигналы на информационном и тактовом ходах отсутствуют ($T^{n-1} = 0$, $C^{n-1} = 0$). Тогда уровень напряжения на выходах ИМС₁ и ИМС₂ соответствует логической единице: $R_2^{n-1} = 1$, $S_2^{n-1} = 0$. Так как $S_2^{n-1} = 0$, то оба входа ИМС₆ имеют уровень напряжений, соответствующий логической единице. Следовательно, триггер RS_1 также находится в состоянии 1, т. е. $\bar{Q}_1^{n-1} = 0$, $Q_1^{n-1} = 1$.

При комбинации $T^n = 1$, $C^n = 0$ на входе Т-триггера схема RS_1 не изменяет своего состояния, так как только один сигнал T не может вызвать срабатывания ИМС₁ или ИМС₂.

При подаче сигналов $T^n = 1$, $C^n = 1$ срабатывает ИМС₂ (состояние ИМС₁ не изменяется), что приводит к изменению состояния триггера RS_1 ($\bar{Q}_1^n = 1$, $Q_1^n = 0$). На входах триггера RS_2 будем иметь $R_2^n = 1$, $S_2^n = 1$.

По окончании действия тактового сигнала C на входе R_2 появляется уровень напряжения, соответствующий логическому нулю, и триггер RS_2 изменяет свое состояние. Если теперь на вход T снова поступит информационный сигнал, то при наличии тактового сигнала срабатывает уже схема ИМС₁.

10.5. Свойства синхронного D -триггера характеризуются таблицей переходов:

C^n	D^n	Q^n
0	0	Q^{n-1}
0	1	\bar{Q}^{n-1}
1	0	0
1	1	1

Показать, что схема на рис. 10.6, выполненная по способу О-В, реализует функцию D -триггера. Привести временные диаграммы, иллюстрирующие работу схемы.

Решение

При $D^n = 0$, $C^n = 0$ на выходах ИМС₁ и ИМС₂ имеем логическую единицу, т. е. основной триггер RS_1 подготовлен к приему информации. При $D^n = 0$, $C^n = 1$ срабатывает ИМС₂, на выходе которой появляется напряжение, соответствующее логическому нулю. Триггер RS_1 срабатывает, если $Q_1^{n-1} = 1$. При этом по окончании действия сигнала $C^n = 1$ переключится вспомогательный триггер RS_2 , состояние которого определяется состоянием триггера RS_1 . Если при комбинации на входах $D^n = 0$, $C^n = 1$ имеем $Q^{n-1} = 0$, то триггер RS_1 , а сле-

довательно, и RS_2 не срабатывают, т. е. состояние D -триггера остается прежним.

При комбинации $D^n = 1$, $C^n = 1$ срабатывает ИМС₂. Тогда на входах триггера RS_1 будем иметь $R_1^n = 1$, $S_1^n = 0$, т. е. триггер RS_1 срабатывает, если $Q^{n-1} = 0$. В этом случае по окончании импульса $C^n = 1$ срабатывает и триггер RS_2 , изменяя таким образом состояние D -триггера. Если при $D^n = 0$, $C^n = 1$ будем иметь $Q^{n-1} = 1$, то состояние триггера RS_1 и в целом D -триггера не изменится.

10.6. Сравнив схемы рис. 10.5 и рис. 10.6, показать, как можно преобразовать схему T -триггера в схему D -триггера.

Ответ: для преобразования схемы T -триггера (см. рис. 10.5) в схему D -триггера (см. рис. 10.6) необходимо исключить обратные связи с выходов \bar{Q}_2 , Q_2 на входы ИМС₁ и ИМС₂, а также при замене входа T на вход D подключить в одну из входных ветвей дополнительный инвертор ИМС₃.

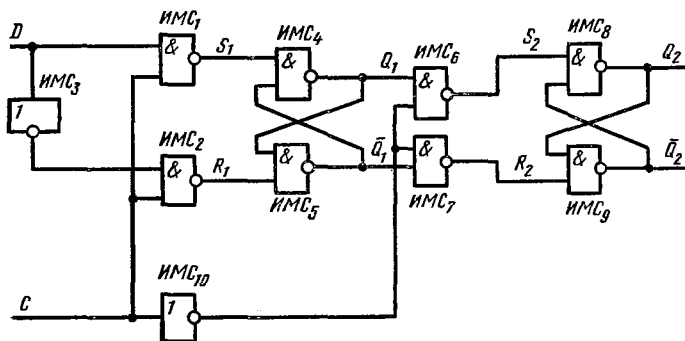


Рис. 10.6

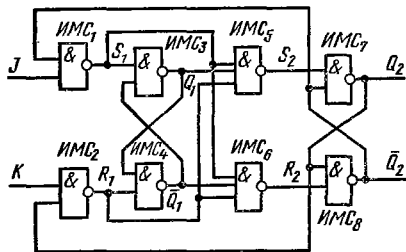


Рис. 10.7

10.7. Составить и объяснить таблицу переходов, привести временные диаграммы переключения асинхронного JK -триггера (рис. 10.7), выполненного по способу О-В.

