

5.6. Генераторы синусоидальных колебаний

5.6.1. Ёмкостная трёхточечная схема LC-генератора

Принцип работы генераторов синусоидальных колебаний основан на использовании в схемах колебательных контуров или фазосдвигающих звеньев: моста Вина, двойного T -образного моста, сдвигающих RC -цепей и др. Для всех автогенераторов условием возникновения автоколебаний является наличие положительной обратной связи при коэффициенте усиления K_U , равном или большем единицы.

Рассмотрим простейшие схемы LC -генераторов, представляющих собой устройства, содержащие активный элемент (транзистор, ОУ) и сложные колебательные контуры, собранные по так называемой трёхточечной ёмкостной или трёхточечной индуктивной схеме.

Схема LC -генератора (рис. 5.37) собрана на биполярном транзисторе **VT** с колебательным контуром LC_1C_2 , частично включенном в коллекторную цепь транзистора с помощью конденсатора **C1**. Колебательный контур является тем звеном, на котором формируется выходной сигнал генератора.

Для обеспечения незатухающих колебаний генератор должен содержать источник энергии **E2** (обычно это источник постоянного напряжения) для восполнения потерь энергии в контуре. Резисторы **Rk**, **Re**, **Rb1** и **Rb2** обеспечивают нормальный режим работы транзистора по постоянному току. Конденсатор **C** называют конденсатором связи. Поступающий на базу транзистора **VT** сигнал положительной обратной связи, снимаемый с ёмкостного делителя, образованного конденсаторами **C1** и **C2**, совпадает по фазе с переменным сигналом на коллекторе. Для визуализации результатов моделирования LC -генератора в схему включены осциллограф **XSC1**, плоттер Боде **XBP1**, частотомер **XFC1** и измеритель искажений синусоиды **XDA1**.

При разомкнутой цепи положительной обратной связи (при положении переключателя **A** в верхнем положении) в схеме (рис. 5.37) получается избирательный усилитель. При подаче на базу транзистора **VT** синусоидального напряжения (действующее значение $U_{ex} = 10$ мВ) с частотой 5 кГц на выходе усилителя появляется напряжение $K_U U_{ex}$, а на выходе цепи обратной связи — напряжение $K_U U_{ex} \beta$, где β — коэффициент передачи цепи ОС, определяемый коэффициентом передачи ёмкостного делителя. Если произведение $K_U \beta = 1$ (условие баланса амплитуд), то напряжение на выходе цепи ОС будет одинаково по значению с напряжением U_{ex} , совпадая с ним по фазе.

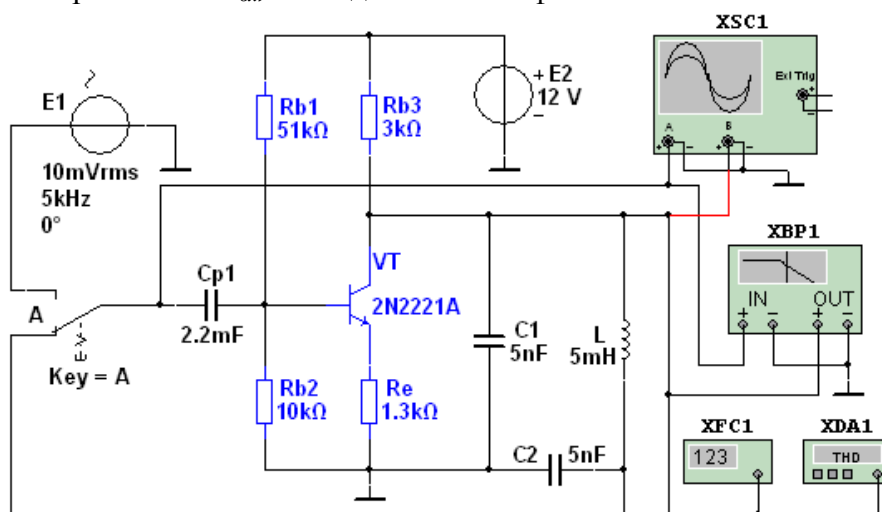


Рис. 5.37

АЧХ (рис. 5.38) избирательного усилителя (рис. 5.37), снятая с помощью плоттера **ХВР1**, из-за наличия конденсатора **С1** имеет две резонансные частоты: частоту f_0 соответствующую резонансу напряжений в последовательном контуре RLC_2 , и частоту f_1 , соответствующую резонансу токов в параллельном контуре RLC_{12} , где $C_{12} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$. Поскольку $C_{12} < C_1$ то $f_1 > f_0$, однако расхождение между частотами f_1 и f_0 невелико. АЧХ усилителя подобна АЧХ пьезоэлектрического (кварцевого) резонатора, представляющего собой пластинку, вырезанную определённым образом из кристалла природного или искусственного кварца.

