

РОСЖЕЛДОР

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)**

Ю.В. Шаповалова, В.В. Шаповалов

**РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ
ОСНОВЕ ТРИГГЕРА ШМИТТА**

Учебно-методическое пособие к курсовой работе

Ростов-на-Дону
2017

УДК 621.38

Рецензент: кандидат технических наук, доцент В.В. Каменский (РГУПС)

Шаповалова, Ю.В.

Разработка схемы генератора сигналов на основе триггера Шмитта : учебно-методическое пособие к курсовой работе / Ю.В. Шаповалова, В.В. Шаповалов; ФГБОУ ВО РГУПС. – Ростов н/Д, 2017. – 13 с.

Учебно-методическое пособие содержит задание на курсовую работу по дисциплине «Электроника» и методические указания по её выполнению. Дается пример расчёта предлагаемой в задании схемы генератора на основе триггера-формирователя Шмитта.

Предназначено для студентов специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов».

Одобрено к изданию кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте».

© Кол. авторов, 2017

© ФГБОУ ВО РГУПС, 2017

Содержание

1 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ	4
2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	6
3 ПОРЯДОК РАСЧЁТА ТРИГГЕРА ШМИТТА.....	11

1 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

1. Рассчитать схему генератора сигналов на основе триггера Шмитта на биполярных транзисторах. Определить параметры компонентов схемы.

Построить статическую передаточную характеристику триггера Шмитта, характеризующую зависимость напряжения на выходе от входного напряжения.

2. Оценить изменения напряжения срабатывания и отпускания, вызванные разбросом статических коэффициентов передачи токов баз транзисторов.

3. Построить на общих осях координат временные диаграммы на входе и выходе триггера Шмитта при максимальном и минимальном значениях коэффициентов передачи токов баз.

При построении временных диаграмм использовать входное напряжение треугольной формы с амплитудой, равной удвоенному напряжению срабатывания, и частотой 1 Гц (при которой запаздывание сигналов в триггере Шмитта можно не учитывать).

4. Рассчитать длительность фронта и среза выходного импульса при прямоугольной форме входного напряжения.

5. Оценить быстродействие триггера Шмитта, рассчитав максимально рабочую частоту входного сигнала.

6. Построить с соблюдением масштабов по оси времени и оси напряжений временные диаграммы входного и выходного напряжений при частоте следования входных прямоугольных импульсов, составляющей половину от максимально допустимой частоты для рассчитанного триггера, и амплитуде входного напряжения, равной удвоенному напряжению срабатывания.

Вариант задания для студентов определяется номером по списку.

Таблица 1

Варианты заданий на курсовую работу

Номер	Исходные данные			
	Тип транзистора	Сопротивление генератора Ом	Напряжение срабатывания, В	Напряжение отпущения, В
0	КТ603Е	300	1,5	1,0
1	КТ503Е	500	2,0	1,0
2	КТ201А	350	2,0	1,5
3	КТ301Е	100	1,5	1,0
4	КТ503В	200	2,5	1,5
5	КТ340А	500	3,0	1,0
6	КТ201Г	1000	3,0	1,5
7	КТ301Е	700	3,0	2,0
8	КТ3117А	100	2,0	1,0
9	КТ358А	250	2,0	1,5
10	КТ201В	600	2,5	1,0
11	КТ358В	350	2,5	1,5
12	КТ312В	600	3,0	1,0
13	КТ602А	200	3,0	1,5
14	КТ206А	250	3,0	2,0
15	КТ603А	100	2,0	1,0
16	КТ127А-1	150	2,0	1,5
17	КТ312А	100	2,5	1,0
18	КТ503А	650	2,5	1,5
19	КТ340А	700	1,5	1,0
20	КТ201Г	100	2,5	1,5
21	КТ301Е	250	3,0	2,0
22	КТ3117А	600	3,0	1,0
23	КТ358А	350	3,0	1,5
24	КТ503Е	650	1,5	2,0
25	КТ201А	700	2,5	1,0

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Несимметричные триггеры (триггеры-формирователи, триггеры Шмитта) используются в схемах электронных устройств в качестве компараторов напряжения (сравнивающих устройств) и формирователей прямоугольных импульсов из сигналов произвольной формы.