Решение

Предположим, что JK -триггер находится в состоянии 0, т. е. $\bar{Q}_2^{n-1} = 1, Q_2^{n-1} = 0$. Тогда $R_2^{n-1} = 0, S_2^{n-1} = 0$ и соответственно $\bar{Q}_1^{n-1} = 1, Q_1^{n-1} = 0$.

При $J^n = 0, K^n = 0$ на входе основного триггера имеем $R_1^n = 1, S_1^n = 1$. Таким образом, основной триггер RS_1 подготовлен к приему информации.

При $J^n = 1, K^n = 0$ срабатывает ИМС₁ и триггер RS_1 переключается в состояние, когда $\bar{Q}_1^n = 0, Q_1^n = 1$. Сигнал с выхода ИМС₁ поступает также на один из входов ИМС₅ и ИМС₆. В результате на входах вспомогательного триггера устанавливается информация $R_2^n = 1, S_2^n = 1$. По окончании действия сигнала $J^n = 1$ устанавливается логический уровень $S_1 = 0$, что, в свою очередь, приводит к установлению комбинации $R_2^n = 1, S_2^n = 0$ и соответственно $\bar{Q}_2^n = 0, Q_2^n = 1$.

При $J^n = 0, K^n = 1$ срабатывает схема ИМС₂ и триггер RS_1 переключается в состояние, когда $R_1^n = 1, Q^n = 0$. Одновременно сигнал $R_1^n = 0$ поступает на входы ИМС₅ и ИМС₆. По окончании действия сигнала $K^n = 1$ срабатывает триггер RS_2 , на выходе которого устанавливается $\bar{Q}_2^n = 1, Q_2^n = 0$.

При $J^n = 1, K^n = 1, \bar{Q}_2^{n-1} = 1, Q_2^{n-1} = 0$ срабатывает схема ИМС₁ и триггер переключается в состояние $\bar{Q}_2^n = 0, Q_2^n = 1$. Таким образом, JK -триггер при комбинации на входах $J^n = 1, K^n = 1$ инвертирует предыдущее состояние.

Таблица переходов имеет следующий вид:

J^n	K^n	Q^n
0	0	Q^{n-1}
0	1	0
1	0	1
1	1	\bar{Q}^{n-1}

10.8. Нарисовать временные диаграммы, характеризующие работу D -триггера (рис. 10.8), если: а) на вход D поступает последовательность прямоугольных импульсов со скважностью два. На входе C — постоянный сигнал логической единицы; б) на входе D — постоянный сигнал логической единицы. На вход C поступает последовательность прямоугольных импульсов со скважностью два; в) на входах D и C — последовательность прямоугольных импульсов со

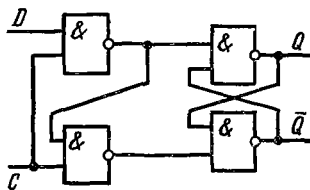


Рис. 10.8

скважностью два, однако длительность импульсов на входе D в два раза больше длительности импульсов на входе D . Инерционностью элементов схемы пренебречь.

10.9. Рассчитать симметричный триггер (рис. 10.9), работающий в режиме раздельного запуска и удовлетворяющий следующим требованиям:

максимальная частота переключений $F_{\max} = 100$ кГц,

амплитуда выходного импульса $U_{\text{вых}} \geq 10$ В,

полярность выходного импульса — отрицательная,

амплитуда прямоугольного запускающего импульса тока

$I_{\text{вх}} = 10$ мА,

диапазон рабочих температур $t = 20 \div 60$ °С,

колебания напряжения питания и разброс номиналов резисторов соответственно $\delta_E = \delta_R = \pm 10\%$.

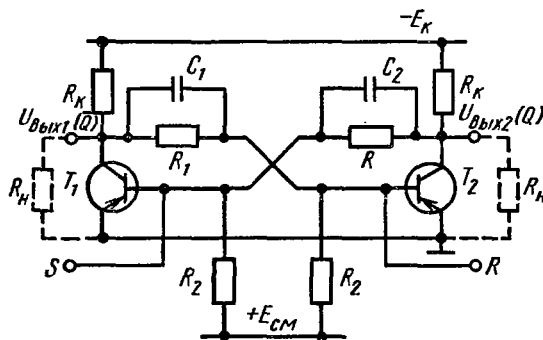


Рис. 10.9

Указание. Основные расчетные формулы см. в [13].