При моделировании осциллограмм в среде **Multisim** точки кривых связаны друг с другом отрезками прямых. Если точек моделирования слишком мало, кривые будут выглядеть угловатыми (рис. 5.39), а точность результатов будет сомнительной, так как настоящие осциллограммы бывают только плавными.

Для получения гармонических колебаний с заданным отклонением, например, 5..7% от синусоидальной функции настроим функцию анализа **Transient Analysis**. Выполним команды **Simulate/Analysis/Transient Analysis** (Моделировать/Анализ/Анализ переходных процессов) (рис. 5.40). Моделирование переходных процессов выполняется в диапазоне времени, определяемом параметрами **Start Time** (Время начала) и **End Time**. Настройки **Maximum time step** (Максимальный шаг по времени) определяют промежуток времени между точками моделирования. При выборе опции **Generate time Steps Automatically** (Создание шага по времени автоматически) программа **Multisim** будет выбирать максимально большие промежутки между точками моделирования, в результате число точек моделирования будет минимальным. При этом ошибки при моделировании будут удерживаться в диапазоне ниже заданного **Reset to default** (по определению) максимума.

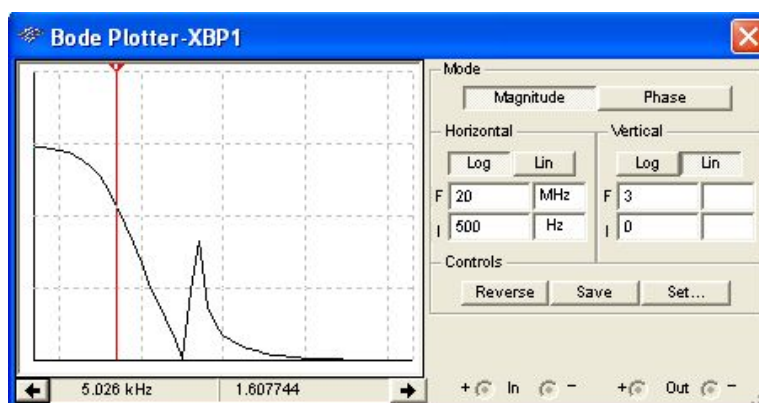


Рис. 5.38

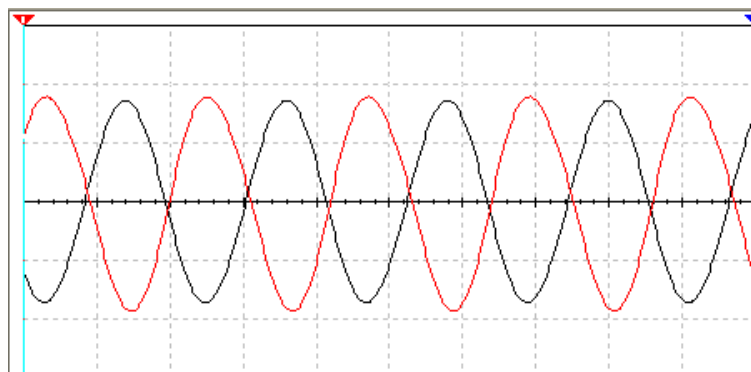


Рис. 5.39

Опция **Minimum number of time points** (Минимальное количество точек по времени) позволяет задать минимальное количество точек для всего времени моделирования. Например, если выбрать значение $MT = 20000$ точек, то максимальный промежуток времени между точками моделирования равен

$$TMAX = (TSTOP - TSTART)/MT = 0,001/20000 = 50 \text{ нс.}$$

Можно непосредственно задать значение TMAX, воспользовавшись опцией **Maximum time step** (TMAX). При моделировании схем генераторов гармонических колебаний будем устанавливать TMAX = 1e-007 с. Чтобы уменьшить время возникновения и нарастания колебаний (рис. 5.41), зададим время начала отображения осциллограмм TSTART = 0,0019 с, а время окончания моделирования TSTOP = 0,002 с.