Триггеры Шмитта (ТШ) относятся к классу несимметричных триггеров, построенных на основе усилителей с положительной обратной связью по постоянному току или напряжению. Основу простейшего ТШ, варианты схем которого показаны на рис.1, составляет дифференциальный каскад, работающий в режиме большого сигнала как переключатель тока.

При использовании кремниевых транзисторов базу второго транзистора можно подключать к коллектору первого транзистора непосредственно, а при использовании германиевых транзисторов, у которых напряжение практического отпираания эмиттерного перехода соизмеримо с напряжением коллектор-эмиттер насыщения, – через делитель напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 . Этот делитель, уменьшая напряжение коллектор-эмиттер транзистора VT_1 , позволяет закрыть транзистор VT_2 , когда транзистор VT_1 открыт, и уменьшить степень насыщения второго транзистора. Ускоряющий конденсатор C_1 позволяет повысить быстродействие триггера Шмитта за счет уменьшения длительности переходных процессов.

В схемах, приведённых на рис.1, в цепь базы транзисторов VT_1 включено сопротивление $R_{г}$, имитирующее внутреннее сопротивление генератора входного напряжения. В дальнейшем изложении рассматривается упрощённая схема на кремниевых транзисторах без делителя в цепи базы второго транзистора. Подробный анализ принципа работы триггера Шмитта на биполярных транзисторах приведён в учебниках и учебных пособиях.

Триггер имеет два состояния, отличающихся режимами работы транзисторов VT_1 и VT_2 : в одном состоянии транзистор VT_1 закрыт, а VT_2 открыт, а в другом – наоборот. Триггер переходит из одного состояния в другое скачком всякий раз, когда входное напряжение достигает пороговых уровней срабатывания и отпускания.

Из временных диаграмм напряжений на входе и выходе ТШ, показанных на рис. 2, видно, что напряжение срабатывания $U_{ср}$ не равно напряжению отпускания $U_{отп}$. Такое свойство называется *гистерезисом*, а разность напряжений $U_{г}=U_{ср}-U_{отп}$ – шириной петли гистерезиса. Естественно, что устойчивые состояния в схеме возможны только при $U_{ср}>U_{отп}$.