1. Выбор типа транзистора:

$$U_{\text{кбдоп}} \geq E_{\text{к}} (1 + \delta_E), f_{\alpha} = 5 F_{\text{max}}$$

2. Выбор емкости ускоряющих конденсаторов:

$C > C_{\text{кб}}$, $C = 1,5\tau_{\alpha}/R_{\text{к}}$ (для низкочастотных транзисторов),

$C = 1,5\tau_{\alpha}/R_{\text{к}} + C_{\text{кб}}$ (для высокочастотных транзисторов).

3. Выбор сопротивления резистора $R_{\text{к}}$:

$$R_{\text{кmin}} > E_{\text{к}}^2/P_{\text{потр}}, R_{\text{кmin}} > E_{\text{к}}/I_{\text{кдоп}}$$

4. Выбор напряжения смещения и сопротивления резистора R_2 :

$$E_{\text{см}} = 0,1E_{\text{к}}, R_2 = (1 - \delta_R - \delta_E) E_{\text{см}}/I_{\text{кб0max}}$$

5. Выбор сопротивления резистора R_1 :

$$R_1 \leq R_k (1 - 2\delta R) \left[\frac{\beta_{\min} \left(1 - \frac{I_{КБ0}}{I_{кн}} \right)}{1 + \beta_{\min} E_{см} / (1 - 2\delta_E) R_2 I_{кн}} \right].$$

6. Определение степени насыщения транзистора и максимальной рабочей частоты триггера:

$$S_{\min} = \left(\frac{E_k - I_{КБ0\max} R_k}{R_1 + R_k} - \frac{E_{см}}{R_2} \right) \frac{\beta_{\min} R_k}{E_k},$$

$$F_{\max} = \frac{2\pi f_{\alpha}}{S + 6}.$$

Решение

1. Поскольку нижний уровень выходного сигнала имеет отрицательное значение -10 В, выбираем тип проводимости транзисторов $p-n-p$.

2. Определяем напряжение питания схемы E_k из условия $E_k = (1,1 \div 1,4) U_{\text{вых}} = 12$ В.

3. Исходя из условий $f_{\alpha} = 5 F_{\max}$, $U_{к.доп} \geq E_k (1 + \delta_E)^*$, выбираем транзистор МП39Б, для которого $f_{\alpha} = 0,5$ МГц, $U_{к.доп} = 15$ В.

Выпишем остальные параметры транзистора МП39Б, необходимые при дальнейшем расчете: $I_{КБ0\max} = 150$ мкА, $\beta_{\min} = 20$, $P_{к\max} = 150$ мВт, $I_{к.доп} = 150$ мА, $C_{кб} \leq 60$ пФ.

4. Верхний уровень выходного сигнала по условию задачи близок к нулю. Поэтому выбираем схему симметричного триггера с внешним смещением (рис. 10.9).

5. Находим сопротивление резистора R_k в коллекторной цепи из следующих соображений. Для обеспечения условия $C > C_{кб}$ указанное сопротивление необходимо уменьшать. Однако при этом возрастают ток коллектора насыщенного транзистора и соответственно потребляемая мощность. При выборе сопротивления R_k необходимо также учитывать, что коллекторный ток насыщения $I_{кн}$ не должен превышать допустимого значения

$$I_{кн} = E_k / R_{к\min} < I_{к.доп}.$$

Таким образом, $R_{к\min} > E_k / I_{к.доп} = 800$ Ом. Учитывая вышеизложенное, принимаем $R_k = 1$ кОм.

6. Выбираем $E_{см} = 0,1 E_k = 1,2$ В.

7. Условие запирания транзистора выполняется, если $E_{см} / R_2 \geq I_{КБ0\max}$.

Тогда с учетом разброса значений напряжения питания и но-

миналов резистора можно записать

$$R_2 = (1 - \delta_R - \delta_E) E_{CM} / I_{КБ0\max}$$

откуда $R_2 = 64$ кОм.

8. Из условия насыщения открытого транзистора определим сопротивление резистора R_1 . Пренебрегая значением тока смещения, имеем

$$R_1 \leq \left[\frac{\beta_{\min} (1 - I_{КБ0} / I_{КН})}{1 + \beta_{\min} \frac{E_{CM}}{R_2 I_{КН}}} - 1 \right]$$

или с учетом разброса параметров

$$R_1 \leq R_K (1 - 2\delta_R) \left[\frac{\beta_{\min} \left(1 - \frac{I_{КБ0}}{I_{КН}} \right)}{1 + \frac{\beta_{\min} E_{CM}}{1 - 2\delta_E} R_2 I_{КН}} - 1 \right]$$

Принимаем $R_1 = 10$ кОм.