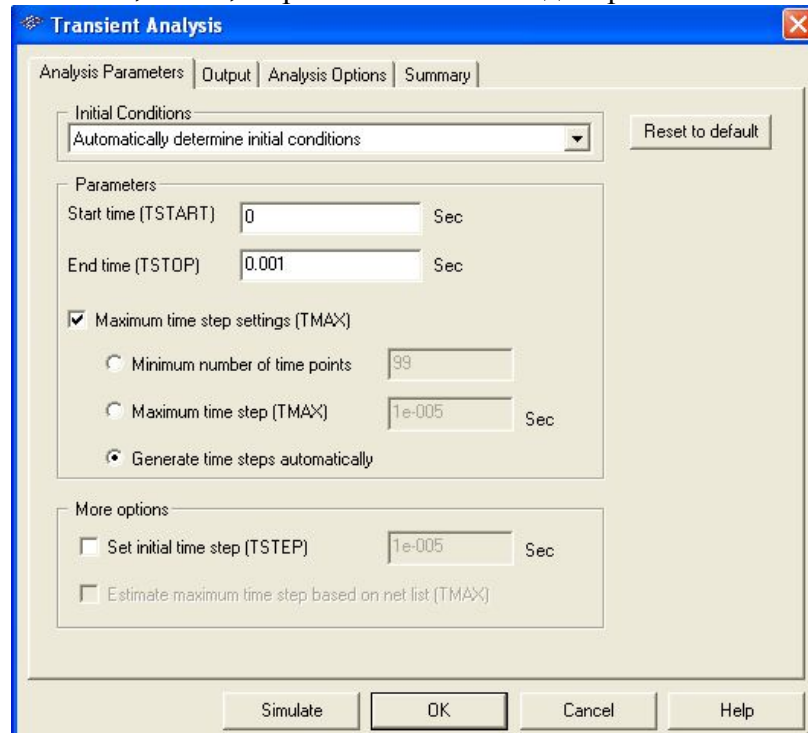


Рис. 5.40

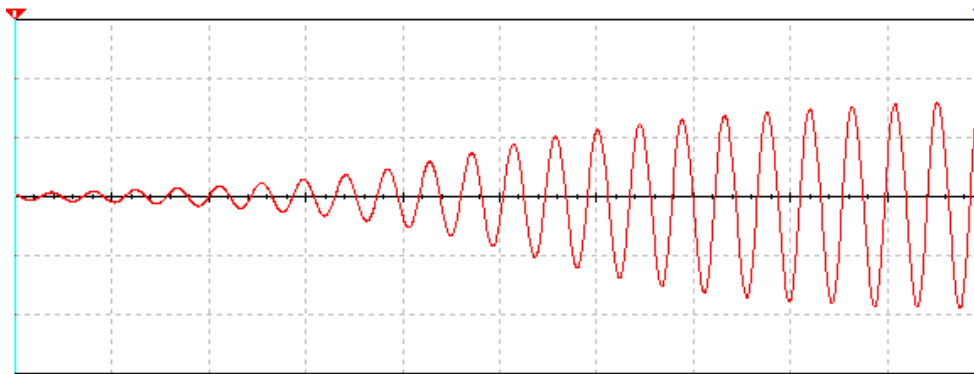


Рис. 5.41

Укажем, какие кривые следует отобразить в окне программы **Grapher**. Вызов этой программы на рабочее поле дисплея осуществляется щелчком мыши на кнопке **Grapher**, расположенной в командной строке инструментальной линейки. Чтобы определить узлы, с которых будем снимать напряжение, последовательно щелкнем мышью на соответствующих проводах, а при выборе закладок **Properties** (Параметры) определим их номера: это узел 5 (напряжение с выхода конденсатора C2) и узел 6 (выходное напряжение генератора).

Щелчком мышью на вкладке **Output** (Выходные переменные) (см. рис. 5.40, вверху). В открывшемся окне (рис. 5.42) в столбце слева выделим переменную V[5], затем щелкнем на кнопке **Add** (Добавить), и данная переменная отобразится в правом столбце. Повторим эти операции для переменной V[6] и щелкнем мышью на кнопке **Simulate** (Моделировать). После запуска и окончания моделирования откроется окно **Grapher View**, в котором отобразятся обе переменные на одном графике (рис. 5.43).