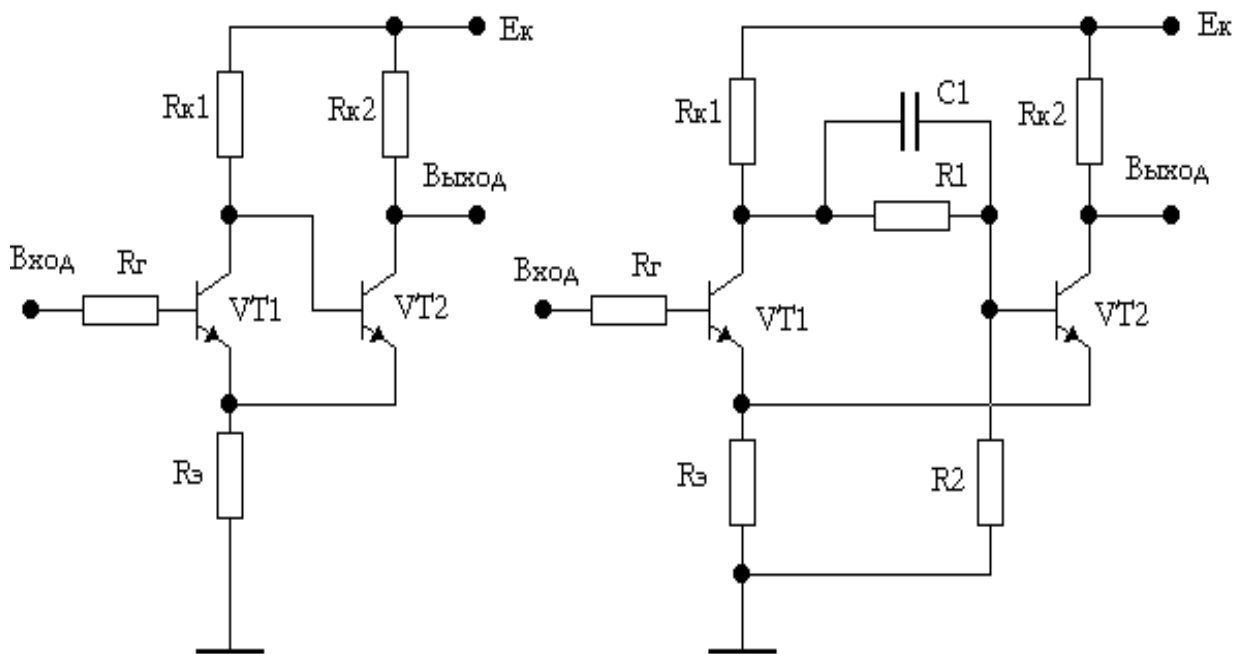


Рис. 1. Триггеры Шмитта

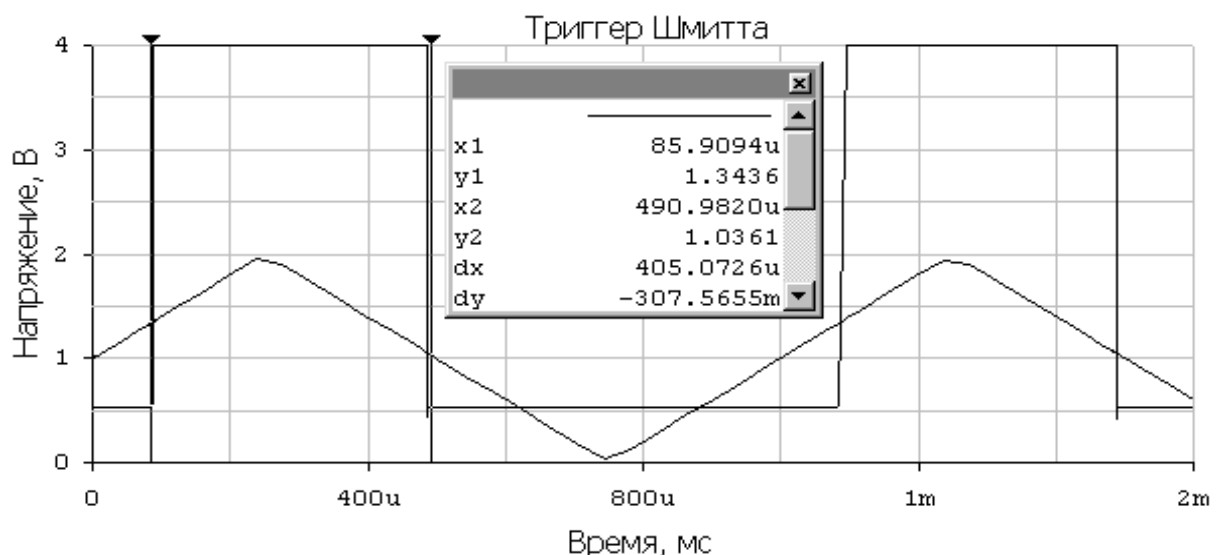


Рис. 2. Временные диаграммы напряжений на входе и выходе триггера Шмитта

Исходное состояние. Пусть в исходном состоянии напряжение генератора на входе триггера меньше напряжения срабатывания ($e_{г} < U_{ср}$), а транзистор VT1 закрыт, и на его коллекторе действует высокий уровень напряжения

$$U_{K1} \approx E_K - I_{B2} R_{K1}, \quad (1)$$

достаточный для отпирания транзистора VT2. Если при этом напряжение база-эмиттер второго транзистора

$$U_{BЭ2} \approx U_{K1} - I_{Э2} R_{Э} \approx U_{K1} - (I_{K2} + I_{B2}) R_{Э} \quad (2)$$

окажется больше напряжения насыщения кремниевого транзистора $U_{BЭ2} \approx 0,8 \text{ В}$, то на выходе установится низкий уровень напряжения

$$U_{ВЫХ} \approx U_{KЭ2.НАС} + I_{Э2} R_{Э} \approx I_{Э2} R_{Э} = U_{Э2}. \quad (3)$$

При выборе сопротивлений резисторов следует руководствоваться ограничениями:

$$R_{K1} > E_K / I_{B2.MAX} > R_{K2} \gg R_{Э}. \quad (4)$$

Переходный процесс. Устойчивое состояние сохраняется до тех пор, пока первый транзистор закрыт. Он начнёт открываться, когда напряжение база-эмиттер достигнет напряжения практического отпираания эмиттерного перехода (для кремниевых транзисторов напряжение $U_{ОБЭ} \approx 0,6 \text{ В}$).