9. Уточняем значения $U_{\text{вых}}$ по формуле

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_1}{R_1 + R_K} (E_K - I_{КБ0} R_K) = 11 > 10 \text{ В.}$$

10. Определяем величину емкости ускоряющего конденсатора $C = 1,5\tau_\alpha / R_K = 477$ пФ.

11. Проверяем выполнение условия $C > C_K$. Имеем 477 пФ $\gg 60$ пФ.

Пренебрегая этапами подготовки и регенерации при переключении триггера и учитывая, что степень насыщения открытого транзистора

$$S_{\min} = \left(\frac{E_K - I_{КБ0\max} R_K}{R_1 + R_K} - \frac{E_{CM}}{R_2} \right) \frac{\beta_{\min} R_K}{E_K} = 1,6,$$

определяем максимальную рабочую частоту рассчитанного триггера [13]:

$$F_{\max} \approx \frac{2\pi f_\alpha}{1,6} = 400 \text{ кГц} > 100 \text{ кГц.}$$

10.10. Как следует изменить параметры симметричного триггера, рассчитанного по условиям предыдущей задачи, чтобы обеспечить его нормальную работу при подключении нагрузочного резистора R_n ?

Решение

1. При подключении заземленной нагрузки R_n степень насыщения открытого транзистора T_1 уменьшается, так как

$$I_{\text{б1}} = \frac{E_{\text{к}} - I_{\text{КБ0}}R_{\text{к}}}{R_{\text{экв}} + R_{\text{к}}} - \frac{E_{\text{см}}}{R_2},$$

где $R_{\text{экв}} = R_1 (1 + R_{\text{к}}/R_{\text{н}})$.

Следовательно, чтобы режим открытого транзистора при подключенной нагрузке соответствовал режиму открытого транзистора триггера, рассчитанного на холостой ход, сопротивление резистора R_1 следует уменьшить в $1 + R_{\text{к}}/R_{\text{н}}$ раз.

2. С уменьшением R_1 снизится амплитуда выходного импульса триггера $U_{\text{вых}}$. При наличии нагрузки с сопротивлением $R_{\text{н}}$ имеем

$$U_{\text{вых}} = \frac{(R_1 \parallel R_{\text{н}})(E_{\text{к}} - I_{\text{КБ0}}R_{\text{к}})}{(R_1 \parallel R_{\text{н}}) + R_{\text{к}}}.$$

При подключении нагрузки зарядка конденсатора C будет происходить с постоянной времени $\tau_{\text{в}} = (R_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}})C < 1,5 \tau_{\alpha}$.

В результате нарушается условие максимального быстрогодействия триггера, для выполнения которого необходимо, чтобы $\tau_{\text{з}} = 1,5 \tau_{\alpha}$. Следовательно, чтобы сохранить быстродействие триггера, рассчитанного на холостой ход, при работе с нагрузкой емкость конденсатора C необходимо увеличить в $1 + R_{\text{к}}/R_{\text{н}}$ раз.

Таким образом,

$$C = \frac{1,5 \tau_{\alpha}}{R_{\text{к}}} \left(1 + \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{н}}} \right).$$

§ 10.2. ТРИГГЕРЫ ШМИТТА

В отличие от рассмотренных выше триггерных устройств триггер Шмитта представляет собой устройство, в котором переход из одного устойчивого состояния в другое осуществляется только при определенных уровнях входного напряжения $E_{\text{г1}}$ и $E_{\text{г2}}$, называемых пороговыми уровнями.

Наличие двух пороговых уровней входного сигнала в схеме свидетельствует о гистерезисном характере передаточной характеристики данного устройства. Идеализированная передаточная характеристика триггера Шмитта представлена на рис. 10.10. При $E_{\text{г}} < E_{\text{г1}}$ триггер Шмитта находится в одном из устойчивых состояний, например когда $U_{\text{вых}} = E^0$. Как только входное напряжение достигает порогового уровня срабатывания $E_{\text{г1}}$, схема скачком переходит в другое устойчивое состояние (рабочий режим), когда $U_{\text{вых}} = E^1$. Дальнейшее повышение напряжения генератора $E_{\text{г}}$ не приводит к изменению состояния схемы. Однако уменьшение $E_{\text{г}}$ до порогового уровня отпуская $E_{\text{г2}}$ вызывает скачкообразное возвращение схемы в исходное