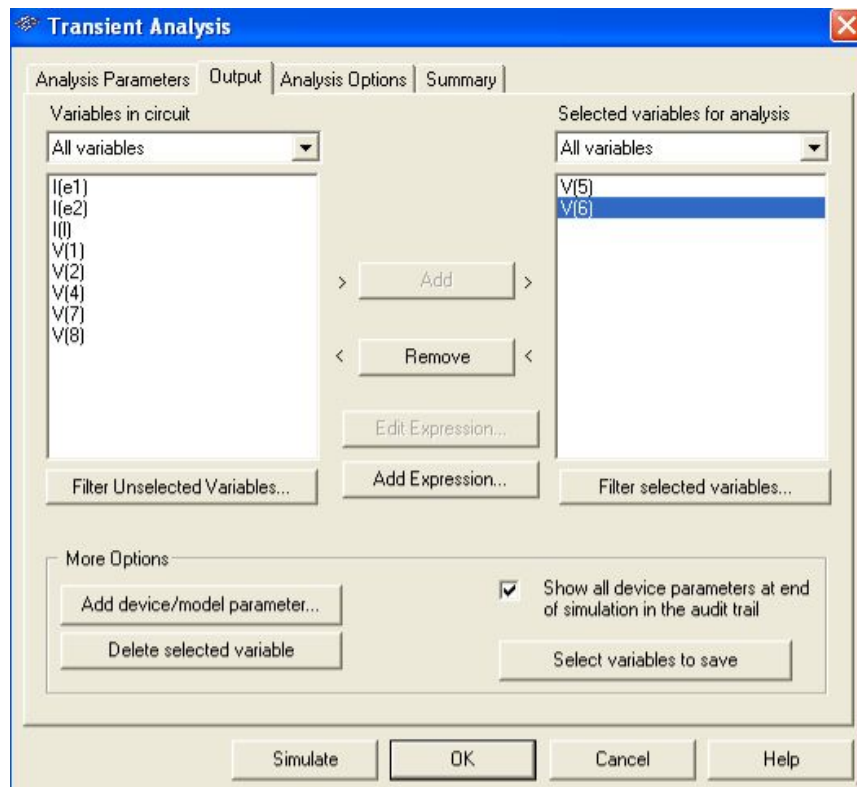
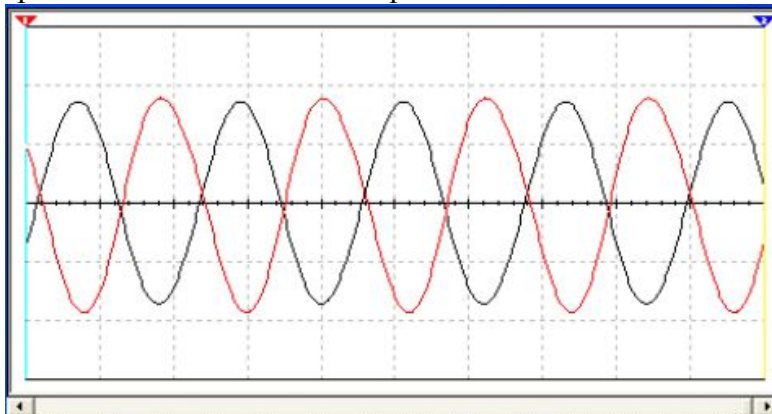


Рис. 5.42

Частота автоколебаний в первом приближении определяется по формуле

$$f_1 = 1/2\pi\sqrt{LC_1C_2/(C_1+C_2)} = 1/2\pi\sqrt{5 \cdot 10^{-3} \cdot 5^2 \cdot 10^{-18}/10^{-8}} \approx 45\text{кГц}.$$

Полученные результаты моделирования схемы (рис. 5.37): АЧХ генератора (рис. 5.44, а), частота колебаний напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ (рис. 5.44, б) и отклонение кривой напряжения от синусоидальной формы, рассчитанное с учётом десяти гармоник ряда Фурье (рис. 5.44, в), показывают, что форма колебаний близка к синусоидальной, а их частота практически совпадает с теоретическим значением.



. RC-генератор синусоидальных колебаний

Схема RC-генератора (рис. 5.47) собрана на операционном усилителе, в которой в качестве звена ПОС использован мост Вина (рис. 5.48, а).

В RC-генераторе, как и в схеме LC-генератора, неизменным остаётся общее требование, выполнение которого позволяет получить синусоидальный выходной сигнал: генерация должна возникнуть и поддерживаться на одной-единственной частоте, для которой выполняется условие баланса амплитуд и условие баланса фаз.