С учётом внутреннего сопротивления генератора условие сохранения исходного состояния описывается неравенством

$$U_{ВХ} = e_{Г} - R_{Г} I_{Б1} < U_{ОБЭ} + U_{Э2}. \quad (5)$$

Когда входное напряжение достигнет *напряжения срабатывания*

$$U_{СР} \approx U_{ОБЭ} + U_{Э2} - I_{К0} R_{Г}, \quad (6)$$

начнёт открываться первый транзистор, и оба плеча дифференциального каскада окажутся в усилительном режиме. Под действием малого приращения входного напряжения $\Delta U_{ВХ}$ токи коллектора и эмиттера первого транзистора увеличатся на $\Delta I_{К1} \approx \Delta I_{Э1}$, а потенциал коллектора первого транзистора уменьшится на величину $\Delta U_{К1} \approx \Delta I_{К1} R_{К1}$.

Так как оба транзистора работают в усилительном режиме, ток эмиттера второго транзистора $\Delta I_{Э2}$ уменьшится примерно в $\beta_2 \Delta I_{Э1}$ раз. Поскольку через резистор $R_{Э}$ протекают токи эмиттеров первого и второго транзисторов, потенциал эмиттеров получит отрицательное приращение

$$\Delta U_{Э} = R_{Э} (\Delta I_{Э1} - \Delta I_{Э2}) \approx R_{Э} \Delta I_{Э1} (1 - \beta_2) < 0, \quad (7)$$

а приращение напряжения база-эмиттер первого транзистора

$$\Delta U_{БЭ1} = \Delta U_{Б1} - (-\Delta U_{Э})$$

увеличится и вызовет *дополнительное* увеличение тока коллектора первого транзистора, характерное для положительной обратной связи.

В схеме начнёт развиваться лавинообразный (*регенеративный*) процесс, открывающий первый и закрывающий второй транзистор, в результате которого выходное напряжение увеличится до максимального значения.

Поскольку изменение напряжения обратной связи $\Delta U_{Э} \gg \Delta U_{ВХ}$, транзисторы во время переходного процесса по существу включены по схеме с общей базой (ОБ), хотя внешне по начертанию схемы кажется, что они включены по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

Длительность фронта выходного напряжения при переходе триггера в рабочее состояние определяется временем заряда выходной ёмкости $C_{\text{вых}}$ при работе второго транзистора в схеме с общей базой на сопротивление r_H и ёмкость C_H нагрузки

$$t_{\phi} \approx 3[\tau_{\alpha} + C_{\text{вых}}(r_{\text{вых}}/r_H)], \quad (8)$$

где $\tau_{\alpha} = 1/2\pi f_{\alpha}$ – постоянная времени, характеризующая инерционность транзистора в схеме с ОБ,

f_{α} – граничная частота коэффициента передачи тока транзистора,

$$C_{\text{вых}} = C_{K2} + C_H, \quad (9)$$

$$r_{\text{вых}} = r_{K2}/R_{K2}, \quad (10)$$

где C_{K2} – ёмкость коллекторного перехода,

$r_{K2} \approx 10^3/L_{K2}$ – дифференциальное сопротивление коллекторного перехода второго транзистора.

Состояние неустойчивого равновесия (рабочее состояние). Если в новом состоянии первый транзистор окажется в режиме насыщения, то второй транзистор будет полностью закрыт, так как напряжение насыщения коллектор-эмиттер кремниевых транзисторов $U_{KЭ.нас} \approx (0,1 \dots 0,2) В$ меньше напряжения практического отпираания эмиттерного перехода $U_{ОбЭ} \approx 0,6 В$.

Чтобы в момент срабатывания новое состояние было устойчиво, и в схеме под действием положительной обратной связи не возникло самовозбуждения, должно выполняться условие $R_{K1} > R_{K2}$.

После срабатывания триггера второй транзистор закрыт, ток $I_{Э2} \approx 0$, и через резистор в эмиттерной цепи протекает ток только первого транзистора. Так как $I_{Э1} \approx E_K / (R_{K1} + R_{Э}) < I_{Э2}$, потенциал эмиттера примет новое значение

$$U_{Э1} = R_{Э} I_{Э1} < U_{Э2} = R_{Э} I_{Э2}. \quad (11)$$

Поэтому при уменьшении входного напряжения до $U_{ср}$ напряжение база-эмиттер первого транзистора окажется больше напряжения практического отпираания эмиттерного перехода, и состояние квазиравновесия сохранится.

Обратный переходный процесс. В рабочем состоянии первый транзистор открыт, и во входной цепи ТШ протекает ток базы $I_{Б1} \approx (1-\alpha) I_{Э1} \approx I_{K1}/\beta_1$. Новый регенеративный процесс, вызывающий обратное опрокидывание схемы, начнётся, когда входное напряжение уменьшится до другого значения порогового напряжения – *напряжения отпускания*

$$U_{отп} \approx U_{БЭ.нас1} + U_{Э1} + R_{Г} I_{Э1} / \beta_1. \quad (12)$$

Ширина петли гистерезиса $U_{\Gamma} = U_{CP} - U_{отп}$ связана с параметрами схемы следующим соотношением:

$$U_{\Gamma} \approx E_K R_3 (R_1 - R_2) / R_1 R_2. \quad (13)$$

У триггера Шмитта, временные диаграммы которого показаны на рис.2, ширина петли гистерезиса равна 0,3 В при напряжениях срабатывания и отпущения примерно 1,3 В и 1 В.

При переключении триггера в исходное состояние продолжительность переходного процесса, в основном, определяется временем заряда выходной ёмкости первого транзистора.

Пока второй транзистор закрыт, его входное сопротивление велико, и постоянная времени заряда примерно равна $C_{K1} R_{K1}$. Длительность среза импульса выходного напряжения при возвращении триггера в исходное состояние

$$t_C \approx 3[2\tau_{\alpha} + C_{K1} R_{K1}]. \quad (14)$$

Если амплитуда входного напряжения намного превысит порог срабатывания ТШ, то транзистор VT1 окажется в режиме глубокого насыщения, и быстродействие триггера ухудшится из-за процесса рассасывания накопленного избыточного заряда.

Степень насыщения биполярного транзистора принято оценивать коэффициентом $S_{НАС} \approx V_{иБ} / I_{к.НАС}$. В режиме насыщения обратная связь не действует. Поэтому транзисторы включены по схеме с общим эмиттером. Время рассасывания неосновных зарядов в схеме с общим эмиттером пропорционально постоянной времени $\tau_{\beta} \approx \beta \tau_{\alpha}$

Вычислив токи базы насыщения

$$I_{B1} \approx (U_{ВХ} - U_{Э1} - U_{БЭ1.НАС}) / R_{\Gamma}, \quad I_{B2} \approx (E_K - U_{Э2} - U_{БЭ2.НАС}) / R_{K1}, \quad (15)$$

можно определить время рассасывания неосновных зарядов в базе первого и второго транзисторов

$$t_{P1} = \tau_{\beta 1} \ln S_{НАС1}, \quad t_{P2} = \tau_{\beta 2} \ln S_{НАС2}. \quad (16)$$

Общее время переключения триггера складывается из следующих основных составляющих: длительности фронта t_{Φ} , времени рассасывания t_P и длительности среза t_C . Если на входе ТШ действуют идеальные импульсы прямоугольной формы, то максимальная рабочая частота триггера

$$F_{MAX} = 1 / (t_{\Phi} + t_{P1} + t_{P2} + t_C). \quad (17)$$

3 ПОРЯДОК РАСЧЁТА ТРИГГЕРА ШМИТТА

1. Выписать из справочников по транзисторам параметры предельного режима эксплуатации заданного транзистора: максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер $U_{КЭ.МАХ}$, максимально допустимый постоянный ток коллектора $I_{К.МАХ}$ и параметры рабочего режима: статический коэффициент передачи тока базы в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}=\beta$, обратный ток коллекторного перехода $I_{КО}$, ёмкость коллекторного перехода C_K , граничную частоту f_a , постоянную времени рассасывания неосновных зарядов t_p .

Для некоторых транзисторов в справочниках частотные свойства заданы не граничной частотой, а модулем передачи тока на заданной частоте. Например, для транзистора ГТ310А приводится значение модуля коэффициента передачи тока $\beta^*=8$ на частоте $f^*=20$ МГц. При предварительных расчётах можно полагать, что частота $f_a \approx 0,7\beta^*f^*$.

Напряжение практического отпирания эмиттерного перехода кремниевых транзисторов малой и средней мощности $U_{ОБЭ} \approx 0,6$ В, а напряжение база-эмиттер насыщения при токах эмиттера единицы – десятки миллиампер – мало отличается от $U_{БЭ,НАС} \approx 0,8$ В.