Мост Вина (рис. 5.48, а) представляет собой четырёхплечный мост переменного тока, состоящий из двух частотно-зависимых RC-звеньев, в одном из которых резистор **R1**

и конденсатор **C1** соединены между собой последовательно, а в другом плече элементы **R2** и **C2** соединены параллельно, и резистивной ветви, содержащей два последовательно соединённых резистора **R3** и **R5**.

Существует единственная частота, на которой частотно-зависимый четырёхплечный мост Вина сбалансирован.

Эту частоту определяют по формуле $f_1 = 1/(2\pi\sqrt{C_1C_2R_1R_2})$.

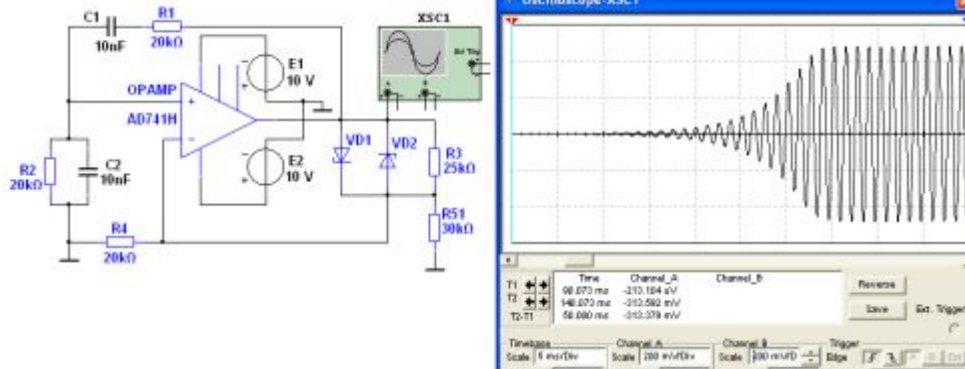


Рис. 5.47

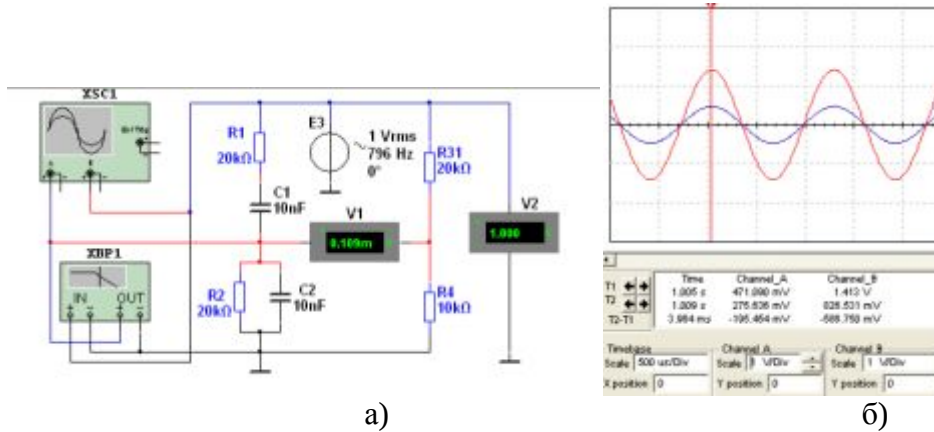


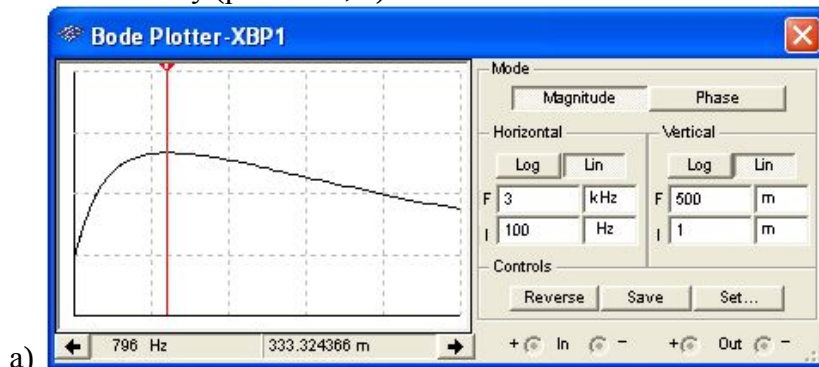
Рис. 5.48

При $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$ генератор имеет минимальные нелинейные искажения выходного сигнала и возбуждается на частоте

$$f_1 = 1/(2\pi RC).$$

При $R = 20$ кОм и $C = 10$ нФ частота $f_1 \approx 796$ Гц.

На частоте f_1 квазирезонанса коэффициенты передачи $\beta = U_2/U_1$ левой и правой ветвей моста одинаковы и равны $1/3$ (рис. 5.49, а), а фазовый сдвиг Ψ (рис. 5.49, б) между подводимым к мосту напряжением U_1 и выходным U_2 (см. рис. 5.48, б) равен нулю. Характеристики $\beta(f) = U_2(f)/U_1(f)$ и $\Psi(f)$ получены с помощью плоттера Бодэ **XPB1**, включенного в схему (рис. 5.48, а).



а)

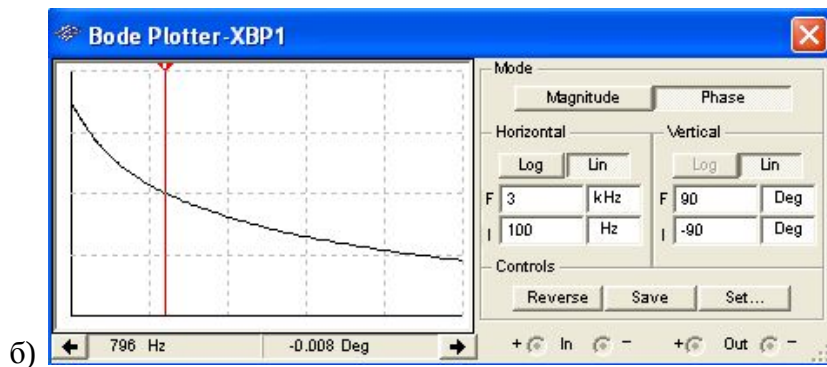


Рис. 5.49

При малейшем отклонении частоты сигнала вверх или вниз относительно частоты f_1 на выходе моста появляется сигнал с фазовым сдвигом относительно входного сигнала на $\mp 90^\circ$. Поэтому мост Вина в RC -генераторах немного расстраивают, увеличивая сопротивление резистора **R5** (или уменьшая сопротивление резистора **R3**), в результате чего создаётся входное напряжение $U_2 = U_a - U_6$ операционного усилителя ОРАМР (см. рис. 5.47). Так как на частоте f_1 напряжение U_a узла а совпадает с напряжением U_1 , его используют для создания ПОС, а несколько меньшее напряжение U_6 узла б — для ООС.

В схеме (рис. 5.47) на неинвертирующий вход ОУ поступает сигнал ПОС из узла а левой ветви моста, состоящей из двух RC -звеньев с учетом входного сопротивления ОУ, а несколько меньший по амплитуде сигнал ООС поступает на инвертирующий вход ОУ из узла б правой ветви моста, состоящей из резисторов **R3** и **R5**.

Элементы резистивной ветви моста Вина выбирают в соответствии с выражением $R_3 = 2R_5(1 + \Delta)$, где $\Delta = 0,01...0,1$ — часть сопротивления, на которую необходимо увеличить сопротивление резистора **R5**, чтобы получить необходимую разбалансировку моста. Коэффициент усиления ОУ при разбалансировке $\Delta = 0,01$ должен превышать 900, а при $\Delta = 0,1$ — только 90. Лишь при таких значениях коэффициента K_U собранная на ОУ схема (рис. 5.47) превращается в генератор.

Для стабилизации работы в схеме (рис. 5.47) RC -генератора применена симметричная нелинейная обратная связь для обоих полувольт выходного напряжения U_1 , обеспечиваемая двумя стабилитронами **VC1** и **VC2** с напряжением стабилизации $U_{ст} = 5,1$ В. Надёжное возбуждение генератора достигнуто за счёт корректировки коэффициента ООС изменением сопротивлений резисторов **R3** и **R5**.

В реальном RC -генераторе обычно частота плавно перестраивается в пределах заданного диапазона, для чего используются сдвоенные переменные резисторы **R1** и **R2** или сдвоенный блок конденсаторов **C1** и **C2** с изменяемыми ёмкостями.

Приложение 1. Содержание отчёта

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Наименование и цель работы.
3. Краткие сведения из теории и предварительный расчет.
4. Модели исследуемых электронных устройств с виртуальными измерительными приборами.
5. Таблицы с результатами расчета и эксперимента.
6. Выводы по работе. Сравнить экспериментальные данные с данными предварительного расчета.
7. В конце работы следует привести перечень использованной литературы, дату выполнения работы и подпись исполнителя.