2. Выбрать ближайшее стандартное напряжение источника питания **3, 5, 10, 12, 15, 24, 36, 48** или **60 В**, удовлетворяющее условию $E_K < 0,7U_{КЭ.МАХ}$.

3. Выбрать ток покоя коллектора второго транзистора в режиме насыщения

$$I_{К2..НАС} < 0,7I_{К.МАХ}.$$

4. Рассчитать сопротивление обратной связи в эмиттерной цепи

$$R_{Э} \geq (U_{СР} + I_{КО}R_{Г} - U_{ОБЭ}) / I_{К2..НАС} \quad (18)$$

и выбрать из ряда E24 номинальное значение сопротивление резистора $R_{Э}$.

Шкала номинальных сопротивлений для постоянных резисторов общего применения для ряда E24 [15] определяется числовыми коэффициентами (1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1), умножаемыми на любое число, кратное 10.

5. Рассчитать сопротивление в коллекторной цепи второго транзистора

$$R_{К2} = (E_K / I_{К2..НАС}) - R_{Э} \quad (19)$$

и выбрать из ряда E24 номинальное значение сопротивления резистора $R_{К2}$.

6. При достаточно большом входном напряжении в рабочем режиме триггера Шмитта первый транзистор открыт и насыщен, а его ток

$$I_{К1..НАС} \approx E_K / (R_{Э} + R_{К1}) \quad (20)$$

создаёт на сопротивлении в цепи эмиттера падение напряжения $U_{Э1} = I_{К1..НАС}R_{Э}$.

С учётом (12) и (20) можно рассчитать сопротивление в коллекторной цепи первого транзистора, при котором обеспечивается заданное значение напряжения отпускания,

$$R_{KI} = E_K(R_{Э} + R_{Г} / \beta_1) / (U_{ОТП} - U_{БЭ.НАС}). \quad (21)$$

Рассчитать по формуле (21) сопротивление в коллекторной цепи первого транзистора при среднем значении коэффициента передачи тока базы

$$\beta = (\beta_{MAX} + \beta_{MIN}) / 2$$

и выбрать из ряда E24 номинальное значение сопротивления R_{KI} .

Выполненный расчёт носит предварительный характер, после которого требуется уточнение параметров устройства и, возможно, повторный расчёт, учитывающий токи баз, которые при глубокой степени насыщения транзисторов могут существенно повлиять на параметры ТШ.

Так как ток эмиттера равен сумме токов коллектора и базы ($I_{Э.НАС} = I_{К.НАС} + I_{Б.НАС}$), необходимо уточнить напряжения $U_{Э1}$, $U_{Э2}$, $U_{СР}$ и $U_{ОТП}$. Если отклонения параметров ТШ от заданных значений слишком велики, повторяют расчёт для уточнения параметров компонентов схемы.

7. После выбора номинальных значений всех сопротивлений следует по формулам (6) и (12) провести проверочный расчёт напряжений срабатывания и отпускания при минимальном β_{MIN} и максимальном β_{MAX} значениях коэффициента передачи тока базы, оценить отклонение рассчитанных параметров триггера Шмитта от заданных значений и построить временные диаграммы при треугольном входном напряжении с амплитудой $U_{МВХ} = 2U_{СР}$.

8. Рассчитать по формулам (8), (14) и (16) длительности фронта, среза выходного напряжения и время рассасывания в предположении, что на входе действуют импульсы напряжения прямоугольной формы.

Воспользовавшись формулой (17), определить максимальную рабочую частоту F_{MAX} следования входных импульсов, при которой в схеме успевают завершиться переходные процессы:

9. Построить временные диаграммы входного и выходного напряжений при амплитуде $U_{ВХ.МАХ} = 2U_{СР}$ и частоте следования входных прямоугольных импульсов $0,5F_{MAX}$, полагая, что выходное напряжение во время переходного процесса изменяется по экспоненциальному закону.

Учебное издание

Шаповалова Юлия Владимировна
Шаповалов Василий Витальевич

**РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ
ОСНОВЕ ТРИГГЕРА ШМИТТА**

Печатается в авторской редакции

Технический редактор

Подписано в печать .17. Формат 60×84/16.

Бумага газетная. Ризография. Усл. печ. л. .

Тираж экз. Изд. № . Заказ .

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.